

М. И. О с и п о в, А. В. Г а с и л о в

АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ УСТАНОВОК С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И ГАЗОВЫМИ ТУРБИНАМИ

Рассмотрены схемы комбинированных энергетических установок с топливными элементами и газотурбинными установками. Проанализированы особенности и свойства циклов топливных элементов, работающих на расплавленном карбонате при атмосферном давлении, и циклов с твердооксидными топливными элементами, работающими при высоких давлениях.

E-mail: alexey.gasilov@mail.ru; osipov@power.bmstu.ru

Ключевые слова: топливный элемент, газовая турбина, риформинг, турбомашинны, энергоустановка, комбинированный цикл.

Энергетические технологии на основе топливных элементов — это одно из перспективных направлений развития малой энергетики, обеспечивающее высокую эффективность и экологичность.

Коэффициент полезного действия термодинамически обоснованной схемы комбинированной установки (КУ) с топливным элементом (ТЭ) и газотурбинной установкой (ГТУ) составляет от 65 до 72 % в температурном диапазоне 600...1000 °С для твердооксидных и карбонатных ТЭ (табл. 1) при использовании разных видов углеводородного топлива. Электрическая энергия, вырабатываемая ТЭ и ГТУ в составе КУ распределяется в соотношении (65–80 %):(35–20 %). Возможный диапазон мощностей таких КУ составляет от десятков киловатт до нескольких мегаватт [1].

Проектирование и создание КУ на базе ТЭ и ГТУ предполагает четкое знание следующих позиций: основных особенностей рабочих процессов установок при возможности использования различных видов углеводородного топлива; областей рационального использования разных диапазонов мощностей; термодинамического цикла; уровней давления рабочих сред в ТЭ и ГТУ; типа процесса риформинга (внутреннего или внешнего); конструкции элементной базы; способов утилизации теплоты уходящих газов.

В общем случае КПД КУ с ТЭ и ГТУ выражается следующей формулой [1, 2]:

$$\eta_{КУ} = \mu_f \eta_V \eta_{с.н} \beta + (1 - \mu_f \eta_V \beta) \eta_{ГТУ},$$

где μ_f — коэффициент использования топлива в ТЭ; η_V — КПД ТЭ; $\eta_{с.н}$ — поправка, учитывающая потери энергии на собственные нужды

Параметры топливных элементов

Параметры	Тип топливного элемента	
	РКТЭ	ТОТЭ
Электролит	Неподвижный жидкий расплавленный карбонат (РК) в алюминате лития	Перовскиты (керамика)
Электроды	Никель и его оксиды	Перовскиты и металлокерамика
Катализатор	Материал электрода	Материал электрода
Соединительный элемент	Коррозионно-стойкая сталь или никель	Никель, керамика или сталь
Носитель заряда	CO_3^{2-}	O^{2-}
Реакция на аноде в топливном канале	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2e^-$	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2e^-$ $\text{CO} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + 2e^-$
Реакция на катоде в канале окислителя	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2e^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	$\text{O}_2 + 4e^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$
Диапазон рабочих температур, °С	650	От 600 до 1000
Электрический КПД (нетто, природный газ), %	От 45 до 50	От 45 до 50
Снижение КПД, %/1000 ч	0,60	Менее 0,10

(топливный или водяной насос); β — доля от общего количества топлива, поступающего в ТЭ; $\eta_{\text{ГТУ}}$ — КПД ГТУ.

В зависимости от давления рабочей среды в ТЭ его эффективность изменяется согласно выражению [2]

$$E_{\text{ТЭ}} = E_{0,\text{ТЭ}} + \frac{RT_{\text{ТЭ}}}{2F} \ln \frac{c_{\text{H}_2} c_{\text{O}_2}^{0,5}}{c_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{RT_{\text{ТЭ}}}{4F} \ln P_{\text{ТЭ}},$$

где $E_{0,\text{ТЭ}}$ — теоретически возможная ЭДС при отсутствии потерь, определенная при рабочей температуре ТЭ; $R = 8,314$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная; $T_{\text{ТЭ}}$ — рабочая температура; $F = 9,649 \cdot 10^4$ Кл/моль — константа Фарадея; c_i — концентрация i -го вещества; $P_{\text{ТЭ}}$ — рабочее давление ТЭ.

Максимальное абсолютное давление в цикле определяют, исходя из конкретных условий работы и назначения КУ. Повышение давления в цикле как обычной ГТУ, так и КУ, выполненной на базе ТЭ и ГТУ, приводит к увеличению работы сжатия в компрессорах и определяет оптимальное давление. В случае мегаваттных мощностей желательно иметь более компактные размеры блоков (например, ТЭ, риформера (Р), ГТУ).

В результате анализа параметров КУ с ТЭ и ГТУ, проведенного по известным зависимостям [1, 2] (табл. 2), выявили существенное влияние схемных решений и собственных параметров цикла и эле-

ментной базы. Таким образом, в усовершенствованном двухкаскадном цикле КУ с трубчатым твердооксидным ТЭ (ТОТЭ) под давлением с автотермическим риформингом и ГТУ [3] возможно получить электрический КПД 67% по низшей теплоте сгорания природного газа, и полную электрическую мощность, равную 4,5 МВт при степенях повышения давления в компрессорах 8,8 и КПД компрессоров 0,75 [3]. Условия интеграции характеристик теплообменных аппаратов из-за разных температур и необходимых тепловых потоков обуславливают выбор технологии преобразования углеводородного топлива в водород. Например, схема двухкаскадной КУ с ТОТЭ под давлением и ГТУ на природном газе из магистрали (рис. 1) с внешним паровым риформером вместо внутреннего позволяет обеспечить электрический КПД на уровне 66% при электрической мощности 4,7 МВт.

Таблица 2

Значения параметров КУ

Тип цикла КУ	Электрический КПД, %	Степень повышения давления в ГТУ	Температура газа перед турбиной, К	Мощность, кВт
КУ из РКТЭ+ГТУ	68	3,4	1373	100–500
КУ из ТОТЭ+ГТУ с промежуточным охлаждением и регенерацией	71	4	1167	100–500
КУ из ТОТЭ+ГТУ с регенерацией	72,2	3,6	1138	100–500
КУ из РКТЭ+ГТУ с регенерацией и измененной очередностью процессов	64	3,5	1223	100–500
КУ из двух ТОТЭ + двух ГТУ с внутренним риформингом и трубчатыми ТОТЭ	67	8,8	1133	1000–4500
КУ из двух ТОТЭ + двух ГТУ с внешним риформингом и пластинчатыми ТОТЭ	66	9	1373	1000–4700

Основными преимуществами парового риформера перед автотермическим являются его технологическая простота и максимально достижимый выход водорода. Используя пластинчатую конструкцию ТОТЭ с высокоразвитыми поверхностями, достаточно просто решить проблему охлаждения ТЭ рабочими телами, идущими через него, — воздухом и риформ-газом. Таким образом, вся выделяемая в ТОТЭ теплота возвращается в термодинамический цикл. Это дает возможность

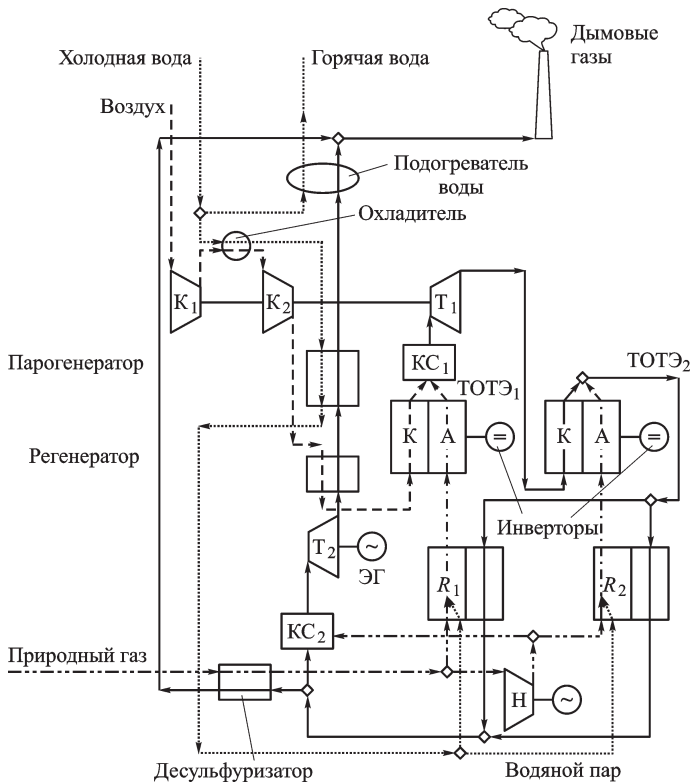


Рис. 1. Структурная схема КУ, состоящей из двух ТОТЭ и двух ГТУ

не подавать топливо в первую камеру сгорания (КС), расположенную за ТОТЭ высокого давления. Дополнительное топливо подается в КС только при запуске и необходимости увеличения температуры газа перед газовой турбиной.

В КУ, выполненной на базе РКТЭ и ГТУ малой мощности (сотни киловатт), уменьшение размеров турбомашин, особенно компрессоров, приводит к снижению чисел Рейнольдса и тем самым к падению КПД. Увеличить размеры лопаточных аппаратов турбомашин можно, изменяя очередность процессов при максимальном давлении $\approx 0,1$ МПа (рис. 2).

На базе научно-исследовательских работ, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, выявлена возможность создания компактных автономных энергетических установок мощностью от 100 до 1000 кВт по усовершенствованным схемам и схеме с измененной очередностью процессов [1, 4]. Проведенный анализ параметров КУ с РКТЭ под атмосферным давлением и ГТУ показал возможность получения электрического КПД 64% при степени повышения давления 3,4, и КПД компрессора, равного $\sim 75\%$. Газотурбинный блок работает в интервале давлений от 0,1 до 0,03 МПа при измененном (по сравнению с обычным) расположением компрессоров и турбин по тракту рабочего тела [4].

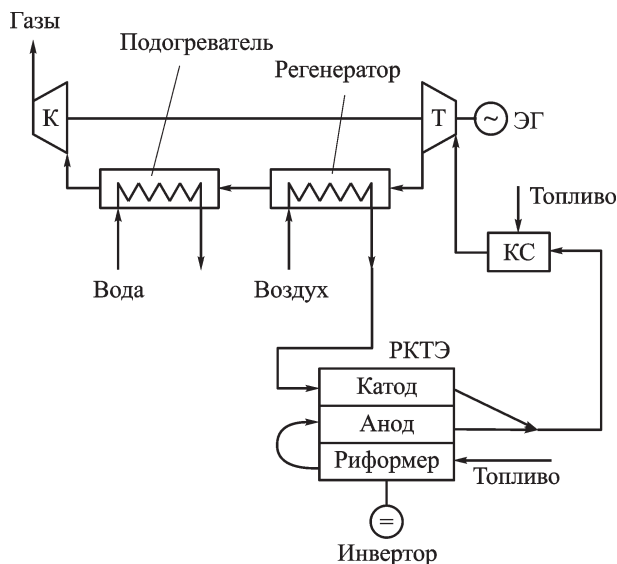


Рис. 2. Структурная схема КУ из ГТУ + РКТЭ

Далее приведены данные о соотношении масс элементов КУ, полученные на основе массогабаритной характеристики КУ мощностью 440 кВт с ТОТЭ под давлением и ГТУ с регенерацией [5]. Здесь четко проявляется выигрыш в массе и в соотношении мощностей ТОТЭ/ГТУ — 65%/35%.

	Доля от общей массы КУ, %
Топливный насос	0,11
Водяной насос	0,11
Компрессор	0,84
Турбина	1,35
Стартер/генератор	0,49
Воздушный теплообменник	2,94
ТОТЭ	77,72
Автотермический риформер	0,87
Камера сгорания	1,76
Корпус и тепловая изоляция	6,79
Парогенератор	0,29
Обвязка (трубопроводы и приводы)	6,73
Итого:	100,00

Возможны различные способы утилизации теплоты уходящих газов: для нужд теплофикации или для паротурбинного блока. В случае КУ с ТЭ при атмосферном давлении и работе на метане, выделяющемся из бытовых свалок, можно использовать теплоту уходящих газов для подогрева массива засыпки. Это повысит температуру массива

биомассы (особенно зимой) и интенсифицирует процесс выделения метана.

В случае КУ, выполненной на базе ТЭ и ГТУ под давлением используемого, например, природного газа из городской магистрали, понадобится установка топливного компрессора, для работы которой необходима дополнительная энергия. Однако необходимое количество водяного пара для нужд процесса парового риформинга может быть получено вследствие конденсации водяных паров из дымовых газов на выходе из КУ, а не из водяной магистрали.

В заключение можно высказать предположение, что рассматриваемые схемы комбинированных энергоустановок следует использовать в различных диапазонах мощностей. При выборе обсуждаемых схем комбинированных энергоустановок с ТЭ и ГТУ определяющими факторами являются технико-экономические и массогабаритные показатели. В диапазоне мегаваттных мощностей могут найти применение КУ с ТОТЭ под давлением, с ГТУ и внешним паровым риформером для стационарной энергетики, тогда как в диапазоне сотен киловатт более рациональным оказываются энергоустановки с РКТЭ под атмосферным давлением и внутренним риформингом при использовании силовых установок в качестве вспомогательных или на транспорте.

Отдельный вопрос представляет собой анализ числа каскадов ТЭ и ГТУ. С точки зрения химических процессов это число ограничивается полным использованием кислорода воздуха в ТЭ и КС. Однако большее влияние на число каскадов ТЭ и ГТУ могут оказать технико-экономические расчеты, которые проводятся в настоящее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г а с и л о в А. В., О с и п о в М. И., Я н с о н Р. А. Особенности схем комбинированных энергоустановок с топливными элементами и газовыми турбинами // Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. "Возобновляемая и малая Энергетика-2009", 10 июня 2009 г. Москва. – Пермь: ООО "Типография АСТЕР", 2009. – С. 186–192.
2. L a m r i n i e J., D i c k s A. Fuel cell systems explained. 2nd ed. – John Wiley & Sons Ltd., 2003.
3. Г а с и л о в А. В., Я н с о н Р. А. Особенности энергоустановки с высокотемпературными топливными элементами и газовыми турбинами // Сб. тезисов докл. XIII Всеросс. межвуз. науч.-техн. конф. "Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели", 29–31 окт. 2008 г. – М.: Печатный салон "СПРИНТ", 2008. – С. 130–131.
4. М о л я к о в В. Д., О с и п о в М. И., Т у м а ш е в Р. З. Повышение эффективности режимов работы газотурбинного двигателя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". – 2006. – № 3. – С. 80–95.
5. T o r n a b e n e R., W a n g X., S t e f f e n C. J. (Jr.), F r e e h J. E. Development of parametric mass and volume models for an aerospace SOFC/Gas turbine hybrid system // ASME Conf. Proc. GT2005. – Vol. 5. – Turbo Expo. – 2005. – P. 135–144.

Статья поступила в редакцию 23.03.2010

Алексей Владимирович Гасилов родился в 1984 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2008 г. Ассистент, аспирант кафедры “Газотурбинные и нетрадиционные источники энергии” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ и 3 патентов в области энергетики.

A.V. Gasilov (b. 1984) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2008. Assistant lecturer, post-graduate of “Gas-Turbine and Non-traditional Energy Sources” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications and 3 patents in the field of power engineering.

Михаил Иванович Осипов родился в 1938 г., окончил в 1963 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, заведующий кафедрой “Газотурбинные и нетрадиционные источники энергии” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор, президент Восточно-Европейского регионального отделения Международной энергетической ассоциации. Автор более 290 научных работ в области газотурбинных и комбинированных энергоустановок и двигателей, систем охлаждения и тепловой защиты, газодинамики и теплообмена в энергетических установках.

M.I. Osipov (b. 1938) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1963. D. Sc. (Eng.), head of “Gas-Turbine and Non-traditional Energy Sources” department of the Bauman Moscow State Technical University, Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, professor, president of the East-European Regional department of the International Energy Association. Author of more than 290 publications in the field of gas-turbine and combined power plants and engines, systems of cooling and thermal protection, gasdynamics and heat-mass-exchange in power plants.