

УДК 621.438

ГИБРИДНЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ НА ТОПЛИВАХ БИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Рассматривается возможность создания нового вида газотурбинных энергетических установок, в которых традиционная камера сгорания заменена батареей твердооксидных топливных элементов. Показано, что современные технологии ТОТЭ позволяют значительно увеличить удельную мощность, эффективность и ресурс энергетической установки. Становится реальной генерация электроэнергии с удельной объемной мощностью на уровне 1 МВт/м, при ресурсе топливных элементов достигающем до 80000 час.

Ключевые слова: электроэнергия, компрессор, биосырье

The opportunity of creation of a new kind gas turbine power installations in which the traditional chamber of combustion is replaced by the battery solide-oxide fuel elements is considered. It is shown, that modern technologies TOTЭ allow to increase considerably specific capacity, efficiency and a resource of power installation. There is real a generation of the electric power with specific volumetric capacity at a level of 1 MW/m, at a resource of fuel elements reaching till 80000 o'clock.

Keywords: the electric power, the compressor, bioraw material

Л. С. Яновский

Доктор технических наук, профессор, начальник отдела*
Контактный тел.: (+7-495) 362-00-23

А. В. Байков

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
начальник сектора отдела*

Контактный тел.: (+7-495) 362-90-06

*Отдел «Двигатели и химмотология»

Центральный институт авиационного моторостроения им.

П.И. Баранова

ул. Авиамоторная, 2, г. Москва, Россия, 111116

В. Ф. Чухарев

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
начальник отдела**

Контактный тел.: (+7-35146) -5-46-67

В. В. Кулаев

Старший научный сотрудник**

Контактный тел.: (+7-35146) -5-46-67

**Российский федеральный ядерный центр

Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики им. Академика Е.И. Забабахина

ул. Васильева, 13, г. Снежинск, Челябинская область,
Россия, 456770

М. В. Цодиков

Доктор химических наук, профессор, заведующий
лабораторией

Контактный тел.: (+7-495) -955-43-04

Лаборатория каталитических нанотехнологий

Институт нефтехимического синтеза им. академика А.В.

Топчиева Российской академии наук

Ленинский проспект, 29, г. Москва, Россия, 119991

1. Введение

Если общественные требования, выраженные в Киотском протоколе, будут законодательно утверждены, то применение ископаемых органических топлив в ряде стран - производителей электроэнергии стол-

кнется с ограничениями, благодаря вводимым территориальным квотам на выброс углекислого газа.

Выходом из складывающейся ситуации может стать разработка новых методов получения электро-энергии при использовании топлив из биосырья. Как известно, растения, в процессе своего роста поглоща-

ют углекислый газ из атмосферы. Из их растительной массы современными биохимическими методами возможно получение целого ряда промежуточных веществ (субстратов), которые могут быть использованы в качестве топлива. К ним относятся этанол, бутанол, глицерин, уксусная кислота и легкие углеводороды, входящие в состав т. н. «биогазов», получаемых при переработке сточных вод или биологических отходов [1]. При этом в атмосферу возвращается углекислый газ, ранее поглощенный растениями. Таким образом, потребление топлива из биосырья не приводит к увеличению общей массы углекислого газа, содержащегося в атмосфере.

Складывающаяся ситуация благоприятствует появлению нового вида энергетических установок - гибридных энергетических установок, в которых для привода газовых турбин используются отходящие электродные газы батареи топливных элементов. Для условий стационарной энергетики наиболее подходящими являются батареи твердооксидных топливных элементов (батарея ТОТЭ).

В Европе, с целью развития новой технологии, была принята специальная исследовательская программа "BioCellus" [2]. Замена в газотурбинной энергетической установке традиционной камеры сгорания батареями ТОТЭ позволяет существенно повысить экономии топлива, улучшить экологическую обстановку в зоне эксплуатации энергетической установки и улучшить динамику выработки электроэнергии в зависимости от нужд потребителей.

В технической литературе последнего времени вопросам, связанным с созданием газотурбинных энергетических установок, использующих в своем составе топливные элементы, уделяется большое внимание [3]. Основным фактором, сдерживающим развитие энергетики на основе топливных элементов, до сих пор являлись экономические показатели [4]. Ресурс современных топливных элементов в большинстве случаев недостаточен для компенсации больших затрат, связанных с созданием энергетических установок на их основе.

Но в последнее время в области технологии топливных элементов были сделаны новые шаги, которые заставляют иначе взглянуть на перспективы развития этого вида энергетики.

Список условных обозначений:

- T - температура
- ΔQ - изменение количества тепла
- p - давление
- L_{AD} - адиабатическая работа 1 кг газов
- \dot{m} - секундный расход
- L_0 - стехиометрическое соотношение
- ΔI - изменение энтальпии веществ
- L - отношение расходов
- α - коэффициент избытка
- η - КПД

- H_u - тепловая способность
- δH_u - относительное изменение теплотворной способности топлива после превращения в синтез-газ

Индексы:

- AD - адиабатический
- AV - средний
- a - воздушный
- IN - вход
- COM - компрессор
- T - турбина
- f - топливо
- OUT - выход

2. Основная идея технологии тонких пленок

Как и всякий источник электрической энергии, топливный элемент характеризуется своей вольтамперной характеристикой, которая имеет ниспадающий характер [4]. Это приводит к тому, что при определенной плотности тока топливный элемент имеет четко выраженный максимум электрической мощности. Поэтому работа любого топливного элемента характеризуется тремя основными параметрами: максимальной удельной электрической мощностью, получаемой с единицы поверхности ($P_{уд\ max}$), эффективным КПД (η_{EL}) и коэффициентом использования топлива ($k_{ИТ}$). В зависимости от величины ЭДС, создаваемой элементом (E), электрического сопротивления - R_{EL} и площади активной поверхности - S_a , величина $P_{уд\ max}$ определяется следующим выражением:

$$P_{уд\ max} = \frac{E^2 \cdot S_a}{4 \cdot R_{EL}} \tag{1}$$

Эффективный КПД топливного элемента определяется в виде произведения трех основных составляющих

$$\eta_{EL} = \eta_T \cdot k_{ИТ} \cdot \eta_C \tag{2}$$

В этом произведении η_T - термодинамический (идеальный) КПД топливного элемента, определяемый величиной термодинамических функций, характеризующих электрохимические реакции, происходящие в топливном элементе. Функциональная зависимость η_T , T_p для различных видов топлива хорошо известна [4] (рис. 1).

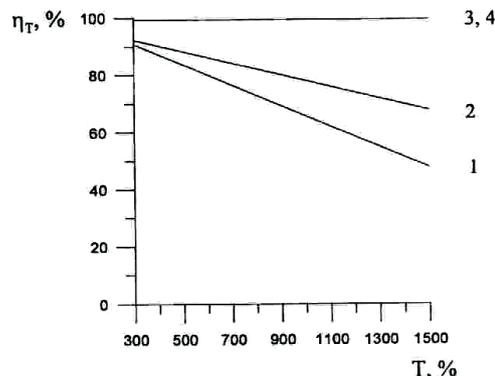


Рис. 1. Зависимость термодинамического КПД топливного элемента от рабочей температуры и вида применяемого топлива.
1- окись углерода (CO); 2. водород (H₂); 3. метан (CH₄); 4. углерод (C).

Величина коэффициента использования топлива $k_{ИТ}$ зависит от многих факторов, включая параметры характеризующие движение рабочих сред в топливном элементе и, как правило, находится на уровне $0,7 \div 0,9$. КПД топливного элемента по напряжению η_C , может изменяться в широких пределах: от 0,4 до 0,99, в зависимости от отношения электрического сопротивления внешней цепи (R_H) к электрическому сопротивлению источника тока (топливного элемента R_{EL}):

$$\eta_c = \frac{k_H}{k_H + 1} \tag{3}$$

где: $k_H = \frac{R_H}{R_{EL}}$.

В случае, когда $k_H = 1$, величина $P_{уд}$ достигает своего максимума:

$P_{уд} = P_{уд\max}$,
при этом КПД по напряжению $\eta_c = 0.5$.

Таким образом, изменяя величину внешней нагрузки - R_H , можно изменять плотность генерируемого тока

$$j = \frac{E}{R_{EL} \cdot S_a \cdot (1 + k_H)} \tag{4}$$

и удельную электрическую мощность, получаемую с единицы поверхности топливного элемента

$$P_{уд} = P_{уд\max} \cdot \frac{4 \cdot k_H}{(k_H + 1)^2} \tag{5}$$

Выражение (5) можно представить в следующем виде:

$$P_{уд} = \frac{E^2}{4 \cdot (\rho_a \cdot \Delta_a + \rho_e \cdot \Delta_e + \rho_k \cdot \Delta_k + r_A)} \cdot \frac{4 \cdot k_H}{(k_H + 1)^2}, \tag{6}$$

где: ρ , Δ - удельное электрическое сопротивление и толщина анода, электролита и катода, соответственно; r_A - дополнительное сопротивление поляризационных потерь в топливном элементе.

Соотношение (6) показывает, что величина $P_{уд}$ сильно зависит от удельного электрического сопротивления отдельных слоев топливного элемента. Для твердых электролитов на основе керамики иттрия (Y), характерное значение удельного электрического сопротивления находится на уровне $\rho_e \sim 10$ ом·см. Для широко применяемых в ТОТЭ катодов на основе манганитов: $\rho_k \sim 0.1$ ом·см, а для анодов, на никелево-керамической основе $\rho_a \sim 0.001$ ом·см.

Если создать топливный элемент, в котором на никелево-керамическую основу (анод) будут нанесены тонкие пленки, образующие электролит и катод, то такой топливный элемент теоретически мог бы развивать очень большую удельную электрическую мощность. В настоящее время эта идея положена в основу создания тонкопленочных топливных элементов, которые образованы тонкими пленками электролита и катода, нанесенными на общую базу из анодного материала [5]. Схема такого элемента представлена на рис. 2.

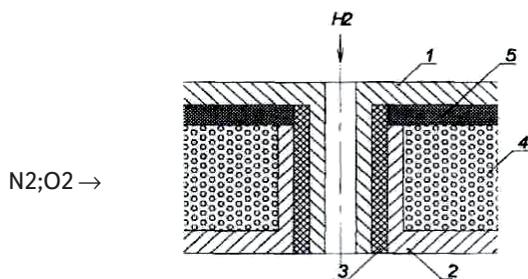


Рис. 2. Принципиальная схема тонкопленочного топливного микроэлемента с несущим анодом. 1 - анод; 2 - катод; 3 - электролит; 4 - пористый токосъем, омываемый воздухом, подаваемым к катоду; 5 - электрическая изоляция анодной пластины.

3. Преимущества технологии тонких пленок

На рис. 3 представлена вольтамперная характеристика образца ТОТЭ, изготовленного по технологии тонких пленок, при давлениях рабочих сред 0,1 и 0,7 МПа [6]. Как видно, вольтамперные характеристики тонкопленочного топливного элемента существенно лучше, чем у других топливных элементов изготовленных по традиционным технологиям (рис. 4) [7-9].

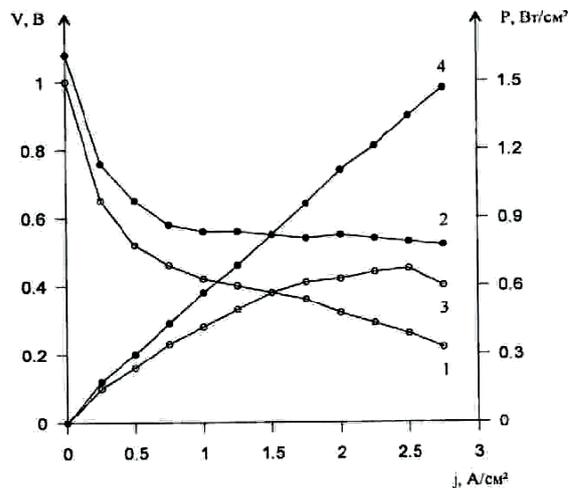


Рис. 3. Вольтамперные характеристики тонкопленочного топливного микроэлемента, изготовленного с применением технологии тонких пленок [6]. 1, 2 - зависимость напряжения от плотности тока при давлении 0,1 и 0,7 МПа соответственно; 3, 4 - зависимость удельной поверхностной электрической мощности от плотности тока при давлении 0,1 и 0,7 МПа соответственно

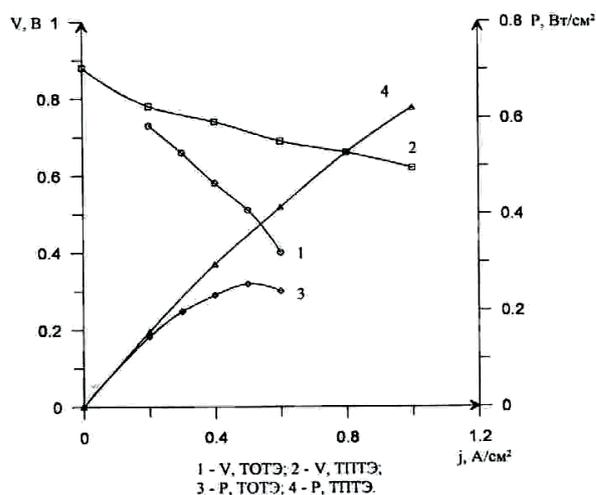


Рис. 4. Вольтамперные характеристики твердооксидных (ТОТЭ) и гвердополимерных (ТПТЭ) топливных элементов, изготовленных по традиционным технологиям [7], [9]. 1- зависимость напряжения от плотности тока для ТПТЭ; 2- зависимость напряжения от плотности тока для ТОТЭ; 3- зависимость удельной поверхностной -электрической мощности от плотности тока для ТПТЭ; 4- зависимость удельной поверхностной электрической мощности от плотности тока для ТОТЭ

Характерной особенностью технологии тонких пленок является большой эффект увеличения удельной мощности топливного элемента при увеличении давления рабочих сред. Снижение поляризационных потерь приводит к улучшению всех основных удельных характеристик топливных элементов (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение основных удельных характеристик ТОТЭ изготовленных по традиционным технологиям и технологии тонких пленок

Тип ТОТЭ	Основные размеры, мм	Максимальная поверхностная удельная мощность, Вт/см ²	Минимальный удельный вес, Кг/кВт	Максимальная удельная объемная мощность, кВт/дм ³
Трубчатый ТОТЭ работающий под атмосферным давлением, разработки фирм «Siemens-Westinghouse» [3, 7]	d=22 l=1850	0.25	4.5	0.11
Трубчатый мини-ТОТЭ, работающий под атмосферным давлением, разработки ВНИИТФ [8]	d=10 l=120	0.28	4.0	0.1
Трубчатый микро-ТОТЭ на основе технологии тонких пленок, работающий под повышенным давлением по образцу CRIEPI (0.7 МПа), [6]	d=2 l=50	1.5	0.11	12.0

Выигрыш от применения технологии тонких пленок еще более увеличивается, если перейти к использованию топливных элементов с микроразмерами. В этом случае возрастает активная поверхность топливных элементов, находящихся в единице объема и снижается удельный вес конструкции в целом.

Улучшение удельных показателей топливной батареи с микроэлементами делает целесообразной ее работу при электрическом сопротивлении нагрузки внешней сети, значительно превосходящей электрическое сопротивление самой батареи ($k_H \gg 1$). При этом, из-за большой величины максимальной удельной объемной мощности, находящейся на уровне $10-15 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$, становится реальностью постоянная работа с удельной объемной мощностью на уровне $1-2 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$ при КПД по напряжению порядка 85 - 90%, что делает эффективный КПД батареи близким к идеальному, термодинамическому значению (3), (2).

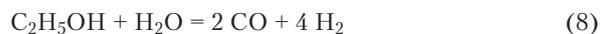
Важным фактором, ограничивающим рабочий ресурс твердооксидных топливных элементов, является взаимодиффузия компонентов, входящих в состав катода, анода и электролита. До последнего времени, считалось, что для того, чтобы достичь больших рабочих ресурсов в наземной энергетике, следует использовать топливные элементы с большой единичной мощностью и большими размерами [4]. Но в последнее время теоретически было показано, что поскольку скорость диффузии в твердом теле зависит линейно от размеров тела и экспоненциально от температуры, то благодаря большой максимальной удельной электрической мощности тонкопленочных элементов, существует возможность уменьшить их рабочую температуру. Это приводит к снижению скорости диффузии материалов различных слоев, благодаря чему возрастает рабочий ресурс топливного элемента. В работе [10] показано, что для тонкопленочного варианта ТОТЭ с примерным составом электродов: катод – манганит лантана – стронция ($\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$); анод - никелевый кермет, с добавкой диоксида циркония, при рабочей температуре 750°C можно ожидать ресурса доходящего до 80000 час. Следует отметить, что вольт - амперные характеристики микроТОТЭ, приведенные на рис. 3, получены при рабочей температуре всего 650°C. Это обстоятельство решает вопрос об экономической перспективности энергетических установок с топливными элементами. Как показано в работе [11], при выходной электрической мощности более 100 кВт, энергетическая установка с топливными элементами становится экономически более выгодной по сравнению с традиционными тепловыми и атомными электростанциями при рабочем ресурсе топливных элементов свыше 45000 часов непрерывной работы.

4. Новые возможности усовершенствования рабочего цикла

Если оказывается возможным использовать термохимическую регенерацию тепла, то КПД батареи топливных элементов может превышать КПД отдельно взятого топливного элемента. Перспективность такой организации рабочего процесса в своих работах впервые отмечена В.Г. Носачем [12].

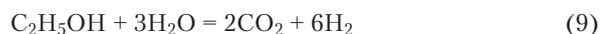
Рассмотрим возможности рабочего процесса с термохимической регенерацией тепла в случае паровой конверсии исходного топлива на примере этилового спирта.

В общем случае, реакция паровой конверсии этилового спирта на твердом катализаторе протекает в соответствии со следующим уравнением:



В результате из спирта получается синтез-газ, состоящий из окиси углерода и водорода.

При проведении той же реакции при большом избытке воды (концентрация спирта в водном растворе 20-30 %) в результате паровой конверсии получается чистый водород:



Если принять, что теплотворная способность спирта равна $27,6 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$, то полученный, в соответствии с химической реакцией (9), водород имеет теплотворную способность 31,7 МДж на 1 кг исходного спирта. Т.е. для осуществления химической реакции (9) нужно дополнительно не менее 4,1 МДж тепла из внешних источников. Это составляет 14,9 % от теплотворной способности исходного топлива (спирта).

Из уравнения химической реакции (9) следует, что для преобразования 1 гр. спирта, требуется 1,17 гр. воды. Поэтому генерация чистого водорода из спирта имеет место лишь при избытке реакционной воды, не менее чем в 2,5 раза превосходящем количество воды, необходимое для осуществления реакции по этому уравнению.

Если в результате реакции паровой конверсии, теплотворная способность получаемого водорода или синтез-газа относительно 1кг исходного топлива изменяется, то генерируемая в топливной батарее электрическая мощность будет определяться как:

$$N_{эл} = \dot{m}_f \cdot H_u \cdot (1 + \delta H_u) \cdot k_{ИТ} \cdot \eta_{EL} \quad (10)$$

При этом в топливной батарее будет выделяться тепло:

$$\Delta Q_{EX} = \dot{m}_f \cdot H_u \cdot (1 + \delta H_u) \cdot k_{ИТ} \cdot (1 - \eta_{EL}) \quad (11)$$

Помимо тепла электрохимических реакций, к дополнительным источникам тепла в топливной батарее относится дожигание неиспользованных остатков топлива вне топливных элементов:

$$\Delta Q_B = \dot{m}_f \cdot H_u \cdot (1 + \delta H_u) \cdot (1 - k_{ИТ}) \quad (12)$$

В результате приход тепла в топливную батарею будет выглядеть следующим образом

$$\Delta Q_{IN} = \Delta Q_{COM} + \Delta Q_{EX} + \Delta Q_B, \quad (13)$$

где ΔQ_{COM} - количество тепла, принесенное воздухом из компрессора, при его разогревании вследствие сжатия в компрессоре

$$\Delta Q_{COM} = \dot{m}_f \cdot \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta I_a. \quad (14)$$

Уход тепла из топливной батареи определяется уносом тепла потоком электродных газов, имеющих рабочую температуру топливной батареи $T_B - \Delta Q_g$ (Тв); поглощением тепла на осуществление эндотермических реакций - ΔQ_{CON} и утечками тепла из конструкции батареи - ΔQ_{LOSS} . В результате

$$\Delta Q_{OUT} = \Delta Q_g + \Delta Q_{CON} + \Delta Q_{LOSS} \quad (15)$$

Для поддержания в топливной батарее рабочей температуры T_B необходимо, чтобы при этой температуре выполнялся тепловой баланс

$$\Delta Q_{IN} = \Delta Q_{OUT} \quad (16)$$

Если отдельные члены уравнения (16) представить в развернутом виде, используя очевидные соотношения:

$$\Delta Q_g = \dot{m}_f \cdot (1 + \alpha \cdot L_0 + \alpha_{H_2O} \cdot L_{H_2O}) \cdot \Delta I_g;$$

$$\Delta Q_{LOSS} = \dot{m}_f \cdot H_u \cdot g_{LOSS},$$

то условие теплового баланса можно записать в следующем виде:

$$\alpha = H_u \cdot \frac{(1 + \delta H_u) \cdot k_{ИТ} \cdot (1 - \eta_{EL})}{L_0 \cdot (\Delta I_g(T_B) - \Delta I_a(T_a))} - g_a. \quad (17)$$

где: g_a - коэффициент дополнительных тепловых затрат, который учитывает увеличение выноса тепла потоком электродных газов из-за дополнительного расхода воды, расход тепла на осуществление реакций конверсии, и утечек тепла во внешнюю среду по отношению к количеству тепла, идущему на нагревание воздуха, при $\alpha = 1$.

Условие $\alpha = 1$ в уравнении (17) означает, что в топливную батарею поступает только минимально необходимое для полного окисления исходного топлива количество воздуха. Наличие в уравнении (17) члена $g_a > 0$ означает, что в батарее, помимо затрат тепла на нагревание воздуха, имеются дополнительные затраты тепловой энергии.

Пренебрегая разницей в массовом расходе воздуха через компрессор и газов через турбину, эффективный КПД энергетической установки, включающей в себя батарею топливных элементов и газотурбинный блок, можно записать так:

$$\eta_{EF} = (1 + \delta H_u) \cdot k_{ИТ} \cdot \eta_{EL} + \frac{\alpha \cdot L_0}{H_u} \cdot (\eta_T \cdot L_{AD T} - \frac{L_{AD COM}}{\eta_{COM}}) \quad (18)$$

На рис. 5 представлены результаты расчетов величины η_{EF} в зависимости от $k_{ИТ}$.

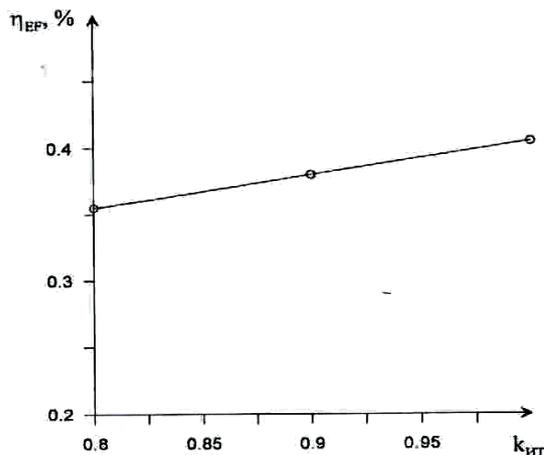


Рис. 5. Зависимость эффективного КПД гибридной энергетической установки от коэффициента использования топлива в ТОТЭ при паровой конверсии исходного топлива (этиловый спирт) в водород

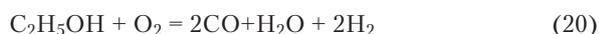
При проведении этих расчетов было принято, что для этилового спирта $H_u = 27600 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ и $L_0 = 9,07$. Процесс паровой конверсии этилового спирта характеризовался следующими параметрами: $L_{H_2O} = 2,93$, $\delta H_u = 0,149$.

КПД турбины и компрессора принимался 0,85 и 0,8 соответственно. В результате проведенных рас-

четов было установлено, что КПД гибридной установки в данном случае оказывается низким - не более 40%. Тепловой баланс топливной батареи при паровой конверсии этилового спирта соблюдается только при низких значениях КПД топливных элементов, не превышающих $\eta_{EL} = 0,3$. В противном случае тепла, поступающего в батарею топливных элементов, не хватает на нагревание воды и воздуха до требуемой температуры. В данном случае коэффициент дополнительных тепловых затрат оказывается очень большим: $g_w = 2,0$.

Результаты проведенных расчетов показывают, что для эффективной работы гибридной энергетической установки необходимы другие термохимические процессы генерации водорода или синтез-газа, сопровождающиеся меньшим расходом реакционной воды. К числу таких методов следует, прежде всего, отнести автотермический риформинг [13]. Автотермический риформинг - это сложный многоступенчатый процесс, в результате которого из исходного жидкого топлива может быть получен водород или синтез-газ ($CO + H_2$).

На первой стадии автотермического риформинга производится неполное окисление исходного топлива путем добавления к нему небольшого количества атмосферного воздуха. Применительно к случаю использования этилового спирта, этот процесс можно представить следующими уравнениями химических реакций:



(неполное окисление топлива)



(разложения непрореагировавшей части топлива под воздействием выделяющегося тепла).

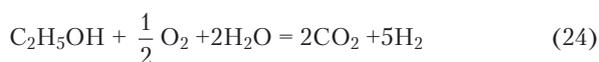
На второй стадии легкие непредельные углеводороды, образовавшиеся при разложении спирта, вступают в реакцию паровой конверсии с парами воды в присутствии катализатора:



и, наконец, на третьей стадии окись углерода, являющаяся продуктом второй стадии процесса, реагирует с парами воды по реакции «водяного газа», давая дополнительный водород:



Для осуществления химической реакции третьей стадии требуется специальный катализатор и пониженный температурный режим, поскольку эта реакция хорошо протекает только при температурах не выше $600^\circ C$. Брутто-реакция, описывающая процесс в целом, представима следующим уравнением:



Характерной особенностью этой реакции является ее нейтральный тепловой баланс. То тепло, которое выделилось на первой, экзотермической стадии реакции, будет полностью израсходовано на последующей эндо-

термической стадии. При автотермическом риформинге 70%-го спирта, коэффициент g_w уменьшается до 0,35, что кардинально улучшает эффективный КПД:

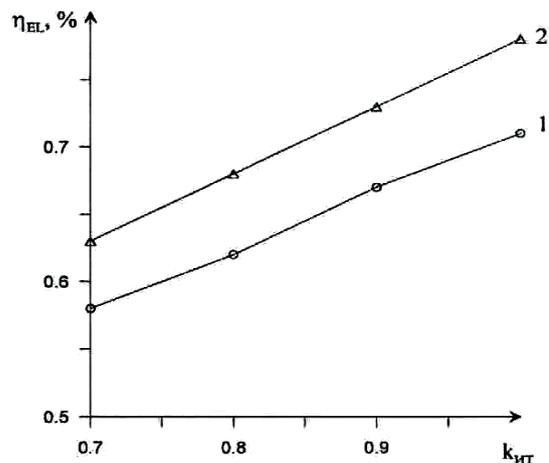


Рис. 6. Зависимость эффективного КПД гибридной энергетической установки от коэффициента использования топлива в ТОТЭ при автотермическом риформинге исходного топлива (этиловый спирт) в водород.
1 - эффективный КПД ТОТЭ 60%; 2 - эффективный КПД ТОТЭ 70%

КПД гибридной установки может быть еще более увеличен, если для реализации остаточного тепла электродных газов использовать паротурбинный цикл со сверхкритическими параметрами пара в паровом контуре. На рис. 7 представлена схема классического паротурбинного цикла Ренкина:

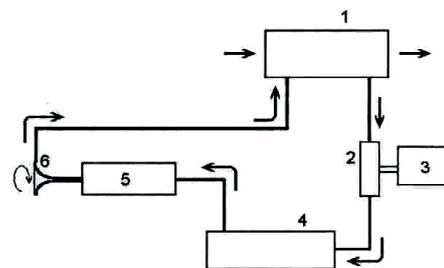


Рис. 7. Схема классического парового цикла Ренкина
1 - нагреватель; 2 - паровая турбина; 3 - электрогенератор; 4 - конденсатор; 5 - водяной холодильник; 6 - водяной насос

В этом цикле пар, поступающий из паровой турбины (2), конденсируется в конденсаторе (4) при постоянной температуре конденсации. При этом теплота конденсации составляет прямую потерю в цикле и не может быть передана пару высокого давления, который подается на турбину.

Если же во всем паровом контуре давление пара увеличить до давления выше критического, то процесса конденсации пара на выходе из турбины уже не будет. Пар, поступающий из турбины, будет плавно переходить в жидкость по мере понижения его температуры при охлаждении. В результате тепло, содержащееся в отработанном паре низкого давления, можно

передавать свежему пару высокого давления. Схема такого парового цикла представлена на рис. 8:

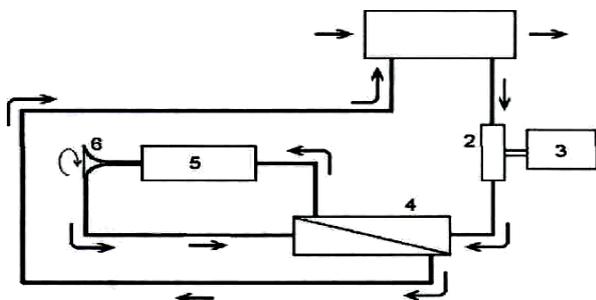


Рис. 8. Схема сверхкритического парового цикла
1 - нагреватель; 2 - паровая турбина; 3 - электрогенератор;
4 - теплообменник - регенератор; 5 - холодильник;
6 - насос холодного рабочего тела

В результате часть тепла, содержащаяся в паре низкого давления, прошедшем паровую турбину, может быть возвращена пару высокого давления, который еще не поступил на турбину, что приводит к возрастанию КПД паротурбинного цикла в целом.

Реализация такого цикла на воде затруднена тем, что критическое давление воды очень высоко - 22 МПа, но если в паротурбинном цикле для образования пара используются жидкости с небольшим критическим давлением, то при наличии высокоэффективного теплообменника-регенератора (4) достигается значительный прирост КПД. В работах [14, 15] показано, что при реализации «сверхкритического» цикла на двуокиси углерода КПД парового цикла может возрасти до 48%. При организации парового цикла на бутане, возможное повышение КПД превышает 50% [16].

Если предположить, что остаточное тепло электродных газов, поступающих от топливной батареи ТОТЭ, будет использоваться в «сверхкритическом» паротурбинном цикле, то при КПД батареи на уровне 70% и коэффициенте использования топлива в топливных элементах 90%, общий КПД гибридной энергетической установки может достигать 82%.

Достижение высоких КПД в рассматриваемой системе невозможно без минимизации утечек тепла во внешнюю среду. Этот вопрос особенно важен для ТОТЭ, которые работают при высокой температуре. Минимизировать утечки тепла можно, комбинируя возможности создания внешней высокоэффективной теплоизоляции с внутренней генерацией водорода и используемого топлива.

Внешние утечки тепла могут быть устранены с помощью фильтруемой теплоизоляции. Поскольку через обычную твердую теплоизоляцию, всегда идет небольшая утечка тепла, то, пропуская под небольшим повышенным давлением поток воздуха, омывающий отдельные волокна теплоизоляции, можно добиться полного устранения тепловых утечек [17]. При этом воздух, который воспринимает утекающее тепло, собирается во внутреннем коллекторе, откуда направляется на вход в основной компрессор. Поскольку воздух, омывающий теплоизоляцию, составляет небольшой процент от общего расхода воздуха, то подана части подогретого воздуха на вход компрессора не приводит к значительному увеличению адиабатической работы сжатия в компрессоре.

Выводы

1. Применение ТОТЭ, изготовленных по технологии тонких пленок, позволяет более чем на порядок увеличить удельную электрическую мощность, вырабатываемую батареей топливных элементов с единицы объема.
2. Высокая рабочая температура ТОТЭ позволяет объединить процессы генерации синтез-газа из жидкого топлива, с процессами генерации электрической энергии топливными элементами в одном блоке.
3. Совмещение батареи ТОТЭ с возможностями паротурбинной установки со сверхкритическими параметрами рабочего тела позволяет увеличить эффективный КПД гибридной энергетической установки до 80% и выше.

Литература

1. Моисеев И.И., Платэ И.А., Варфоломеев С.Д. Альтернативные источники органических топлив // Энергетика России: проблемы и перспективы / под ред. В.Е.Фортова, Ю.Г.Леонова - М.: Наука, 2006. - 499с.
2. Karl J., Frank N. and etc. Conversion of Syngas From Biomass in Solid Oxide Fuel Cell // Journal of Fuel Cell Science and Technology - 2009. - Vol 6, N2, 021005, p.5.
3. "Fuel Cell for Cogeneration" Hoogers G. // Journal "Cogeneration and On - Site Power Production", July - August, 2003, p.80 - 91.
4. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические установки - М.: изд. Московского энергетического института, 2005. - 278 с.
5. Suzuki T., Funahashi Y. and et's. "Development of Microtubular SOFCs" // Journal of Fuel Cell Science and Technology, August 2008, Vol. 5, 13 p.
6. Hashimoto S., Nishino H and et's. "Development of Evaluation Technologies for Microtubular SOFCs Under Pressurized Conditions" // Journal of Fuel Cell Science and Technology, August 2008, Vol 5, 5 p.
7. "Development of a Solid - Oxide Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid System Model for Aerospace Applications" / Freech J., Pratt J., Brouwer J. // Proceedings of ASME Turbo Expo 2004 "Power for Land, Sea and Air" June 2004, Vienna, Austria.
8. Результаты испытаний трубчатых твердооксидных топливных элементов с катодом на наружной поверхности и засыпным анодным токосъемом / Кулаев В.В., Чухарев В.Ф., Гречко М.В. и др. // В сб. «Твердооксидные топливные элементы», изд. РФЯЦ - ВНИИТФ, Снежинск, 2003. - С. 340 - 346.
9. "Performance Assessment of Turbocharged Pem Fuel Cell Systems for Civil Aircraft Onboard Power Production" / Campanari S., Manzolini G., Beretti A., Wollrab U // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, vol 130, 7 p.
10. Лукашенко И.Г., Борисов В.Н. О некоторых оценках ресурса работы твердооксидного топливного элемента, связанных с диффузией электродных покрытий в твердый электролит // В сб. «Твердооксидные топливные элементы», изд. РФЯЦ- ВНИИТФ, Снежинск, 2003. - С. 121-126.

11. Борисов В.Н. «Перспективы применения энергоустановок на топливных элементах в энергоснабжении» / В сб. «Твердооксидные топливные элементы», изд. РФЯЦ - ИИТФ, Снежинск, 2003. – С. 110 - 120.
12. Носач В.Г. Энергия топлива. - Киев: Наукова Думка, 1989. – 147 с.
13. Концепция развития горения и взрыва как области научно-технического прогресса / под ред. акад. А.Г. Мержанова // Черногловка, «Территория», 2001. – 176 с.
14. Thermodynamic Analysis of Part – Flow Cycle Supercritical CO2 Gas Turbines / Utamura M. // Proceedings of ASME Turbo - Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, GT 2008, June 2008, Berlin, Germany. GT 2008 - 50151.
15. A New Concept for High Temperature Fuel Cell Hybrid Systems Using Supercritical Carbon Dioxide / Sanchez D. and etc. // Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2009, Vol 6, N 2, 021306, p. 11.
16. An opportunity for Creation of Highly Effective Aviation Auxiliary Power Plants with Gas - Steam - Turbine Contour/ Yanovzkiy L.S., Baykov A.V. // ISABE-2007-1159.
17. Крылов А.Н. Повышение эффективности стекловаренных печей на основе комплексной регенерации тепловых отходов. Реферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук, М.: МЭИ, 2007.

УДК 62-50

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА САУК АГРЕГАТА ПОДАЧИ ВОДЫ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

С.Г. Валюхов

Доктор технических наук, профессор
Воронежский Государственный Технический
Университет
пр. Московский, 14, г. Воронеж, Россия, 394024

С.В. Ярославцев

Кандидат технических наук, доцент
ФГУП «Турбонасос»
ул. Острогжская, 107, г. Воронеж, Россия, 394052

В.А. Коваль

Доктор технических наук, старший научный сотрудник
Институт Проблем Машиностроения им. А.Н. Подгорного
Национальной Академии Наук Украины
ул. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046

Целью данной работы является формирование облика и синтез законов регулирования САУК давления воды «после себя» на переходных режимах работы, обеспечивающих их оптимизацию при заданных диапазонах уровней постоянных возмущений. Система автоматического регулирования представляет собой регулятор выхода. Проблемы построения наблюдателей в данной работе не затрагиваются

Ключевые слова: давление, регулятор, постоянные возмущения

The purpose of the given work is formation of shape and synthesis of laws of regulation SAUK of pressure of water «after itself» on the transitive operating modes providing their optimization at set ranges of levels of constant indignations. The system of automatic control represents a regulator of an output. Problems of construction of observers in the given work are not mentioned

Kew words: pressure, regulator, constant indignations

Одной из разработок предприятия ФГУП «Турбонасос» является система турбонасосной подачи (ТНП), используемая для питания водой паровых котлов. В своем составе ТНП содержит магистраль подачи пара к турбине ТНП и подачи воды к паровым котлам. В магистраль подачи пара производится регулирование рас-

хода с целью поддержание давления питающей котлы воды в заданном диапазоне (57...61 ата), при значениях расхода воды на котлы, давлениях и температурах магистралей пара, обусловленных технологическим циклом предприятия Заказчика (рис.1). Объект управления представляет собой турбонасосный агрегат с трубопро-