

УДК 621.438

М.Р. ТКАЧ, А.К. ЧЕРЕДНИЧЕНКО

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ С ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ И ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Сопоставлены показатели ГТУ с регенерацией и термохимической конверсией топлива. Показано, что схема с последовательным размещением регенератора и термохимического реактора характеризуется величиной максимальной допустимой температуры реакции 530...580 К, что существенно ограничивает возможности выбора топлив. Схема с термохимическим реактором и регенератором, расположенными последовательно после турбокомпрессора, обеспечивает расширение спектра применения топлив для конверсии (температура реакции 980...1000 К), но характеризуется худшими показателями энергетической эффективности.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, термохимическая регенерация, конверсия топлива, регенерация тепла отходящих газов, удельный расход топлива, альтернативные топлива.

Введение

Газотурбинные технологии привлекают внимание разработчиков современных энергетических комплексов различного назначения. Так на объектах добычи углеводородных ресурсов, их дальнейшей переработки и последующей транспортировки существуют значительные потребности в механической, электрической и тепловой энергии [1]. Вместе с тем, применение там газотурбинных двигателей (ГТД) требует дальнейшего повышения эффективности газотурбинных установок (ГТУ).

и альтернативные (отходы термопластических полимеров, этанол, метанол, диметиловый эфир и др.) [5].

Анализ эффективности ГТУ с совместной термодинамической и термохимической регенерацией позволит определить области их рационального применения. В качестве критерия эффективности установки принят удельный расход топлива C_N , кг/(кВт·час) при заданной мощности ГТУ - N_e . Выбор конкретной схемы рассматриваемых ГТУ предполагает анализ диапазона возможных температур конверсии топлива.

1. Формулирование проблемы

Одним из традиционных путей повышения экономичности ГТД является регенерация тепла отходящих газов в термодинамическом цикле для подогрева воздуха перед камерой сгорания. Повышение степени регенерации влечет за собой увеличение КПД термодинамического цикла, но удельная мощность при этом несколько снижается за счет увеличения потерь полного давления по воздухоприемному тракту ГТД [2]. Существенным препятствием в реализации этого пути является создание эффективного теплообменника для подогрева воздуха. Другим путем повышения эффективности тепловых двигателей является термохимическая регенерация тепла, которая предусматривает утилизацию тепла отходящих газов ГТД путем конверсии топлива в смесь газов с более высокой теплотворной способностью [3, 4]. Здесь могут использоваться различные как традиционные углеводородные топлива, так

2. Решение проблемы

Анализ взаимосвязей термодинамических параметров газотурбинной установки с термохимической регенерацией теплоты совместно с термодинамической рекуперацией, выполнен методами математического моделирования. В основу модели положен укрупненный расчет ГТД [6] с учетом потерь полного давления во всех элементах газозводушного тракта и отборов воздуха на охлаждение лопаток турбин. Изменение низшей располагаемой теплотворной способности топлива в результате эндотермической реакции конверсии учтено в коэффициенте увеличения теплоты сгорания

$$\bar{H}_U = \frac{H_U^K - H_U^B}{H_U^B},$$

где H_U^B и H_U^K – величина низшей располагаемой теплотворные способности базового и конвертированного топлива соответственно.

Затраты тепла отходящих газов, необходимые для осуществления конверсии топлива определены тепловым балансом термохимического реактора

$$\frac{\bar{H}_U \cdot H_U^B \cdot C_N \cdot Ne}{3600} = \Delta T \cdot G_T \cdot c_p,$$

где G_T – расход отходящих газов ГТД;

c_p – средняя массовая изобарная теплоемкость отходящих газов в соответствующем температурном диапазоне;

$\Delta T = f(G_T, c_p, \bar{H}_U)$ – снижение температуры отходящих газов, необходимое для осуществления конверсии топлива.

Обозначив основные блоки ГТУ как ТК (турбокомпрессор), Р (регенератор), ТХР (термохимический реактор) получим две возможные конструктивные схемы установки с последовательным размещением элементов:

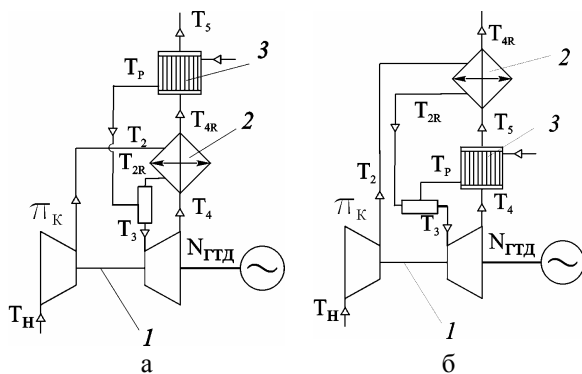
I – ТК–Р–ТХР;

II – ТК–ТХР–Р.

Первый вариант установки предусматривает турбокомпрессорный блок и установленные последовательно Р и ТХР (рис. 1, а).

Альтернативный вариант ГТУ по схеме ТК–ТХР–Р, предусматривает последовательное размещение за турбокомпрессорным блоком термохимического реактора и регенератора (см. рис. 1, б).

Для каждого варианта ГТУ определены зависимости удельного расхода топлива и максимальной допустимой температуры реакции от степени повышения давления ТК π_K и среднemasовой температуры газов на выходе из камеры сгорания T_3 .



Максимальная допустимая температура эндотермической реакции конверсии топлива T_P определена соответственно для схем ТК–Р–ТХР и ТК–ТХР–Р как:

$$T_P = T_{4R} - \Delta T \text{ или } T_P = T_4 - \Delta T,$$

где T_{4R} – температура газа за регенератором;

T_4 – температура газа за ГТД.

Здесь

$$\Delta T = \frac{\bar{H}_U \cdot H_U^B \cdot C_N^K \cdot Ne}{G_T \cdot c_p \cdot 3600},$$

где C_N^K – удельный расход конвертированного топлива.

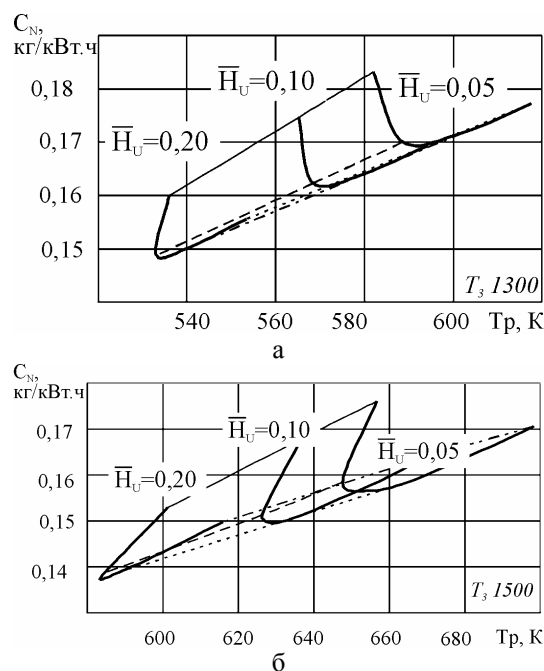
Оценка адекватности математической модели ГТУ показала величину невязки теплового баланса установки не более одного процента.

Исследование эффективности схем ГТУ выполнено применительно к базовому ГТД отечественного производства (UGT16000) мощностью 16 МВт [1].

Степень термодинамической регенерации принята близкой к предельной возможной ($r = 0,85$) [1, 2].

Значение H_U^B принято равным 50 МДж/кг.

Как следует из приведенных данных, для схемы газотурбинной установки ТК–Р–ТХР при $T_3 = 1300$ К допустимая температура реакции конверсии топлива не превысит 530 К (при $\bar{H}_U = 0,2$) (рис. 2).



При увеличении T_3 до 1500 К эта температура повысится до 580 К при той же степени конверсии топлива. Такие значения температур конверсии су-

существенно ограничивают выбор топлива, которое может быть использовано в рассматриваемой установке. Так, температура реакции для метана (CH_4) составляет 873...1073 К [7], этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) – 673...773 К, что делает невозможным их использование в установке рассматриваемой схемы. В тоже время, допустимо применение метанола (CH_3OH), характеризующегося температурой реакции 523...573 К и диметилового эфира ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) с $T_p = 573...623$ К.

Для схемы II, допустимая температура реакции существенно выше (рис. 3).

Ее величина достигает значения порядка 850 К при $T_3 = 1300$ К, увеличиваясь до 980...1000 К при $T_3 = 1500$ К ($\bar{H}_U = 0,2$).

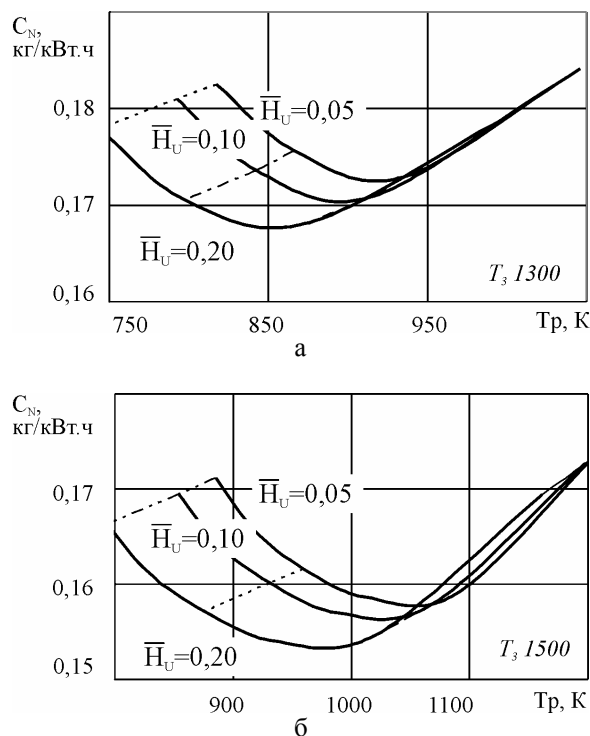


Рис. 3. Показатели установки ТК–ТХР–Р:

а – $T_3 = 1300$ К; б – $T_3 = 1500$ К

— $\pi=3$; — — — $\pi=5$; — · — $\pi=7$;
 $\pi=9$; — · — $\pi=13$

Это позволяет использовать в такой схеме метан и другие углеводородные топлива, а также этанол.

Следует отметить, что существенное повышение (на 10 – 12%.) величины удельного расхода топлива в установке по схеме ТК–ТХР–Р связано со снижением коэффициента полезного действия ГТД, вследствие уменьшения величины подогрева воздуха в регенераторе (рис. 4)

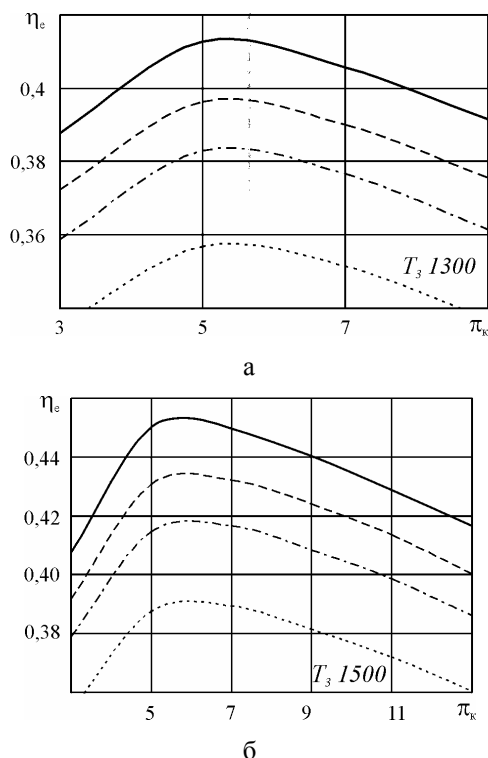


Рис. 4. Коэффициент полезного действия ГТУ для схемы ТК–ТХР–Р:

а – $T_3 = 1300$ К; б – $T_3 = 1500$ К

— $\bar{H}_U = 0$; — · — $\bar{H}_U = 0,1$; $\bar{H}_U = 0,2$
 — — — $\bar{H}_U = 0,5$

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Схема ГТУ с размещенными последовательно за турбокомпрессорным блоком регенератором и термохимическим реактором характеризуется относительно низкой потенциальной температурой реакции (530-580 К) и существенно ограничивает возможности выбора топлив;

2. Схема ГТУ с последовательно размещенными за турбокомпрессорным блоком термохимическим реактором и регенератором позволяет расширить возможности конверсии топлива 980...1000 К, но характеризуется худшими показателями энергетической эффективности.

Литература

1. *Gas Turbine World. For Project Planning // Engineering, Construction, Operation.* – 2005. – Vol. 24. – P. 208.

2. *Meherwan P. Boyce Gas Turbine Engineering Handbook / P. Boyce Meherwan.* – Elsevier Inc., 2006. – 936 p.

3. Носач В.Г. Энергия топлива / В.Г. Носач; Отв. ред. А.Е. Еринов; АН УССР, институт технической теплофизики. – К.: Наук. думка, 1989. – 148 с.

4. Adelman S.T. A Methane-Steam Reformer for a Basic Chemically Recuperated Gas Turbine / S.T. Adelman, M.A. Hoffman, J.W. Baughn // *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*. – 1995. – Vol. 117. – P. 16-23.

5. Ткач М.Р. Моделирование влияния условий эксплуатации на эффективность газотурбинных энергетических установок специализированных су-

дов / М.Р. Ткач // *Вестник двигателестроения*. – № 2/2004. – С. 13-17.

6. Романовський Г.Ф. Теоретичні основи проектування суднових газотурбінних агрегатів / Г.Ф. Романовський, М.В. Ващиленко, С.І. Сербин. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 304 с.

7. Performance evaluation of chemically recuperated gas turbine (CRGT) power plants fuelled by dimethyl-ether (DME) / Daniele Cocco, Vittorio Tola, Giorgio Cau // *Energy* 31 (2006). – P. 1446-1458.

Поступила в редакцию 28.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Г. Тимошевский, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ З ТЕРМОДИНАМІЧНОЮ Й ТЕРМОХІМІЧНОЮ РЕГЕНЕРАЦІЄЮ ТЕПЛА ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ

М.Р. Ткач, О.К. Чередніченко

Виконано зіставлення показників варіантів ГТУ різного конструктивного виконання зі спільною термодинамічною й термохімічною регенерацією. Показано, що схема з розміщеними послідовно за турбокомпресорним блоком регенератором і термохімічним реактором характеризується потенційною температурою реакції в діапазоні 530–580 К, що істотно обмежує можливості вибору палив. Схема з послідовно розміщеними за турбокомпресорним блоком термохімічним реактором і регенератором дозволяє розширити можливості конверсії палива, але характеризується гіршими показниками ефективності.

Ключові слова: газотурбінний двигун, термохімічна регенерація, температура конверсії палива, регенерація теплоти відпрацьованих газів, питома витрата палива, альтернативні палива.

EFFICIENCY OF GAS-TURBINE INSTALLATION WITH THERMODYNAMICS AND THERMOCHEMISTRY REGENERATION OF WARMTH OF EXHAUST GASES

M.R. Tkach, A.K. Cherednichenko

The state of comparison of parameters of variants GTU of a various design to joint thermodynamic and thermochemical regeneration is executed. It is shown, that the scheme with placed consistently for turbocompressor a regenerator and a thermochemical reactor is characterized by potential temperature of reaction in a range 530–580 K, that essentially limits opportunities of a choice fuel. The scheme with consistently placed behind the turbocompressor a thermochemical reactor and a regenerator allows to expand opportunities of conversion of fuel, but is characterized by the worst parameters of efficiency.

Key words: gas turbine engine, thermochemical regeneration, temperature of conversion of fuel, regeneration of heat of departing gases, the specific charge of the fuel, alternative fuel.

Ткач Михайл Романович – д-р техн. наук, зав. кафедрой теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: M.Tkach@usmtu.edu.ua.

Чередніченко Александр Константинович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судовых и стационарных энергетических установок Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: A_Cherednichenko@nuos.edu.ua.