

УДК 536.7

Носач В. Г.¹, Шрайбер А. А.²¹Институт технической теплофизики НАН Украины²Институт общей энергетики НАН Украины

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ

Запропоновано нову схему газотурбінної установки з комбінованою системою термохімічної та повітряної регенерації. У порівнянні з повітряною регенерацією нова схема дозволяє підвищити ККД установки на 4,5...5,5 % та знизити викиди шкідливих речовин.

Предложена новая схема газотурбинной установки с комбинированной системой термохимической и воздушной регенерации. В сравнении с воздушной регенерацией новая схема позволяет повысить КПД установки на 4,5...5,5 % и снизить выбросы вредных веществ.

We propose a new scheme of gas-turbine plant with a combined system of thermochemical and air recuperation. As compared to air recuperation, the new scheme enables one to enhance the efficiency of the plant by 4.5...5.5 % and to decrease the emission of harmful substances.

 A – работа; I – энтальпия; J – полная энтальпия; P – давление; Q – теплотворная способность; T – температура; β – коэффициент; η – КПД;

ВР – воздушная регенерация;

ГТУ – газотурбинная установка;

КТ – конвертированное топливо;

ПГ – природный газ;

ПС – продукты сгорания;

ТХР – термохимическая регенерация.

В последнее время наблюдается устойчивая тенденция к быстрому росту цены природного газа. Поэтому изыскание путей повышения эффективности его использования в различных теплоэнергетических установках привлекает внимание исследователей в разных странах. Кроме того, все более жесткие экологические требования приводят к необходимости снижения количества вредных веществ (в частности, оксидов азота), выбрасываемых в атмосферу.

Для повышения эффективности использования природного газа в теплоэнергетической установке необходимо тем или иным способом утилизировать физическое тепло продуктов сгорания на выходе из установки. Один из возможных вариантов здесь связан с нагревом природного газа (мы ниже предполагаем, что он состоит из чистого метана), но его количество невелико и, кроме того, он начинает разлагаться при достаточно низких температурах. Другая возможность связана с нагревом воздуха, подаваемого на горение, но этот путь также имеет два недостатка: во-первых, количество

воздуха и его удельная теплоемкость ниже, чем соответствующие параметры ПС, и, во-вторых, с повышением температуры воздуха существенно возрастает эмиссия NO_x .

В то же время существует принципиально отличный способ повышения эффективности использования природного газа, который лишен отмеченных недостатков: это конверсия метана за счет физического тепла ПС (термохимическая регенерация) [1]. В этом случае получается новое топливо с более высокой теплотворной способностью, чем метан, и значительным количеством молекулярного водорода и монооксида углерода, сжигание которых сопровождается достаточно малой эмиссией NO_x [2]. Следовательно, термохимическая регенерация (ТХР) позволяет также решить и экологические задачи.

Как известно, КПД современных газотурбинных установок (ГТУ) порядка 36...38 %. Вероятно, наиболее целесообразный путь повышения их эффективности связан с ТХР. Однако здесь возникают две трудности: во-первых,

степень конверсии метана уменьшается со снижением температуры ПС, используемых в качестве теплоносителя в термохимическом реакторе, но температура уходящих газов ГТУ обычно достаточно низка; во-вторых, ГТУ работают с высоким коэффициентом избытка воздуха, но степень конверсии резко падает, если реагирующая смесь, которая подается в термохимический реактор, содержит кислород. Вместе с тем эти трудности можно преодолеть за счет применения следующих мер, предложенных в Институте технической теплофизики НАН Украины:

(а) термохимический реактор располагается не за турбиной, а в рассечку, т.е. между ее цилиндрами высокого и низкого давления (т. наз. промежуточная регенерация);

(б) коэффициент избытка воздуха уменьшается до единицы, но для снижения температуры ПС перед турбиной до приемлемого уровня определенная часть их подается в камеру сгорания. Кроме того, для более полной утилизации физического тепла ПС представляется целесообразным использовать здесь комбинированную регенеративную систему: ТХР + нагрев воздуха. В настоящей работе описаны некоторые результаты разработки комбинированной регенеративной системы для ГТУ и термодинамических расчетов ее эффективности.

Принципиальная схема ГТУ с ТХР представлена на рис. 1. Основным элементом этой системы является реактор – теплообменник 4, где ПС после цилиндра высокого давления 3 служат горячим теплоносителем. После расширения ПС в цилиндре низкого давления 5 соответствующая часть их выбрасывается в атмосферу, а остальные, после охлаждения в теплообменнике 6, сжимаются в компрессоре 7 до начального давления p_1 (здесь и ниже индексы соответствуют номерам точек на рис. 1). Далее поток сжатых продуктов сгорания разделяется на две части, отмеченные буквами А и В на рис. 1. Поток А, представляющий собой стехиометрическое количество ПС в реакции конверсии метана, т.е. $(\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7,52\text{N}_2)/3$, смешивается с метаном в смесителе 8 и затем

поступает в реактор – теплообменник 4, где и реализуется реакция конверсии. Другой поток ПС (В), состоящий из $\beta(\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7,52\text{N}_2)/3$, направляется в аппарат 4. Кроме того, стехиометрическое количество воздуха $(2\text{O}_2 + 7,52\text{N}_2)$ после компрессора 2 также нагревается в реакторе – теплообменнике. После этого указанные три потока подаются в камеру сгорания 1. Естественно, коэффициент β выбирается так, чтобы температура ПС перед цилиндром 3 была равна заданному значению.

Из рис. 1 следует, что полезная работа этой установки равна сумме работ цилиндров 3 и 5 (A_3, A_5) за вычетом суммы работ компрессоров 2 и 7 (A_2, A_7). КПД установки составляет

$$\eta = (A_3 + A_5 - A_2 - A_7)/Q, \quad (1)$$

где Q – теплотворная способность метана.

В проведенных расчетах варьировались значения p_1, T_1 и T_7 (во всех вариантах принималось, что температуры трех потоков после нагрева в аппарате 4 равны, т.е. $T_8 = T_{10} = T_7$).

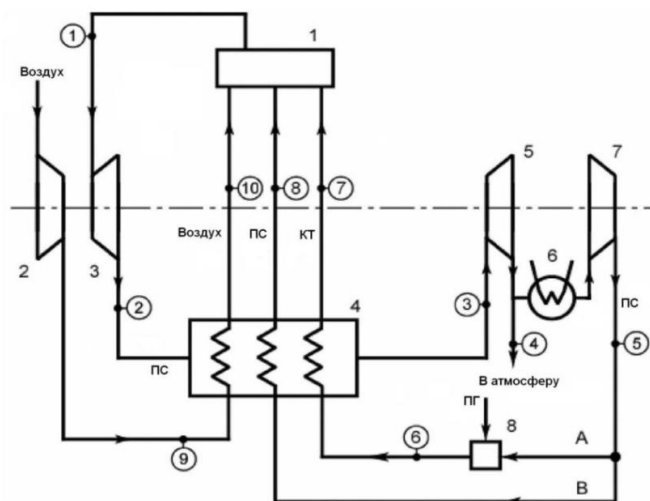


Рис. 1. Схема газотурбинной установки с термохимической регенерацией:
 1 – камера сгорания; 2 – воздушный компрессор; 3 – цилиндр высокого давления; 4 – реактор – теплообменник; 5 – цилиндр низкого давления; 6 – охладитель; 7 – компрессор для ПС; 8 – смеситель. Цифры в кружочках соответствуют номерам точек в табл. 1.

Табл. 1. Параметры рабочих тел

№ точки на рис. 1	Параметры		№ варианта	
			1	2
1	Давление p , МПа		1,5	2
	Температура T , К		1600	1600
	Энтальпия I , МДж/кмоль CH_4		1852,3	1826,5
2	Давление p , МПа		0,25	0,333
	Температура T , К		1130	1130
	Энтальпия I , МДж/кмоль CH_4		1129,2	1113,6
3	Температура T , К		702,6	759,4
	Энтальпия I , МДж/кмоль CH_4		523,1	592,1
4	Давление p , МПа		0,1	0,1
	Температура T , К		570,2	579,5
	Энтальпия I , МДж/кмоль CH_4		348,5	355,4
5	Температура T , К		649,3	699,8
	Энтальпия I , МДж/кмоль CH_4		332,3	374,4
6	Состав реагирующей смеси, кмоль/кмоль CH_4	CH_4	1	1
		CO_2	0,333	0,333
		H_2O	0,667	0,667
		N_2	2,507	2,507
	Калорийность Q , МДж/кмоль CH_4		802,3	802,3
	Полная энтальпия J , МДж/ CH_4		842,5	848,4
7	Состав конвертируемого топлива, кмоль/кмоль CH_4	CH_4	0,578	0,625
		N_2	2,507	2,507
		H_2	1,155	1,030
		CO_2	0,222	0,239
		CO	0,533	0,469
		H_2O	0,355	0,386
	Температура T , К		1010,2	1009,3
	Калорийность Q , МДж/кмоль CH_4		893,9	883,4
	Энтальпия I , МДж/кмоль CH_4		130,3	129,3
	Полная энтальпия J , МДж/кмоль CH_4		1024,2	1012,7

9	Температура T , К	682,6	739,3
Коэффициент β		7,323	7,165
Работа турбин, МДж/кмоль CH_4 :			
A_3		723,1	712,9
A_5		174,6	236,6
Работа компрессоров, МДж/кмоль CH_4 :			
A_2		109,2	126,1
A_7		326,1	368,2
Полезная работа установки A_Σ , МДж/кмоль CH_4		462,4	455,2
КПД установки, %		57,63	56,74

Примечание: давления в точках 5 – 10 те же, что и в точке 1; температуры в точках 8 и 10 те же, что и в точке 7.

Для упрощения использовались следующие гипотезы:

(i) время пребывания реагирующей смеси в реакторе – теплообменнике достаточно для достижения равновесного состава конвертированного топлива (КТ);

(ii) потери тепла и давления во всех аппаратах и трубопроводах пренебрежимо малы.

Все параметры конвертированного топлива (состав, теплотворная способность, энтальпия) рассчитывались по методике, описанной в [3, 4]. Для каждого варианта расчета давление p_2 выбиралось так, чтобы температура ПС после цилиндра 3 была одинакова: $T_2 = 1130$ К. Внутренний КПД обоих цилиндров турбины принимался равным 0,92, а компрессоров – 0,88. Очевидно, КПД рассматриваемой схемы возрастает с увеличением T_7 , но при этом снижается температура T_3 после реактора – теплообменника. Поэтому в каждом варианте расчета накладывались следующие ограничения на T_7 :

$$\min \{T_3 - T_5, T_3 - T_6, T_3 - T_9\} \geq 20 \text{ К.} \quad (2)$$

Значение T_7 , соответствующее равенству в (2), обозначается через T'_7 (естественно, это максимально возможное T_7).

Некоторые результаты двух вариантов расчета представлены в табл. 1 (здесь $p_1 = 1,5$ и 2 МПа, $T'_7 = 1010,2$ и 1009,3 К). Видно, что при

достаточно высоких T_7 предлагаемая схема позволяет получить очень высокий КПД газотурбинной установки. В табл. 2 приведена зависимость КПД η , рассчитанного по формуле (1), от значений T_1 и T_7 при $p_1 = 1,5$ МПа (два последних столбца здесь соответствуют T'_7). Значения T'_7 для различных p_1 и T_1 представлены в табл. 3.

Для определения эффективности использования метода ТХР были проведены также расчеты КПД ГТУ с регенеративным нагревом только воздуха при тех же температурах T_1 и T_2 (КПД такой схемы обозначается через η°). Зависимость $\Delta\eta = \eta - \eta^\circ$ от p_1 , T_1 и T_7 представлена на рис. 2. Видно, что при прочих равных условиях значение $\Delta\eta$ заметно возрастает с уменьшением начального давления p_1 или с увеличением температуры T_1 . Максимальное значение $\Delta\eta$ соответствует варианту 1 в табл. 1 ($p_1 = 1,5$ МПа; $T_1 = 1600$ К; $T_7 = T'_7 = 1010,2$ К) – здесь $\Delta\eta = 5,53$ %. В то же время низкая начальная температура дает максимальное значение $\Delta\eta = 3,67$ %, а средняя – $\Delta\eta = 4,72$ %. Максимально

Табл. 2. КПД газотурбинной установки (%)

T_1 , К	T_7 , К				
	900	950	1000	1010,2	1021
1500	48,4	51,0	54,3		55,9
1600	50,0	53,0	56,8	57,6	

Табл. 3. Максимальные значения T_7

T_1 , К	p_1 , МПа		
	1,5	2	2,5
1400	1033,2	1030,2	1027,8
1500	1021	1019,3	1017,7
1600	1010,2	1009,3	1008,5

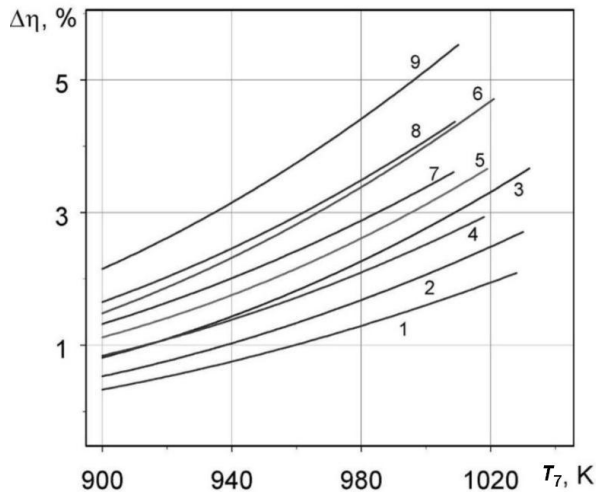


Рис. 2. Прирост КПД ГТУ в зависимости от T_1 : 1 – 3 – $T_1 = 1400$ К; 4 – 6 – $T_1 = 1500$ К; 7 – 9 – $T_1 = 1600$ К; 1, 4, 7 – $p_1 = 2,5$ МПа; 2, 5, 8 – $p_1 = 2$ МПа; 3, 6, 9 – $p_1 = 1,5$ МПа.

возможные значения $\Delta\eta$ для различных p_1 и T_1 показаны на рис. 3.

Представляется также интересным сравнить ГТУ-ТХР и ГТУ с воздушной регенерацией (ГТУ-ВР) при условии равных КПД обеих схем $\eta = \eta^\circ$ (очевидно, при этом следует принять более высокое значение T_1 для ГТУ-ВР). Если, например, $p_1 = 1,5$ МПа; $T_1(\text{ГТУ-ТХР}) = 1400$ К и $T_7 = 1000$ К, необходимо взять $T_1(\text{ГТУ-ВР}) \approx 1520$ К, т.е. прирост начальной температуры здесь составляет $\delta T \approx 120$ К. Для более высокого температурного уровня значение δT должно быть еще больше. Таким образом, ТХР позволяет получить высокий КПД ГТУ без увеличения начальной температуры цикла, что очень важно с точки зрения стоимости материалов для установки.

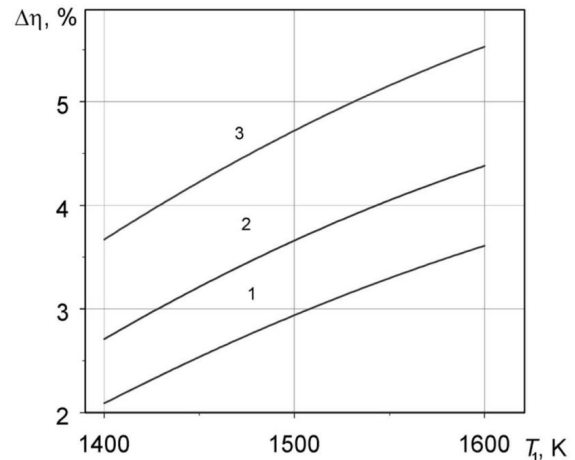


Рис. 3. Максимальный прирост КПД ГТУ в зависимости от T_1 :

1 – $p_1 = 2,5$ МПа; 2 – $p_1 = 2$ МПа; 3 – $p_1 = 1,5$ МПа.

Выводы

Разработана новая схема газотурбинной установки с комбинированной системой термохимической и воздушной регенерации. Для повышения степени конверсии топлива термохимический реактор размещается не за турбиной, а в рассечку, между цилиндрами высокого и низкого давления. Схема позволяет существенно (до 5,5 %) повысить КПД установки и уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носач В.Г. Энергия топлива. – К.: Наук. думка, 1989. – 148 с.
2. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.
3. White W.B., Johnson S.M., Dantzig G.B. Chemical equilibrium in complex mixtures// J. Chem. Phys. – 1958. – V. 28, No. 5. – P. 751 – 755.
4. Носач В.Г., Шрайбер А.А. Повышение эффективности использования биогаза в теплоэнергетических установках с помощью термохимической регенерации // Пром. теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 2. – С. 57 – 63.

Получено 24.06.2010 г.