

DOI: 10.17516/1999-494X-0438

УДК 621.352

Overview of Design Diagrams for Solid Oxide Fuel Cell and Gas Turbine Hybrid Systems for Combined Heat and Power Generation

Antonina A. Filimonova*, Andrey A. Chichirov,
Natalia D. Chichirova and Alexander V. Pechenkin
*Kazan State Power Engineering University
Kazan, Russian Federation*

Received 20.10.2022, received in revised form 01.11.2022, accepted 08.11.2022

Abstract. The article presents a comprehensive review and classification of possible layout solutions for hybrid systems based on the integration of solid oxide fuel cells (SOFC) and gas turbines (GT). Most SOFC/GT hybrid systems use methane as a fuel due to its availability and ease of handling, unlike hydrogen. An important element of the plant design is the fuel processing subsystem. SOFC/GT systems direct part of the energy generated by the fuel cell to carry out the methane steam reforming process. Steam is produced in the anode compartment of the fuel cell, or alternatively in an external steam generator, using the heat from the gases leaving the fuel cell. Most of the designs of hybrid SOFC/GT systems presented in the literature are pressurized, the installations in them are hermetically connected, which makes it possible to achieve high and ultra-high energy efficiency with relatively low capital costs. In atmospheric hybrid systems, the units are connected via a system of heat exchangers, which makes them independent and easier to control. The article also explores more complex SOFC/GT configurations using an organic Rankine cycle, multiple fuel cells and gas turbines, with a steam turbine, a cooling system, etc. The design and nature of the relationship between the components of a hybrid system have a significant impact on achieving performance targets based on numerical simulation of the proposed circuit solutions.

Keywords: solid oxide fuel cell, gas turbine, hybrid plant, hydrogen energy.

Acknowledgements. The results were obtained with the financial support of the Ministry of Education and Science “Study of processes in a hybrid power plant fuel cell-gas turbine” (project code: FZSW-2022–0001).

Citation: Filimonova, A.A., Chichirov, A.A., Chichirova, N.D., Pechenkin, A. V. Overview of design diagrams for solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid systems for combined heat and power generation. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2022, 15(7), 812–834. DOI: 10.17516/1999-494X-0438

Обзор проектных схем гибридных систем с твердооксидным топливным элементом и газовой турбиной для комбинированного производства тепла и электроэнергии

А. А. Филимонова, А. А. Чичиров,
Н. Д. Чичирова, А. В. Печенкин

*Казанский государственный энергетический университет
Российская Федерация, Казань*

Аннотация. В статье представлен всесторонний обзор и классификация возможных компоновочных решений гибридных систем на основе интеграции твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) и газовых турбин (ГТ). Большинство гибридных систем ТОТЭ/ГТ используют в качестве топлива метан в связи с его доступностью и простотой в обращении в отличие от водорода. Важным элементом конструкции установки является подсистема переработки топлива. Системы ТОТЭ/ГТ направляют часть энергии, вырабатываемой топливным элементом, для осуществления процесса парового риформинга метана. Пар производится в анодном отсеке топливного элемента либо альтернативно во внешнем парогенераторе с использованием тепла выходящих с топливного элемента газов. Большинство проектов гибридных систем ТОТЭ/ГТ, представленных в литературе, работают под давлением, установки в них связаны герметично, что позволяет достичь высокой и сверхвысокой энергоэффективности с относительно низкими капитальными затратами. В гибридных системах с атмосферным давлением установки связаны с помощью системы теплообменников, что обеспечивает их независимость и более простой процесс управления. В статье также исследуются более сложные конфигурации ТОТЭ/ГТ с использованием органического цикла Ренкина, с несколькими топливными элементами и газовыми турбинами, с паровой турбиной, системой охлаждения и др. Устройство и характер взаимосвязей между компонентами гибридной системы оказывают значительное влияние на достижения целевых показателей эффективности по результатам численного моделирования предлагаемых схемных решений.

Ключевые слова: твердооксидный топливный элемент, газовая турбина, гибридная установка, водородная энергетика.

Благодарности. Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки «Изучение процессов в гибридной энергетической установке топливный элемент-газовая турбина» (шифр проекта: FZSW-2022–0001).

Цитирование: Филимонова А. А. Обзор проектных схем гибридных систем с твердооксидным топливным элементом и газовой турбиной для комбинированного производства тепла и электроэнергии / А. А. Филимонова, А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, А. В. Печенкин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(7). С. 812–834. DOI: 10.17516/1999-494X-0438

Введение. Одной из основных целей исследований в области энергетики является разработка новых технологий, позволяющих достичь высокой энергоэффективности при минимальном воздействии на окружающую среду. Эта цель может быть достигнута путем одновременного развития возобновляемых источников энергии и высокоэффективных устройств преобразования энергии. Политика многих стран акцентирована на использовании возобновляемых источников энергии (солнечной, ветровой, гидроэнергетики и т.д.). В настоящее время коммерчески доступны высокоэффективные системы преобразования энергии с использованием ископаемого топлива,

такие как: комбинированные циклы, технология улавливания углерода, комбинированные циклы комплексной газификации и электростанции на топливных элементах.

Среди инновационных технологий топливные элементы считаются одной из наиболее перспективных систем преобразования энергии. Водородное топливо перерабатывается в них электрохимически без сгорания, что приводит к сверхвысокой электрической эффективности [1]. Установки с топливными элементами привлекают своей модульностью, которая позволяет собирать системы разного масштаба от 1 кВт более 10 МВт [2]. Наконец, стоит отметить, что электрохимическая реакция является высокоэкзотермической, выделяя значительное количество тепла, которое может быть выгодно использовано для целей когенерации (отопление помещений, производство горячей воды, централизованного отопления, производство пара и т.д.) [2–4]. Выходящие горячие газы высокотемпературных топливных элементов могут использоваться в термодинамических циклах (цикл Ренкина, цикл Брайтона и др.). При этом общий КПД гибридного цикла теоретически может быть выше 70 %. В частности, твердооксидные топливные элементы являются наиболее привлекательной технологией для возможной гибридизации системы, поскольку их рабочая температура достигает 1000 °С, что позволяет предложить множество вариантов гибридных силовых установок [5–10]. Показана целесообразность применения энергоустановок на основе топливных элементов в системах собственных нужд тепловых газомазутных и газовых электростанций. При этом может быть реализована замена части сетевых подогревателей ТЭС подогревателями с использованием тепла продуктов реакций гибридной энергоустановки и параллельной работы по производству электроэнергии ТЭС с циклом Ренкина и гибридной энергоустановки с экономией топлива [11].

Обзор литературы. Основная идея гибридного цикла твердооксидный топливный элемент/газовая турбина (ТОТЭ/ГТ) очень проста. В цикле Брайтона камера сгорания может быть заменена ТОТЭ, который одновременно подает горячие газы в ГТ и производит электричество. Базируясь на этой идее, было предложено множество альтернативных конфигураций гибридных систем ТОТЭ/ГТ [2, 5–10], направленных на повышение электрической эффективности и/или снижение капитальных затрат.

Выбор компоновки установки ТОТЭ/ГТ зависит от нескольких проектных параметров, таких как рабочая температура и давление в ТОТЭ, вид топлива и особенности подсистемы переработки топлива (паровой риформинг: внутренний/внешний, прямой/косвенный; частичное окисление, аутотермический риформинг и др.), производство пара, необходимого для процесса риформинга: рециркуляция анодных выхлопных газов или внешний парогенератор, тип цикла Брайтона: основной, с промежуточным охлаждением и/или повторным нагревом и др.

Основополагающим элементом конструкции гибридной энергоустановки является твердооксидный топливный элемент. ТОТЭ долгое время рассматривались как одна из наиболее перспективных технологий преобразования энергии. Главной особенностью данного устройства является работа при высоких рабочих температурах, демонстрирующая сверхвысокую электрическую и тепловую эффективность независимо от размеров системы. Основными типами используемых ТОТЭ являются трубчатые, микротрубчатые и плоские [2]. Особенности указанных конструкций представлены в табл. 1.

1. Устройство системы риформинга (внешний, внутренний)

Обычно исследуемые гибридные циклы ТОТЭ/ГТ питаются природным газом, который реформируется внутри ТОТЭ. Механизм внутреннего риформинга (ВР) позволяет значительно снизить капитальные затраты системы, поскольку для преобразования углеводородов в водород не требуется внешняя подсистема переработки топлива.

В механизме внутреннего реформирования используются две возможные конфигурации. Прямой внутренний риформинг (ПВР), где топливо (природный газ) превращается в богатую водородом смесь непосредственно внутри анодного отсека топливного элемента. Такая конфигурация позволяет добиться простоты системы и снижения капитальных затрат. С другой стороны, следует учитывать, что в конфигурации ПВР анодный отсек должен быть оснащен катализатором для реакции парового риформинга метана, существует высокий риск осаждения углерода, тепловой баланс топливного элемента является более сложным, поскольку реакция парового риформинга метана (эндотермическая) очень быстрая и значительно охлаждает начальные участки топливного элемента, определяя большие градиенты температуры внутри ТОТЭ. Эти проблемы можно частично разрешить с помощью механизма косвенного внутреннего риформинга (КВР), где реакции парового риформинга метана происходят в отсеке, отделенном анодной стороной топливного элемента, который получает от топливного элемента тепло, необходимое для поддержки эндотермической реакции парового риформинга метана. Поэтому в данном случае существует только тепловая связь между риформером и ТОТЭ. Очевидно, что конфигурация КВР приводит к более высокой сложности системы и более высоким капитальным затратам [2].

Большинство исследований сосредоточено на внутреннем риформинге в гибридных циклах ТОТЭ/ГТ из-за ожидаемой высокой эффективности и низких капитальных затрат. Большинство систем, оснащенных внешними реформаторами, обычно используют сложные виды топлива (биогаз, синтез-газ, органические жидкости и т.д.), которые не могут быть безопасно поданы непосредственно в ТОТЭ [12].

Интересное сравнение между установками ТОТЭ/ГТ с внутренним и внешним риформингом было представлено в [13]. Авторы исследовали две электростанции, оснащенные устройствами рециркуляции анодных газов. В первом случае (а) рассматривается схема с внутренним риформингом. Во втором случае (б) риформинг отделяется и нагревается теплообменником катодными выхлопными газами ТОТЭ (рис. 1). В первом случае КПД колеблется от 42 до 70 % в зависимости от изменения температуры ТОТЭ и температуры на входе в газовую турбину (ТВТ). В этом же диапазоне КПД системы с внешним риформингом колеблется от 32 до 60 %. Авторы пришли к выводу, что внешнее устройство риформинга имеет более сложное управление тепловыми режимами, требующее дополнительных количеств топлива для достижения желаемых температур ТОТЭ и ТВТ и поддержания разницы температур ТОТЭ в приемлемом диапазоне.

2. Парогенератор или рециркуляция анодных выхлопных газов

Внутренний процесс парового риформинга метана осуществляется паром. Пар можно получать с использованием деминерализованной воды под давлением во внешнем парогенераторе, приводимом в действие системными выхлопными газами. Также определенное количество пара производится ТОТЭ внутри в анодном отсеке в результате электрохимического процесса.

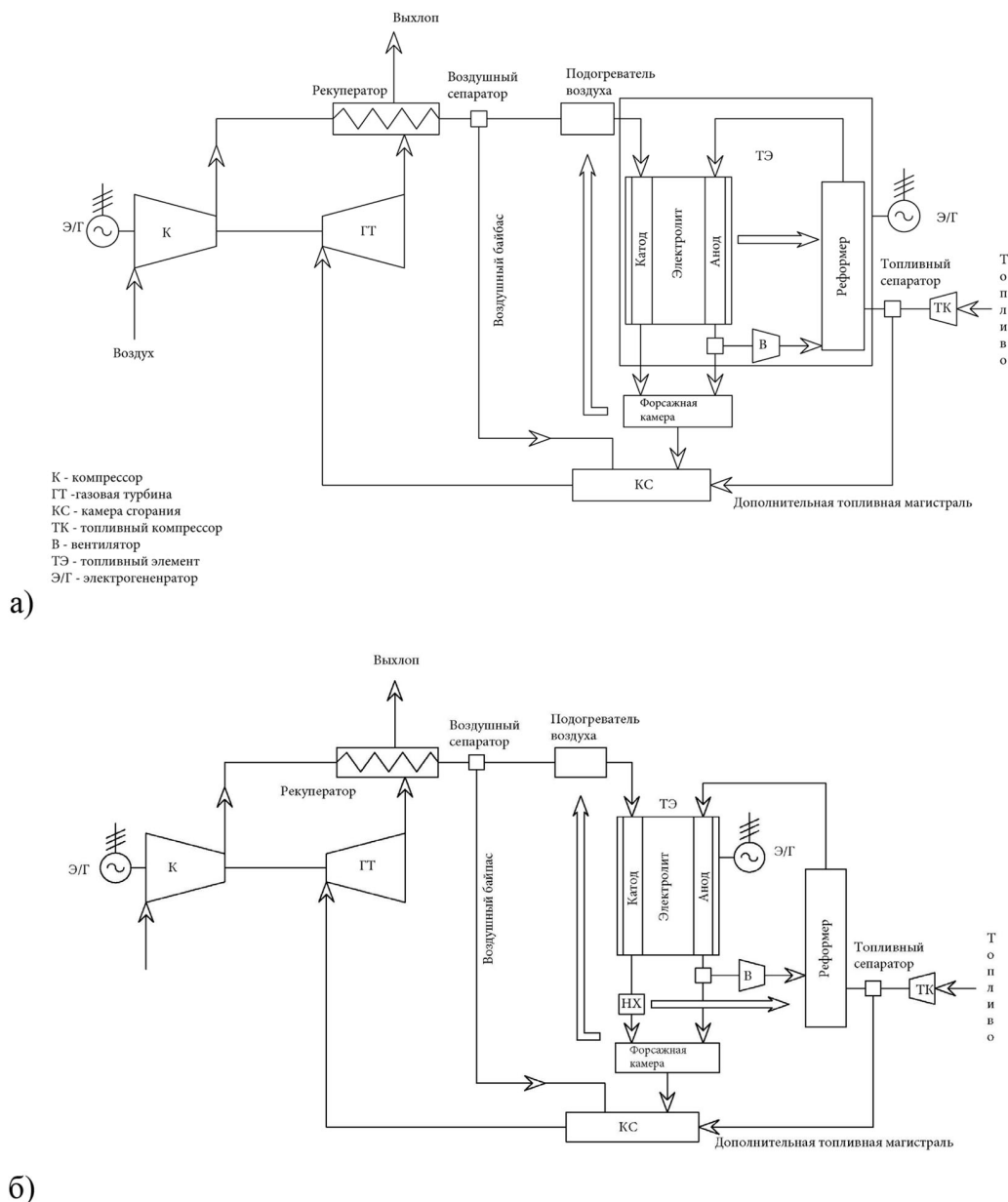


Рис. 1. Электростанции ТОТЭ/ГТ: внутренний (а) и внешний риформинг (б)

Fig. 1. SOFC/GT power plants: internal (a) and external reforming (b)

Поэтому возможной альтернативой внешнему парогенератору является рециркуляция (с помощью эжектора или высокотемпературных вентиляторов) анодных выхлопных газов в подсистему переработки топлива. Эта конфигурация, впервые предложенная Siemens Westinghouse, является наиболее распространенной из-за присущей ей простоты. Фактически схема рециркуляции анодных выхлопных газов обычно позволяет снизить капитальные затраты на систему (внешний парогенератор не требуется), а также обеспечивает высокую эффективность преобразования. С другой стороны, конфигурация с внешним парогенератором позволяет легче

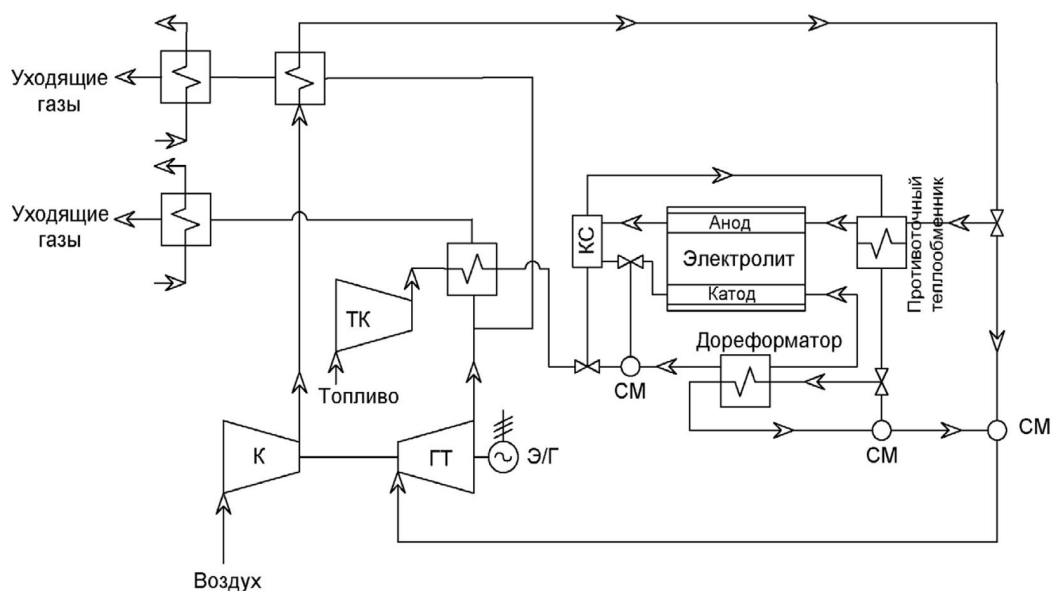


Рис. 2. Гибридная система ТОТЭ/ГТ: внутренний риформинг и рециркуляция анодных выхлопных газов, прямой внутренний риформинг

Fig. 2. Hybrid SOFC/GT system: internal reforming and anode exhaust gas recirculation, direct internal reforming

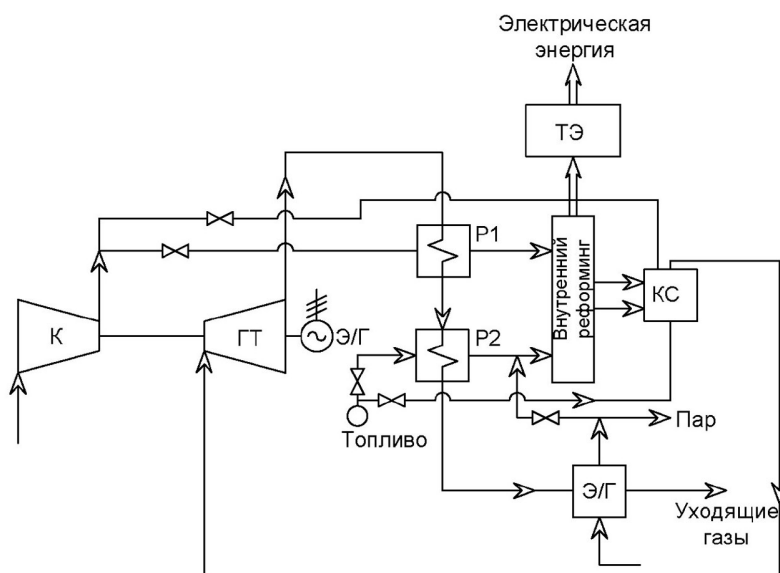
управлять системой, поскольку количество производимого пара можно контролировать, а также позволяет осуществлять возможное дальнейшее использование пара в системе (циклы Ченга, Ренкина) и/или в тепловых целях [2].

Calise et al. представили простую схему электростанции ТОТЭ/ГТ с прямым внутренним риформингом (ПВР) с анодной рециркуляцией газов [14] (рис. 2). Метан сначала предварительно реформируется, а затем реформируется непосредственно в анодном отсеке топливного элемента. Система также оснащена теплообменниками когенеративного назначения (ТО3 и ТО4). Рабочие значения коэффициента использования топлива были установлены на уровне 0,85. Авторы этого исследования рассчитали чистую суммарную мощность 1,5 МВт и электрический КПД 67,9 %.

Репрезентативная компоновка гибридной электростанции ТОТЭ/ГТ с прямым внутренним риформингом, оснащенной внешним парогенератором, была представлена в [15] (рис. 3). Выхлопные газы используются во внешнем парогенераторе для производства пара, необходимого для поддержки процесса парового риформинга метана, происходящего в ТОТЭ. Авторы этого исследования рассмотрели гибридную установку ТОТЭ/ГТ мощностью 1,3 МВт. Рабочие температуры ТОТЭ и ТВТ были установлены на уровне 1000 °С и 1200 °С соответственно. Коэффициент давления и коэффициент использования топлива – на уровне 5,0 и 0,85. Авторы рассчитали электрический КПД 61,9 %, тогда как глобальный КПД (электрический + тепловой) составил 86,4 %.

3. Давление системы (атмосферное, повышенное)

Выбор рабочего давления топливного элемента существенно влияет на эффективность и надежность системы. Эксплуатация топливного элемента при атмосферном давлении харак-



P - рекуператор

Рис. 3. Гибридная система ТОТЭ/ГТ: внутренний реформинг, внешний парогенератор

Fig. 3. Hybrid SOFC/GT system: internal reformer, external steam generator

теризуется простотой и надежностью системы. В этом случае работа ТОТЭ полностью независима от газовой турбины и связана с ней теплообменником. Это позволяет добиться безопасной и надежной работы как для топливного элемента, так и для ГТ. В частности, ГТ может работать в номинальном режиме, так как вспомогательная камера сгорания подает дополнительное тепло в воздух, выходящий из теплообменника ТОТЭ, с целью поддержания стабильного значения температуры на входе турбины (ТВТ). С другой стороны, такая конфигурация, как ожидается, позволит добиться более низкой электрической эффективности по отношению к герметичной (под давлением). Эффективность как ТОТЭ, так и ГТ будет снижаться в случае конфигураций с атмосферным давлением: напряжение и, следовательно, эффективность ТОТЭ значительно увеличивается с рабочим давлением, как ясно из уравнения Нернста. Кроме того, теплообмен между выхлопными газами ТОТЭ и воздухом, поступающим в турбину, вызывает более низкий ТВТ по отношению к конфигурации под давлением, где выхлопные газы ТОТЭ непосредственно расширяются в газовой турбине. Поэтому для электрической эффективности конфигурация под давлением является лучшим выбором. В такой конфигурации стек ТОТЭ выступает в качестве камеры сгорания цикла Брайтона, производя также дополнительное количество электроэнергии. Также ожидается, что такая конфигурация будет дешевле атмосферной, так как дорогостоящий теплообменник не нужен. С другой стороны, тестовые испытания показали, что герметичный цикл (под давлением) ТОТЭ/ГТ очень сложен. Фактически область эксплуатации обычной электростанции с ГТ с точки зрения давления и массового расхода

очень ограничена из-за внутренних особенностей турбин. Использование стека ТОТЭ, а не камеры сгорания еще больше ограничивает область эксплуатации систем ТОТЭ/ГТ.

Наиболее распространенная гибридная конфигурация ТОТЭ/ГТ основана на интеграции ТОТЭ под давлением в цикл Брайтона. Рекуператор используется для предварительного нагрева воздуха, поступающего в ТОТЭ с помощью выхлопных газов. Наружный воздух сжимается примерно до рабочего давления ТОТЭ.

Упрощенная компоновка цикла ТОТЭ/ГТ Брайтона показана на рис. 4. Наружный воздух (точка состояния 1) сжимается примерно до рабочего давления ТОТЭ (точка состояния 2). Затем воздух предварительно нагревается рекуперативным теплообменником вплоть до точки состояния 3 и поступает в катодный отсек ТОТЭ, где участвует в электрохимической реакции. С другой стороны, топливный газ сжимается до рабочего давления ТОТЭ топливным компрессором. Затем, после возможного предварительного нагрева, топливный газ поступает в анодный отсек топливного элемента. Здесь он сначала преобразуется в H_2 и впоследствии участвует в электрохимической реакции, вырабатывая электричество. Непрореагировавшее топливо и катодный отработанный воздух сжигаются в камере сгорания, повышая температуру на выходе (точка состояния 5). Выходной поток расширяется в газовой турбине, приводя в движение одновременно воздушный компрессор и электрический генератор и производя дополнительную мощность. Выхлопные газы турбины (точка состояния 6) используются для предварительного нагрева воздуха в рекуперативном теплообменнике. Наконец (точка состояния 7), выхлопные газы ГТ доступны для когенеративных целей [16].

Данная конфигурация системы привлекательна своей высокой электрической эффективностью и возможностью значительно продлить срок службы ТОТЭ в сравнении с ТОТЭ в моноварианте. На конструкцию этого типа гибридного цикла ТОТЭ/ГТ влияет ряд термодинамических параметров. Самым важным является коэффициент давления турбин, напрямую влияющий на рабочую температуру ТОТЭ. Расчетная рабочая температура ТОТЭ также существенно влияет на эффективность подсистем ТОТЭ и ГТ. Кроме того, значение

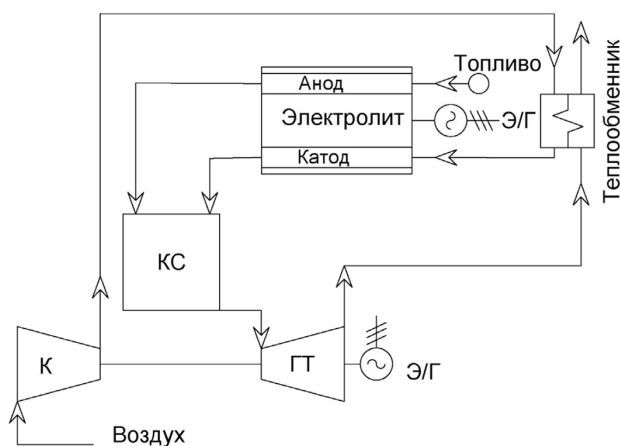


Рис. 4. Гибридный цикл ТОТЭ/ГТ Брайтона

Fig. 4: Brighton Hybrid SOFC/GT cycle

должны быть реализованы специальные меры, такие как байпас воздуха и дополнительная подача топлива.

Расчетная электрическая эффективность составила 64,6 и 71,9 % соответственно для атмосферных и герметичных систем. Этот результат согласуется с другими выводами, имеющимися в литературе, показывающими, что расположение системы под давлением всегда приводит к более высокой эффективности, хотя необходимо учитывать более высокую сложность системы.

В конфигурации под давлением предварительный нагрев воздуха не требуется. Фактически сжатие воздуха при давлении более 20 атм уже производит относительно горячий газ (около 500 °С). Кроме того, рециркуляция катодных газов повышает температуру воздуха, выходящего из компрессора. В атмосферной установке худшим компонентом цикла является воздушный теплообменник, за которым следует дожигатель (где осуществляется сжигание анодного топлива), который представляет эффективность эксергии около 60 %. На установке под давлением достигается снижение скорости разрушения эксергии примерно на 20 %. Именно системы, работающие под давлением будут востребованы в будущем в качестве сверхэффективных установок, которые преобразуют природный газ в электричество.

Компоновка ТОТЭ/ГТ с атмосферным давлением может существенно различаться в зависимости от типа ТОТЭ, сети теплообменников, типа процесса риформинга и т.д. Один из этих альтернативных макетов был представлен в [18], где оценивалась возможность использования выхлопных газов ГТ в качестве катодного входного потока для топливного элемента. Обычно в системе ТОТЭ/ГТ с атмосферным давлением турбина работает с воздухом, а не с выхлопными газами процесса сгорания, как это происходит в цикле Брайтона. На основе этой идеи авторы разработали макет системы, показанный на рис. 6. Цикл Брайтона питается теплом, которое обеспечивается выхлопными газами ТОТЭ с атмосферным давлением. Поток, выходя-

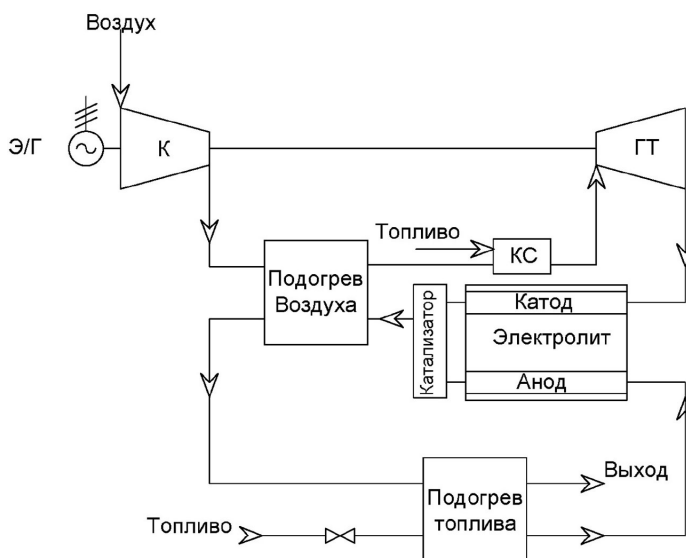


Рис. 6. Цикл ТОТЭ/ГТ с атмосферным давлением: альтернативная компоновка

Fig. 6. Atmospheric pressure SOFC/GT cycle: alternative layout

щий из теплообменника, впоследствии используется для предварительного нагрева топлива, поступающего в топливный элемент. В этом случае теплообменник, используемый для катодного предварительного нагрева воздуха, не требуется. Фактически катодный поток поступает непосредственно из выходного отверстия ГТ, поэтому он достаточно горячий и никакого дальнейшего предварительного нагрева не требуется.

Динамическое управление температурным режимом системы может осуществляться с помощью вспомогательной камеры сгорания высокого давления или катодным байпасом (не показан на рисунке). ТОТЭ работает при температуре около 750 °С с коэффициентом использования топлива 85 %. Общая мощность системы составляет 350 кВт, а максимальный расчетный КПД составляет 66 %. Это значение выше, чем для других аналогичных атмосферных систем ТОТЭ/ГТ и сопоставимо с показателями, достигаемыми гибридными системами ТОТЭ/ГТ под давлением.

4. Гибридный ТОТЭ/ГТ с рециркуляцией воздуха или рециркуляцией выхлопных газов

Тепловая конструкция гибридной системы ТОТЭ/ГТ под давлением с прямой связью сложна в управлении из-за различных ограничений, касающихся ТОТЭ с точки зрения рабочей температуры и температурных градиентов. В связи с высокой рабочей температурой топливного элемента входной катодный поток должен быть достаточно горячим, чтобы избежать чрезмерных перепадов температуры внутри ТОТЭ, которые могут создать серьезные сбои систем. Рекуператор воздуха часто используется для предварительного нагрева входного потока горячими выхлопными газами. Однако в некоторых случаях этого рекуператора может быть недостаточно, особенно при высоком коэффициенте давления. Температура на выходе ГТ может быть слишком низкой для предварительного нагрева входящего в топливный элемент воздуха, тогда необходимо использовать дополнительные устройства.

Предлагается использование рекуперативного теплообменника (РТО), который предварительно нагревает воздух, поступающий в катодный отсек топливного элемента, используя выхлопные газы из камеры сгорания. Такая конфигурация сильно отличается от распространенных, поскольку в большинстве компоновок ТОТЭ/ГТ, доступных в литературе, этот рекуперативный воздушный теплообменник снабжается выхлопными газами ГТ. Очевидно, что температура выхлопных газов сгорания выше, чем температура выхлопных газов ГТ, что позволяет лучше прогревать воздух, поступающий в топливный элемент. С другой стороны, необходимо учитывать, что такая конфигурация определяет уменьшение ТВТ, поскольку выходной поток камеры сгорания охлаждается в РТО перед входом в ГТ. Это обстоятельство может серьезно повлиять на эффективность турбины. Второй альтернативный подход основан на методе рециркуляции выхлопных газов (РВГ), где часть выходного потока камеры сгорания рециркулирует на вход катода, обеспечивая повышение температуры.

Всестороннее сравнение методов РТО и РВГ было представлено Zhang et al. [19]. Авторы данной работы сравнили две гибридные системы ТОТЭ/ГТ. Система РТО оснащена двумя рекуперативными воздушными теплообменниками, ТО2 и ТО3, соответственно вниз и вверх по течению по отношению к ГТ (рис. 7). Вторая компоновка системы РВГ оснащена высокотемпературным газовым вентилятором, который направляет выходные газы камеры сгорания

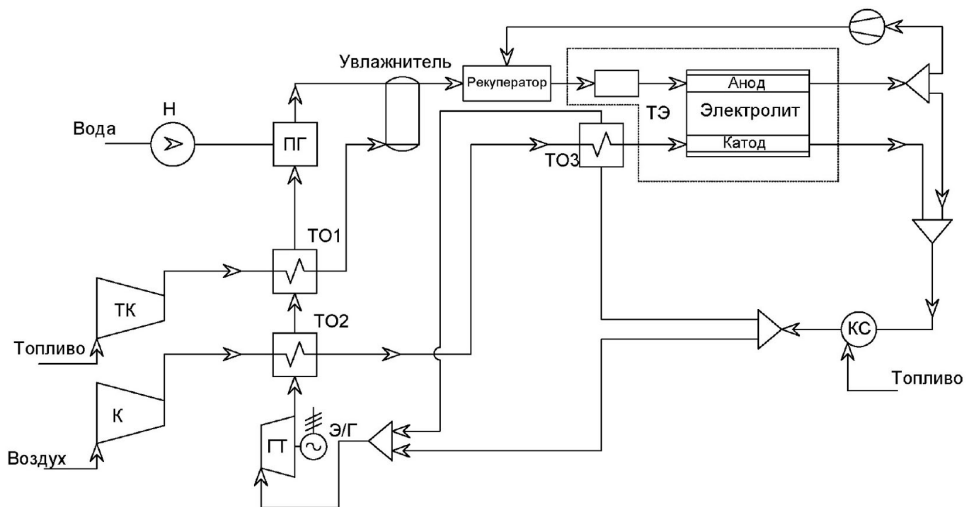


Рис. 7. ТОТЭ/ГТ с рекуперативным теплообменником (РТО)

Fig. 7. SOFC/GT with regenerative heat exchanger (RHE)

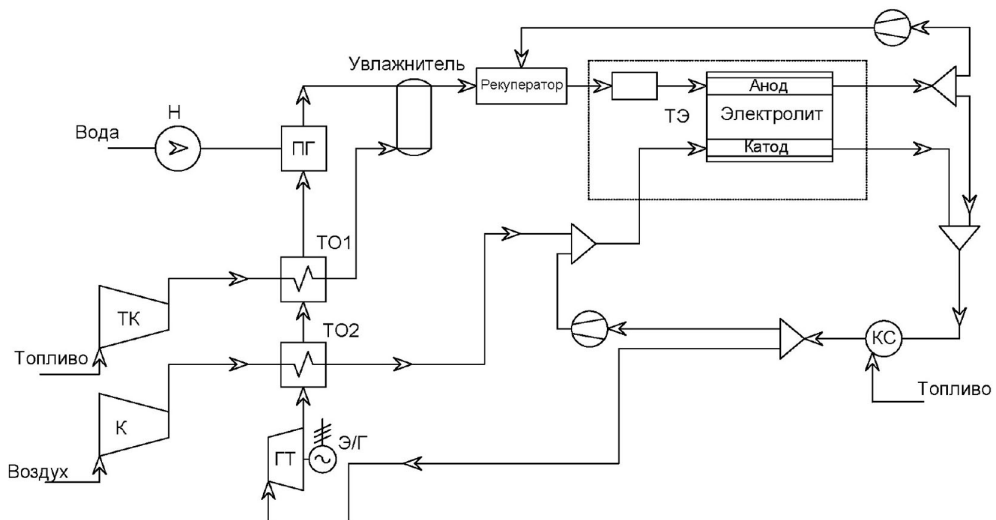


Рис. 8. ТОТЭ/ГТ с рециркуляцией выхлопных газов (РВГ)

Fig. 8. SOFC/GT with exhaust gas recirculation (EGR)

в смеситель, размещенный выше по течению к входу катода, смешивая этот поток с воздухом, выходящим из рекуператора ТО2 (рис. 8). Авторы исследования рассчитывали коэффициент использования топлива 0,85, отношение давления 5,2. ТВТ составлял 1300 К и 1400 К, соответственно в случае РТО и РВГ. Результаты расчета в обеих конфигурациях показали, что электрическая эффективность ТОТЭ очень похожа. И наоборот, в конфигурации РТО производительность ГТ снижается в результате снижения ТВТ. Таким образом, чистый электрический КПД конфигурации РВГ значительно выше, чем у системы РТО. Например, при 4,0 кА/м² эффективность конфигураций РВГ и РТО составляет 66,5 и 62,6 % соответственно.

5. Цикл утилизации тепла (цикл Брайтона, цикл Ренкина, цикл Брайтона-Ренкина, органический цикл Ренкина, цикл Калина, сверхкритический цикл Брайтона с углекислым газом, тригенерация)

Гибридные циклы ТОТЭ/ГТ-цикл Ренкина

Большинство исследований гибридных установок ТОТЭ/ГТ показывают, что температура потока выхлопных газов достаточно высока для включения дополнительного термодинамического цикла. Как следствие, определенное число исследователей сосредоточилось на возможности интеграции ТОТЭ, ГТ, паровой турбины (ПТ), chillера, солнечных коллекторов, электролизеров, опреснительных установок и др. установок в единый комбинированный цикл, показывающий сверхвысокую эффективность [20–22].

Такая возможность была исследована Arsalis et al. [24]. ТОТЭ представлен трубчатой конфигурацией Siemens, оснащенной предреформатором и рециркуляцией анодных выхлопных газов (рис. 9). Рассматривались три различные электрические мощности установки: 1,5 МВт_э, 5 МВт_э и 10 МВт_э. Авторы пришли к выводу, что гибридная конфигурация ТОТЭ/ГТ/ПТ может быть использована для сверхэффективного производства электроэнергии. Например, установка 10 МВт_э демонстрирует максимальный КПД – 73,7 %, средний КПД – 65,3 % и общий КПД – 68,4 %. Для системы мощностью 1,5 МВт_э цикл ТОТЭ/ГТ–ПТ не так привлекателен и эффективен, как 5 МВт_э или 10 МВт_э, потому что газовая турбина и особенно паровая турбина малоэффективны при небольших размерах, что приводит к снижению общей эффективности системы.

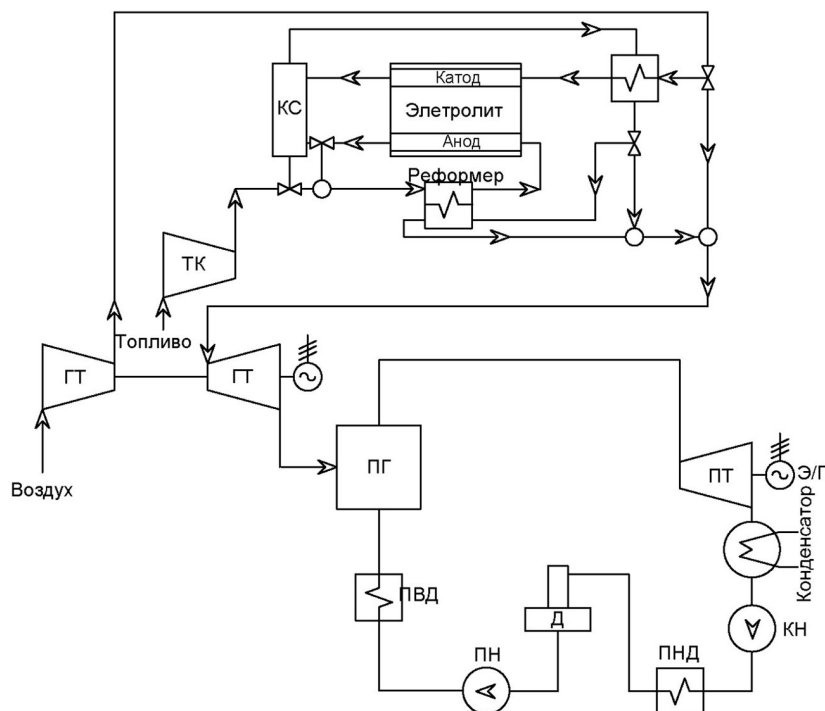


Рис. 9. Комбинированный цикл ТОТЭ/ГТ/ПТ

Fig. 9. Combined SOFC/GT/PT cycle

Гибридные циклы ТОТЭ/ГТ/ПТ с нетрадиционными рабочими телами

В последние годы предлагаются инновационные системы гибридных установок с ТОТЭ, основанные на замене традиционно использующихся теплоносителей в энергетических установках, например, цикл Калина с использованием водного раствора аммиака в паровой турбине, углекислого газа в газовой турбине [25, 26].

Когда рабочая температура топливного элемента ниже $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, газовые турбины фактически не могут быть использованы, поскольку их эффективность и мощность резко чувствительны к снижению температуры на входе в турбину (ГВТ). В таких случаях возможно задействовать циклы Ренкина. Общие циклы Ренкина применяют воду в качестве рабочей жидкости. Однако при низкой температуре источника тепла вода может не подойти в качестве теплоносителя. В таких случаях предлагается использовать органические теплоносители, т.е. осуществлять органические циклы Ренкина (ОЦР).

Pierobon et al. [27] смоделировали гибридную установку ТОТЭ-ОЦР мощностью 100 кВт в сочетании с системой газификации. ТОТЭ подпитывается синтез-газом, полученным путем газификации древесной щепы в газификаторе с фиксированным слоем (рис. 10). Мокрые щепы с влажностью 33,2 % поставляются на двухступенчатую установку газификации для производства древесного газа. Очищенный древесный газ затем предварительно нагревается в те-

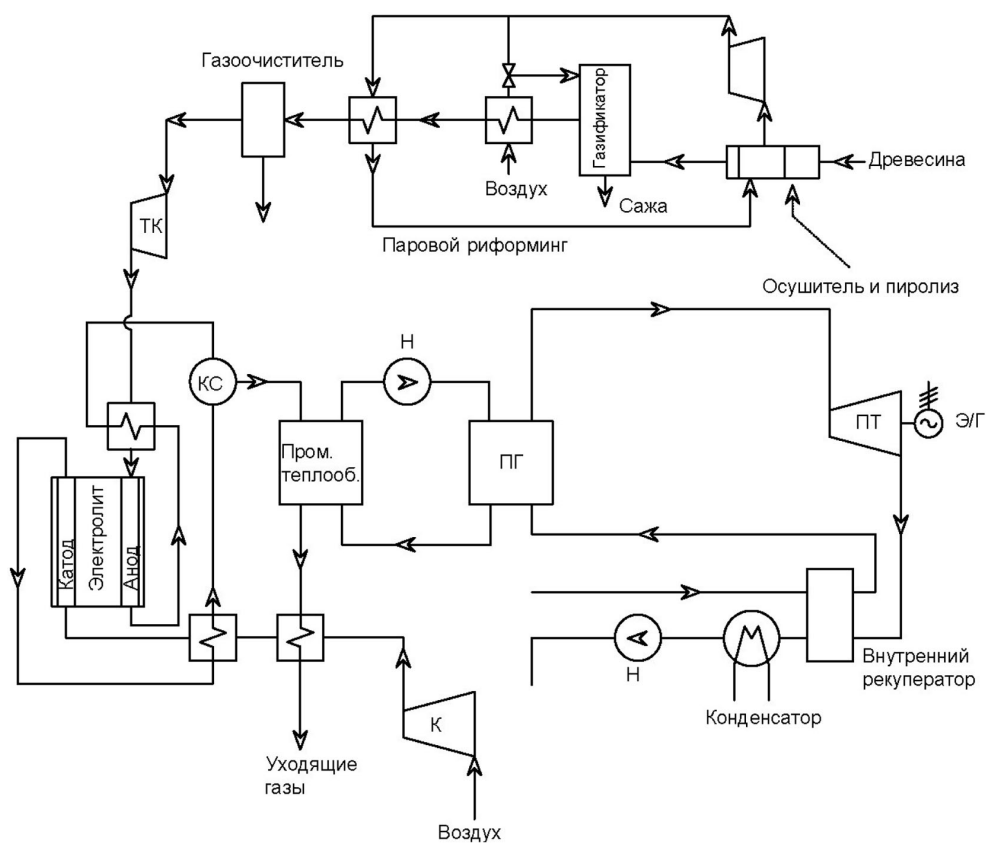


Рис. 10. Компоновка системы ТОТЭ–ОЦР на синтез-газе

Fig. 10. Layout of the SOFC–OCR system on synthesis gas

плообменнике (анодный преднагреватель) до 650 °С перед поступлением на анодную сторону ТОТЭ, который работает при 780 °С. Нерактивированное топливо ТОТЭ сжигается в форсажной камере. Затем отходящие газы из горелки направляются в промежуточный теплообменник, где диатермическое масло подает тепло в подсистему ОЦР. Цикл ОЦР также оснащен внутренним рекуператором.

По результатам исследования газификация и ОЦР могут потенциально увеличить производительность системы на 26,4 % по сравнению с ТОТЭ/ГТ. Максимальный КПД 62,9 % можно получить, увеличив коэффициент использования ТОТЭ до 0,9 и уменьшив его плотность тока до 100 А/мм². Снижение рабочей температуры топливных элементов до 650 °С снижает эффективность установки до 55,3 %. Авторы также провели анализ чувствительности в отношении выбора лучшей рабочей жидкости для ОЦР, показав необходимость применения жидкости с высокой критической температурой для достижения высокой тепловой эффективности. Оптимальной жидкостью, по данным авторов, с точки зрения производительности системы является пропициклогексан при давлении 15,9 атм.

Ozcan и Dincer [28] представили гибридную компоновку системы тригенерации на основе ТОТЭ, ОЦР, солнечных коллекторов и абсорбционного чиллера (охладителя). Система тригенерации состоит из твердооксидного топливного элемента трубчатого типа с внутренним риформингом, который работает под атмосферным давлением, камеры сгорания и воздушного теплообменника, установки рекуперации тепла и генерации пара, двухступенчатого органического цикла Ренкина, приводимого в действие выхлопными газами ТОТЭ, параболического желоба солнечных коллекторов, цикла абсорбционного чиллера из бромида лития, приводимого в действие выхлопными газами от установки ТОТЭ (рис. 11). Система питается синтез-газом, полученным путем газификации биомассы, состоящим из 21 % CH₄, 18 % CO₂ и 40 %

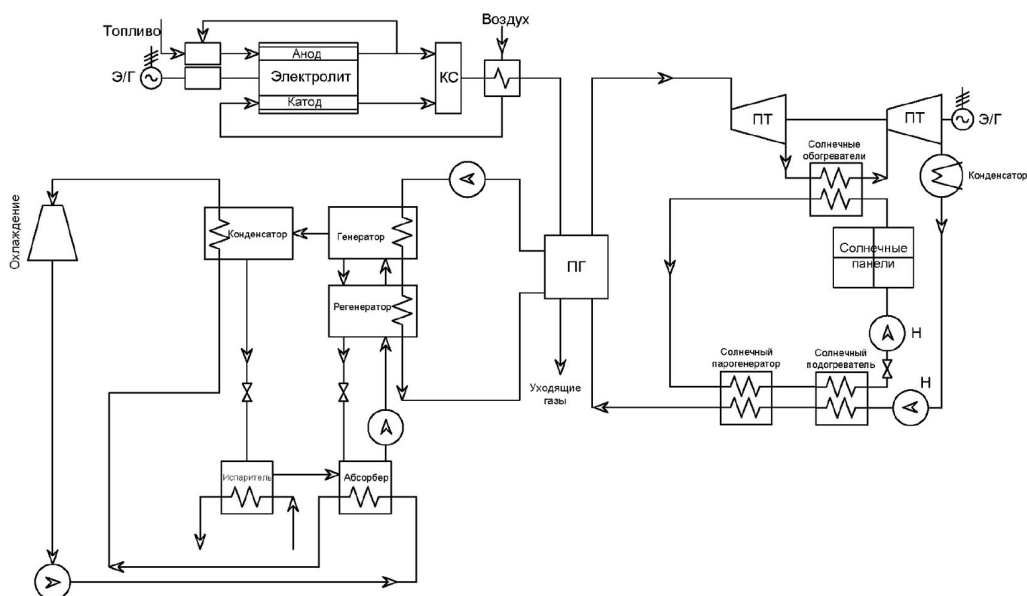


Рис. 11. Компоновка гибридной системы ТОТЭ-ОЦР-солнечные панели-абсорбционный чиллер

Fig. 11. Layout of the hybrid SOFC-OCR-solar panels-absorption chiller system

H_2 . Внутренний риформинг ТОТЭ происходит с рециркуляцией анодных выхлопных газов для проведения реакций парового риформинга. Тепло выхлопных газов ТОТЭ может использоваться для привода абсорбционного chillera и подсистемы ОЦР. ОЦР работает с использованием R 245fa в качестве жидкости. ОЦР разделен на две стадии с возможностью использования солнечного тепла для турбины низкого давления. Солнечное тепло также используется для предварительного нагрева органической жидкости, поступающей во внешний парогенератор. Тепло, отводимое конденсатором, рекупируется для нагрева воды в жилых помещениях. Результаты показали, что общая энергоэффективность системы составляет 85,1 %, а эффективность эксплуатации составляет 32,62 %. Наиболее уязвимыми местами установки являются ТОТЭ и солнечные панели при рассмотрении солнца в качестве источника тепла. Солнечные коллекторы повышают общую эффективность системы на 12–16 %, обеспечивая дополнительное производство электроэнергии на 89 кВт. Одновременно осуществляется водяное отопление и охлаждение. Авторы показали, что на производительность системы существенно влияет соответствующий выбор параметров конструкции ТОТЭ. Оптимизация может привести к повышению эффективности системы на 5–8 %.

6. Наличие дополнительной системы улавливания углекислого газа

Choi et al. [29] исследовали внедрение технологии улавливания углекислого газа в гибридную установку с целью повышения эффекта декарбонизации на окружающую среду. Система включает в себя газовую турбину, внешний парогенератор, паровую турбину, ТОТЭ и блок улавливания углекислого газа на основе абсорбции и процесса разделения (рис. 12.) Рассматривается установка ТОТЭ/ГТ/ПТ под давлением, оснащенная рециркуляцией анодных выхлопных газов. Топливо подается как на ТОТЭ, так и на камеру сгорания ГТ. Выхлопные газы от газовой турбины генерируют пар на внешнем парогенераторе. Система улавливания и хранения углекислого газа устанавливается после внешнего парогенератора. Она состоит из процесса улавливания на основе моноэтаноламина и сопутствующей установки разделения углекислого

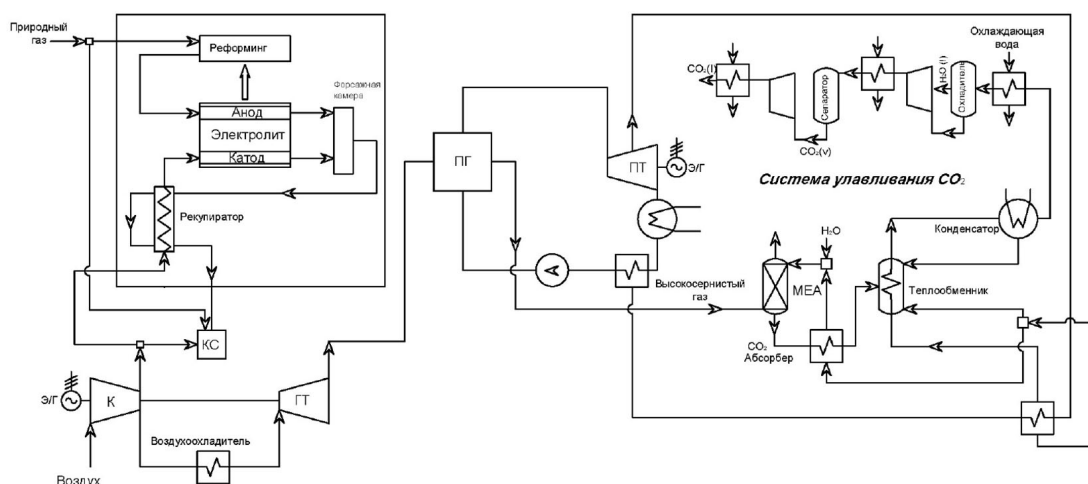


Рис. 12. Гибридная компоновка ТОТЭ/ГТ/ПТ-установка улавливания CO_2 [165]

Fig. 12. Hybrid layout of the SOFC /GT/PT CO_2 capture unit [165]

газа. Система улавливания углекислого газа требует дополнительных затрат электроэнергии. Авторы обнаружили, что энергоэффективность гибридной установки составляла 70 и 65 % соответственно без и с улавливанием углерода. Они также пришли к выводу, что газовая турбина F-класса достаточна для достижения 70 % эффективности цикла, при условии соответствующей производительности ТОТЭ. Газовая турбина с более высокой температурой горения, такая как газовая турбина J-класса, по-видимому, не способствует дальнейшему повышению эффективности.

7. Количество аппаратов ТОТЭ, ГТ (один, несколько)

Отдельный вопрос представляет собой анализ числа аппаратов ТЭ и ГТ. С точки зрения химических процессов это число ограничивается полным использованием кислорода воздуха в топливном элементе и камере сгорания. Однако большее влияние на число каскадов ТЭ и ГТ может оказать соотношение между энергетической эффективностью и материальными затратами. По результатам моделирования [30] схема гибридной установки с ТОТЭ под давлением и ГТ на природном газе с внешним паровым риформингом вместо внутреннего позволяет обеспечить электрический КПД на уровне 66 % при электрической мощности 4,7 МВт.

Варианты компоновки ТОТЭ/ГТ могут заключаться в интеграции высокотемпературного ТОТЭ с промежуточным температурным ТОТЭ. В [31] авторы рассмотрели два различных варианта компоновки систем ТОТЭ/ГТ. Первый – одноступенчатый, поскольку в систему включен только один тип ТОТЭ (высокотемпературный ТОТЭ или среднетемпературный ТОТЭ) (рис. 13). В этом варианте компоновки топливо может обходить ТОТЭ, попадая непосредственно в камеру сгорания. Кроме того, используется рециркуляция анодных выхлопных газов. Вторая конфигурация считается двухступенчатой, поскольку компоновка включает в себя два ТОТЭ (высокотемпературный ТОТЭ, среднетемпературный ТОТЭ или два среднетемпературных ТОТЭ). В случае двухступенчатой конфигурации, включающей высокотемпературный ТОТЭ и среднетемпературный ТОТЭ, оба ТОТЭ снабжаются параллельно сжатым и предварительно нагретым топливом. ТОТЭ оснащены рециркуляцией анодных выхлопных газов. Со стороны катода ТОТЭ соединены последовательно. Сжатый воздух сначала предварительно нагревается теплообменником, а затем подается в катодный отсек среднетемпературного ТОТЭ. Затем катодные выхлопные газы среднетемпературного ТОТЭ подают на катодную сторону высокотемпературного ТОТЭ. Непрореагировавшее топливо и поток катодного выхлопа высокотемпературного ТОТЭ сжигаются в камере сгорания. Его выхлопные газы сначала предварительно нагревают катодный поток, поступающий в высокотемпературный ТОТЭ, а затем предварительно нагревают воздух. Наконец, они расширяются в газовой турбине. В данной компоновке рекуперативный теплообменник размещается выше по течению ГТ, что обуславливает значительное снижение ТВТ. На рис. 14 представлена двухступенчатая компоновка, включающая два среднетемпературных ТОТЭ. Эта компоновка в основном аналогична описанной, отличаясь только по второстепенному моменту: теплообменник Н/Е 3 не используется, так как не требуется дальнейшего предварительного нагрева из-за более низкой рабочей температуры среднетемпературного ТОТЭ второй ступени.

Для расчетных параметров были приняты следующие значения: коэффициент использования топлива (общий) 0,85; коэффициент давления 6,0; рабочая температура среднетемпера-

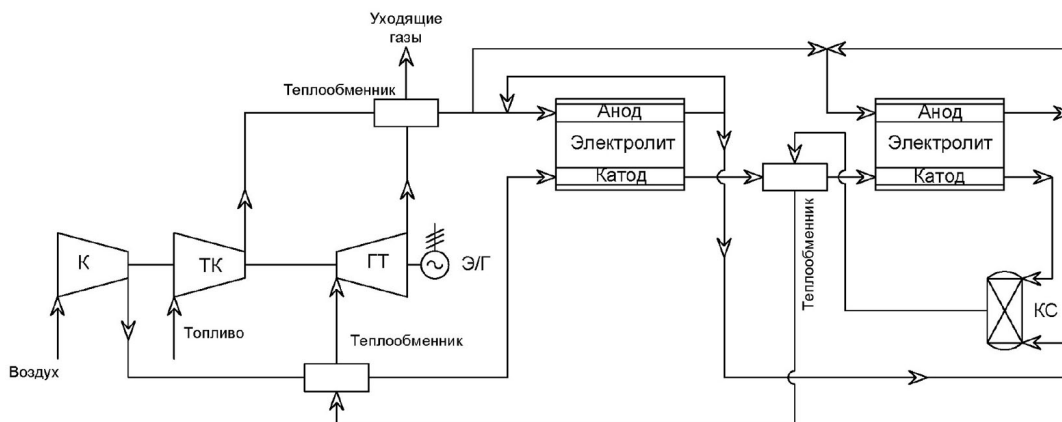


Рис. 13. Гибридный цикл высокотемпературный ТОТЭ, среднетемпературный ТОТЭ/ГТ

Fig. 13. Hybrid cycle high-temperature SOFC, medium-temperature SOFC/GT

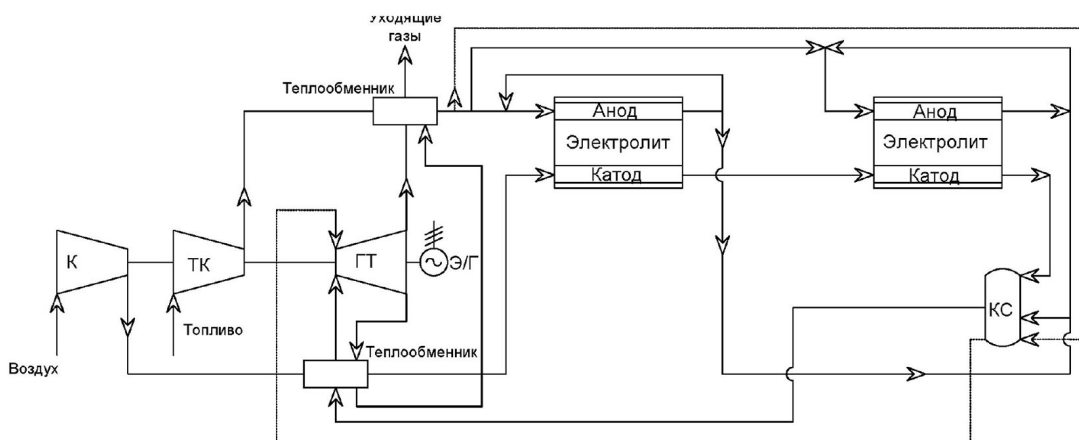


Рис. 14. Гибридный цикл два среднетемпературных ТОТЭ /ГТ

Fig. 14. Hybrid cycle of two medium-temperature SOFC/GT

турного ТОТЭ 750 °С; рабочая температура высокотемпературного ТОТЭ 750 °С. Результаты показали, что на производительность одноступенчатой компоновки резко влияет рабочая температура ячейки. В частности, в случае среднетемпературного ТОТЭ рабочая температура варьировалась от 650 до 750 °С, что привело к увеличению эффективности системы с 58 до 63 %. В случае высокотемпературного ТОТЭ рабочий диапазон составлял 750–850 °С, что увеличило КПД с 53 до 58 %. Для одноступенчатой системы высокотемпературного ТОТЭ оптимальное рабочее давление ячейки составляло около 6 атм, и общая эффективность системы снижалась при более высокой плотности тока (особенно в случае одноступенчатых циклов среднетемпературного ТОТЭ). Электрический КПД двухступенчатой системы оказался выше примерно на 10 %, чем значение, достигнутое соответствующей одноступенчатой системой. В частности, наибольший электрический КПД достигается двухступенчатым циклом с двумя среднетемпературными ТОТЭ, обеспечивая значения от 67 до 78 % в зави-

симости от плотности рабочего тока. Этот результат можно легко интерпретировать, если учесть, что в двухступенчатой системе отношение мощности, производимой топливным элементом (топливными элементами), к общей мощности системы выше. Поэтому, учитывая, что эффективность конверсии топлива в ТОТЭ значительно выше, чем у ГТ, общая эффективность системы возрастает.

Результаты. По результатам анализа литературных данным по моделированию гибридных систем с твердооксидными топливными элементами выявлены их особенности, преимущества и недостатки предлагаемых компоновочных решений согласно предложенной классификации. Результаты сведены в общую табл. 1.

Таблица 1. Особенности и недостатки циклов гибридных установок с твердооксидными топливными элементами

Table 1. Features and disadvantages of cycles of hybrid units with solid oxide fuel cells

Цикл	Особенности – преимущества	Недостатки
Трубчатый ТОТЭ	Возможность использования тонкого слоя электролита; быстрое реагирование на изменение нагрузки	Сложнее оптимизировать токосъем, особенно сьем тока на анодной стороне трубки
Микротрубчатые	Высокая объемная плотность мощности, хорошая переносимость теплового цикла, несложная герметизация между потоками топлива и окислителей, низкие капитальные затраты, небольшие размеры	
Плоский ТОТЭ	Высокая плотность мощности, простота производственного процесса	Инерционность системы
Внутренний риформинг	<i>Конфигурация ПВР</i>	
	Природный газ превращается в богатую водородом смесь внутри анодного отсека; простота системы и низкие капитальные затраты	В анодном отсеке необходим катализатор для реакции парового риформинга метана; риск осаждения углерода
	<i>Конфигурация КВР</i>	
	Реакции парового риформинга метана происходят в отсеке, отделенном анодной стороной	Сложность системы и высокие капитальные затраты
	<i>Рециркуляция анодных газов</i>	
	Рециркуляция анодных выхлопных газов к подсистеме переработки топлива; простота и небольшие капитальные затраты; высокая эффективность преобразования	Температурные профили ТОТЭ зависят от распределения потока газа, рабочих параметров ячейки и процесса риформинга; комплексный пуск
Внешний риформинг ТОТЭ/ГТ	<i>Внешний парогенератор</i>	
	Производимый пар поддерживает реакцию парового риформинга, используя тепло выхлопных газов; легкий контроль производства и использование пар в тепловых целях	Высокие капитальные затраты и сложность системы
Внешний риформинг ТОТЭ/ГТ	Внешний риформинг приводится в действие выхлопными газами ТОТЭ; использование более сложных видов топлива (биогаз, синтез-газ, жидкости и т.д.)	Комплексное управление тепловыми режимами; дополнительные количества топлива; КПД ниже; высокие капитальные затраты
Гибридный ТОТЭ/ГТ/ПТ	Использование различных циклов (например, ОЦР); при высокой температуре выхлопных газов достигается сверхвысокая эффективность преобразования	Высокие капитальные затраты и сложность системы; доступны для больших мощностей

Продолжение табл. 1

Continued Table 1

Цикл	Особенности – преимущества	Недостатки
Гибридный ТОТЭ/ГТ с рециркуляцией воздуха или рециркуляцией выхлопных газов	<i>Рекуперативный теплообменник (PTE)</i>	
	Предварительный нагрев воздуха, поступающего в катодный отсек топливного элемента, с помощью выхлопных газов из камеры сгорания	Уменьшение ТВТ, так как выходной поток камеры сгорания охлаждается в PTE перед входом в ГТ
	<i>Рециркуляция выхлопных газов (РВГ)</i>	
	Рециркулирует часть выходного потока камеры сгорания на вход катода, повышая температуру на входе катода	При повышении ТВТ КПД снижается больше, чем в цикле PTE
Давление в системе	<i>Атмосферное</i>	
	Безопасность и надежность работы	Высокая стоимость
	<i>Повышенное</i>	
	Высокая электрическая эффективность	Сложность управления

Выводы

1. Проведен анализ литературных данных по устройству и характеристикам проектных схем гибридных систем производства энергии с твердооксидным топливным элементом.

2. В литературе накоплен обширный опыт по проектированию, теоретическим исследованиям и численному моделированию гибридных установок, включающих топливный элемент и газовую турбину. Экспериментальные исследования резко ограничены стоимостью аппаратов и трудностями с масштабированием систем в лабораторных условиях. Рекомендуется еще более детальная проработка взаимосвязей между компонентами гибридной системы для достижения целевых показателей эффективности, о которых сообщается в численных исследованиях.

3. Ключевыми моментами, на которых делают акцент авторы при проектировании гибридной системы, являются выбор конструкции подсистемы риформинга топлива, способ реформирования и источник тепла для этого процесса, устройство твердооксидного топливного элемента и их количество, варианты задействованных аппаратов производства электроэнергии с созданием когенерационного или тригенерационного циклов, направление движения материальных потоков внутри системы, давление и герметичность взаимосвязи в гибридной системе.

Список литературы / References

[1] Анисимов П. Н., Медяков А. А., Осташенков А. П. Автономные стационарные комбинированные энергетические установки для энергообеспечения производств, *Энергосбережение и водоподготовка*, 2021, 6(134), 14–19 [Anisimov P. N., Medyakov A. A., Ostashenkov A. P. Autonomic stationary combined power plants for power supply of industries, *Energy saving and water treatment*, 2021, 6(134), 14–19 (in Rus.)]

[2] Buonomano A., Calise F., d'Accadia M.D., Palombo A. Hybrid solid oxide fuel cells–gas turbine systems for combined heat and power: A review, *Applied Energy*, 156, 2015, 32–85

[3] Коровин Н. В., Седлов А. С., Славнов Ю. А., Буров В. Д. Расчет коэффициента полезного действия гибридной электростанции с высокотемпературным топливным элементом, *Тепло-*

энергетика, 2007, 2, 49–53 [Korovin N. V., Sedlov A. S., Slavnov Yu. A., Burov V. D. Calculation of the efficiency of a hybrid power plant with a high-temperature fuel cell, *Thermal Power Engineering*, 2007, 2, 49–53 (in Rus.)]

[4] Филимонова А. А., Чичиров А. А., Чичирова Н. Д., Филимонов А. Г., Печенкин А. В. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане Известия высших учебных заведений, *Проблемы энергетики*, 2020, 22(6), 79–91 [Filimonova A. A., Chichirov A. A., Chichirova N. D., Filimonov A. G., Pechenkin A. V. Prospects for the development of hydrogen energy in Tatarstan News of higher educational institutions, *Energy problems*, 2020, 22(6), 79–91 (in Rus.)]

[5] Волощенко Г. Н., Пахомов В. П. Гибридная энергоустановка Патент на полезную модель RU 119523 U 1, 20.08.2012. Заявка № 2012116891/07 от 27.04.2012 [Voloshchenko G. N., Pakhomov V. P. Hybrid power plant Utility model patent RU 119523 U 1, 20.08.2012. Application No. 2012116891/07 dated 04/27/2012]

[6] Глухих И. Н. Электрохимический генератор Патент на изобретение RU 2614242 С 1, 24.03.2017. Заявка № 2015155148 от 22.12.2015 [Glukhikh I. N. Electrochemical generator Patent for invention RU 2614242 С 1, 03/24/2017. Application No. 2015155148 dated 12/22/2015]

[7] Коровин Н. В., Колодий Е. А., Славнов Ю. А., Захаренков Е. А. Гибридная электрохимическая энергоустановка с разделением рабочего тела Патент на полезную модель RU 84629 U 1, 10.07.2009. Заявка № 2009110111/22 от 20.03.2009 [Korovin N. V., Kolodiy E. A., Slavnov Yu. A., Zakharenkov E. A. Hybrid electrochemical power plant with separation of the working fluid Utility model patent RU 84629 U 1, 07/10/2009. Application No. 2009110111/22 dated 03/20/2009]

[8] Цгоев Р. С. Устройство электроснабжения собственных нужд энергоблока электростанции Патент на изобретение RU 2671821 С 1, 07.11.2018. Заявка № 2017139486 от 14.11.2017 [Tsgoev R. S. Power supply device for auxiliary needs of the power unit of the power plant Patent for invention RU 2671821 С 1, 07.11.2018. Application No. 2017139486 dated 11/14/2017]

[9] Столяревский А. Я. Способ генерации энергии Патент на изобретение RU 2444637 С 2, 10.03.2012. Заявка № 2010118976/06 от 13.05.2010 [Stolyarevsky A. Ya. Energy generation method Patent for invention RU 2444637 С 2, 10.03.2012. Application No. 2010118976/06 dated 05/13/2010]

[10] Григорук Д. Г., Касилова Е. В., Туркин А. В. Гибридная углеиспользующая электрохимическая энергоустановка с выводом из цикла диоксида углерода Патент на полезную модель RU 123581 U 1, 27.12.2012. Заявка № 2012131683/07 от 25.07.2012 [Grigoruk D. G., Kasilova E. V., Turkin A. V. Hybrid coal-fired electrochemical power plant with removal from the carbon dioxide cycle Utility model patent RU 123581 U 1, 12/27/2012. Application No. 2012131683/07 dated 07/25/2012]

[11] Цгоев Р. С. Применение энергоустановок на топливных элементах на теплоэлектростанциях, *Теплоэнергетика*, 2020, 8, 93–100 [Tsgoev R. S. The use of power plants on fuel cells at thermal power plants, *Thermal power engineering*, 2020, 8, 93–100 (in Rus.)]

[12] Duong P. A., Ryu B., Jung J., Kang H. Thermal Evaluation of a Novel Integrated System Based on Solid Oxide Fuel Cells and Combined Heat and Power Production Using Ammonia as Fuel, *Applied Sciences*, 2022, 12(12), 6287

[13] Yang W. J., Park S. K., Kim T. S., Kim J. H., Sohn J. L., Ro S. T. Design performance analysis of pressurized solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid systems considering temperature constraints, *J Power Sources*, 2006, 160, 462–473

- [14] Calise F., Dentice M., Vanoli L., von Spakovsky M. R. Full load synthesis/design optimization of a hybrid SOFC GT power plant, *Energy*, 2007, 32, 446–458
- [15] Chan S.H., Ho H.K., Tian Y. Multi-level modeling of SOFC gas turbine hybrid system. *Int J Hydrogen Energy*, 2003, 28, 889–900
- [16] McPhail S.J., Aarva A., Devianto H., Bove R., Moreno A. SOFC and MCFC: commonalities and opportunities for integrated research, *Int J Hydrogen Energy*, 2011, 36, 10337–10345
- [17] Park S.K., Kim T.S. Comparison between pressurized design and ambient pressure design of hybrid solid oxide fuel cell gas turbine systems, *J Power Sources*, 2006, 163, 490–499
- [18] Roberts R., Brouwer J., Jabbari F., Junker T., Ghezal-Ayagh H. Control design of an atmospheric solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system: variable versus fixed speed gas turbine operation, *J Power Sources*, 2006, 161, 484–491
- [19] Zhang X., Li J., Li G., Feng Z. Cycle analysis of an integrated solid oxide fuel cell and recuperative gas turbine with an air reheating system, *J Power Sources*, 2007, 164, 752–760
- [20] Ezzat M.F., Dincer I. Energy and exergy analyses of a novel ammonia combined power plant operating with gas turbine and solid oxide fuel cell systems, *Energy*, 2020, 194, 116750
- [21] Giarola S., Forte O., Lanzini A., Gandiglio M., Santarelli M. Techno-economic assessment of biogas-fed solid oxide fuel cell combined heat and power system at industrial scale, *Applied Energy*, 2018, 211, 689–704
- [22] Cao Y., Zoghi M., Habibi H., Raise A. Waste heat recovery of a combined solid oxide fuel cell – gas turbine system for multi-generation purposes, *Applied Thermal Engineering*, 2021, 198, 117463
- [23] Manesh M., Ghorbani S., Blanco-Marigorta A. Optimal design and analysis of a combined freshwater-power generation system based on integrated solid oxide fuel cell-gas turbine-organic Rankine cycle-multi effect distillation system, *Applied Thermal Engineering*, 2022, 211, 118438
- [24] Arsalı A. Thermoeconomic modeling and parametric study of hybrid SOFC gas turbine steam turbine power plants ranging from 1.5 to 10 MWe, *J Power Sources*, 2008, 181, 313–326
- [25] Singh R., Singh O. Comparative study of combined solid oxide fuel cell-gas turbine-Organic Rankine cycle for different working fluid in bottoming cycle, *Energy Conversion and Management*, 2018, 171, 659–670
- [26] Chen Y. Parametric analysis and optimization for exergoeconomic performance of a combined system based on solid oxide fuel cell-gas turbine and supercritical carbon dioxide Brayton cycle, *Energy Conversion and Management*, 2019, 186, 66–81
- [27] Pierobon L., Rokni M., Larsen U., Haglind F. Thermodynamic analysis of an integrated gasification solid oxide fuel cell plant combined with an organic Rankine cycle, *Renew Energy*, 2013, 60, 226–234
- [28] Ozcan H., Dincer I. Thermodynamic analysis of an integrated SOFC, solar ORC and absorption chiller for tri-generation applications, *Fuel Cells*, 2013, 13, 781–793
- [29] Choi J.H., Ahn J.H., Kim T.S. Performance of a triple power generation cycle combining gas/steam turbine combined cycle and solid oxide fuel cell and the influence of carbon capture, *Appl Therm Eng*, 2014, 71, 301–309
- [30] Осипов М.И., Гасилов А. Анализ схемных решений и оптимизация параметров комбинированных установок с высокотемпературными топливными элементами и газовыми тур-

бинами, *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение*, 2010, 2(79), 84–90 [Osipov M.I., Gasilov A. Analysis of schematic solutions and optimization of parameters of combined installations with high-temperature fuel cells and gas turbines, *Bulletin of the Moscow State Technical University. N. E. Bauman. Series Mechanical Engineering*, 2010, 2(79), 84–90 (in Rus.)]

[31] Musa A., De Paere M. Performance of combined internally reformed intermediate/high temperature SOFC cycle compared to internally reformed two-staged intermediate temperature SOFC cycle, *Int J Hydrogen Energy*, 2008, 33, 4665–4672