

УДК 621.438

МАТВЕЕНКО В.Т., ОЧЕРЕТЯНЫЙ В.А.

Севастопольский национальный технический университет

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ СЛОЖНОГО ЦИКЛА С ТУРБИНОЙ ПЕРЕРАСШИРЕНИЯ

Розглянуто когенераційні газотурбінні установки складного циклу з турбіною перерозширення та ефективним ККД у діапазоні 40...50 %, ступенем використання теплоти палива в 80...88 %, питомою потужністю в 1,5 рази більшою, ніж ГТД із регенерацією теплоти.

Рассмотрены когенерационные газотурбинные установки сложного цикла с турбиной перерасширения и эффективным КПД в диапазоне 40...50 %, степенью использования располагаемой теплоты топлива 80...88 %, удельной мощностью в 1,5 большей, чем ГТД с регенерацией теплоты.

We consider gas turbine units of a complex cycle with an overexpansion turbine, an efficiency within the range 40–50%, a degree of the use of the fuel energy of 80–88%, and a specific power 1,5 times as great as that for a gas turbine with heat regeneration.

\bar{C}_p – удельная теплоемкость;

G – массовый расход;

H – удельная работа;

k – показатель адиабаты;

$m = (k - 1)/k$ – показатель степени;

Q – удельная теплота;

S – энтропия;

T – температура;

π – степень повышения давления в компрессоре и расширения газа в турбине;

η – КПД турбомашин;

σ – степень регенерации теплоты;

ε – относительные потери давления в проточной части двигателя;

ГТД – газотурбинный двигатель;

ГТУ – газотурбинная установка;

ДК – дожимающий компрессор;

КС – камера сгорания;

КСП – промежуточная камера сгорания;

ПП – промежуточный подогрев;

Р – регенерация;

СТП – силовая турбина перерасширения;

ТКУ – турбокомпрессорный утилизатор;

ТП – турбина перерасширения.

Индексы:

в – воздух;

во – охлаждающий воздух;

г – газ;

дк – дожимающий компрессор;

к – компрессор;

м – механический;

см – смесь;

т – турбина;

тк – турбина компрессора;

тт – теплотехнический.

Введение

Энергетический газотурбинный двигатель и установка в целом должны обладать высокой энергоэффективностью. Одновременно энергетическая газотурбинная установка должна обладать высокой удельной мощностью, особенно если она работает по усложненному циклу. Требование обеспечения высокой удельной мощности ГТУ возможно реализовать посредством проме-

жуточного подогрева газа перед силовой турбиной в сочетании с перерасширением газа за ней.

Повышение эффективного КПД ГТД возможно за счет применения турбины перерасширения и регенерации теплоты.

В работе [1] показано, что эффективный КПД ГТД с ТП и Р при всех значениях начальной температуры газа и оптимальных степенях повышения давления в двигателях выше, чем в ГТД простого цикла, на 25 % относительных.

На рис. 1 изображена схема ГТД сложного цикла с промежуточным подогревом газа и силовой турбиной перерасширения. ПП газа производится в промежуточной камере сгорания. Теплота от газа после СТП передается в регенераторе сжатому в компрессоре воздуху перед камерой сгорания. Далее, газ подается в охладитель газа, который в когенерационной установке выполняет роль теплогенератора.

Введение промподогрева газа в ГТД с ТП и Р повышает удельную мощность двигателя. Исследования характеристик циклов ГТД сложных циклов [2] показали, что относительное увеличение удельной мощности в цикле ГТД с ПП, СТП и Р по отношению к ГТД простого цикла составляет 50 %.

Когенерационная ГТУ в целом должна обладать высоким уровнем использования теплоты топлива при работе установки. Такую задачу в когенерационной ГТУ сложного цикла решает турбокомпрессорный утилизатор, который образован турбиной перерасширения совместно с дожимающим компрессором и охладителем газа между ними.

Метод решения задачи

На диаграмме Т-S (рис. 2) представлен цикл когенерационной ГТУ сложного цикла с ПП, СТП и регенерацией теплоты. Температура газа перед СТП $T_{3,2}$ равна T_3 , где T_3 – начальная температура газа в двигателе.

Параметры рабочего цикла в проточной части ГТД сложного цикла приведены в работе [2], где предложена математическая модель цикла высокотемпературного ГТД с ПП, СТП и Р.

Располагаемая удельная теплота в процессе (9-б), которая может быть направлена на теплофикацию от охладителя газа в ГТД с ПП, СТП и Р равна:

$$Q_T = (\bar{c}_{p5}T_5 - \bar{c}_{p6}T_6) - \sigma(\bar{c}_{p5}T_5 - \bar{c}_{p2}T_2) = T_1 \bar{c}_{pr} \mu_r \{ (\mu_5 \Theta_5 - \mu k_T) - \sigma(\mu_5 \Theta_5 - \mu \Theta_2) \}, \quad (1)$$

где $\mu_5 = \bar{c}_{p5} / \bar{c}_{pr3} = (T_5 / T_3)^{0,12}$; $\mu_r = c_{pr3} / \bar{c}_{pr3}$; $\Theta_5 = T_5 / T_1$; $\Theta_2 = T_2 / T_1$; $k_T = T_6 / T_1$; $\bar{c}_{p6} \approx \bar{c}_{p2}$ и

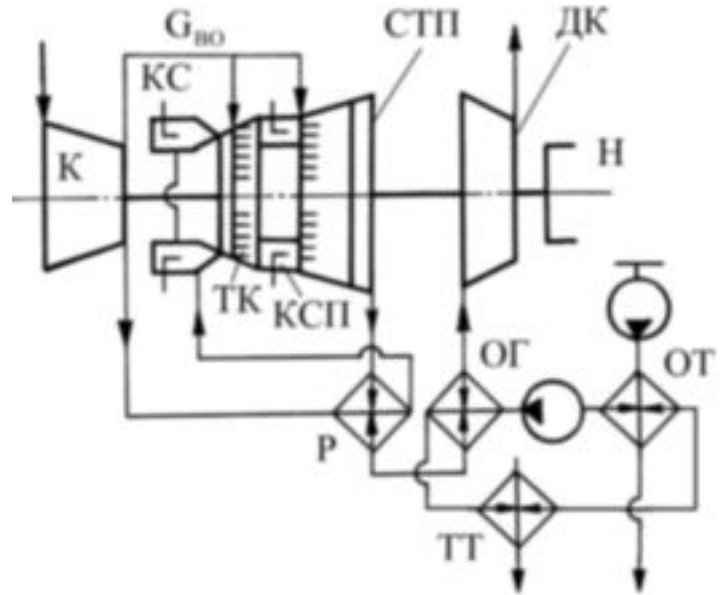


Рис. 1. Схема когенерационной ГТУ сложного цикла с турбиной перерасширения:

К – компрессор; КС – камера сгорания; ТК – турбина компрессора; КСП – камера сгорания промежуточная; СТП – силовая турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор; Р – регенератор; ОГ – охладитель газа, ТТ – теплофикационный теплообменник; ОТ – охладитель теплоносителя.

$$\mu = \bar{c}_{p2} / \bar{c}_{pr3} = (T_2 / T_3)^{0,12}.$$

Значения температур газа в формуле (1) принимают следующими:

$$T_2 = T_1 \left[1 + (\pi_k^m - 1) / \eta_k \right]; \quad T_5 = T_4 \left[1 - \eta_{т2} (1 - \pi_{т2}^n) \right].$$

Отметим, что $\pi_{стп} = \pi_{т1} \pi_{т2} = \epsilon_n \pi_k \pi_{дк} / \pi_{тк}$, где ϵ_n – коэффициент, учитывающий потери давления в трактах проточной части двигателя.

Для оценки теплотехнических характеристик ГТД с ПП, СТП и Р, имеющих в своем составе устройство для внешней утилизации теплоты, применяется удельный показатель – теплотехнический (общий) КПД, который определяется по формуле:

$$\eta_{тт} = (\eta_m H_{п} + Q_T) / (Q_1 + Q_2 - Q_p), \quad (2)$$

где $H_{п} = H_{стп} - H_{дк}$ – удельная полезная работа;

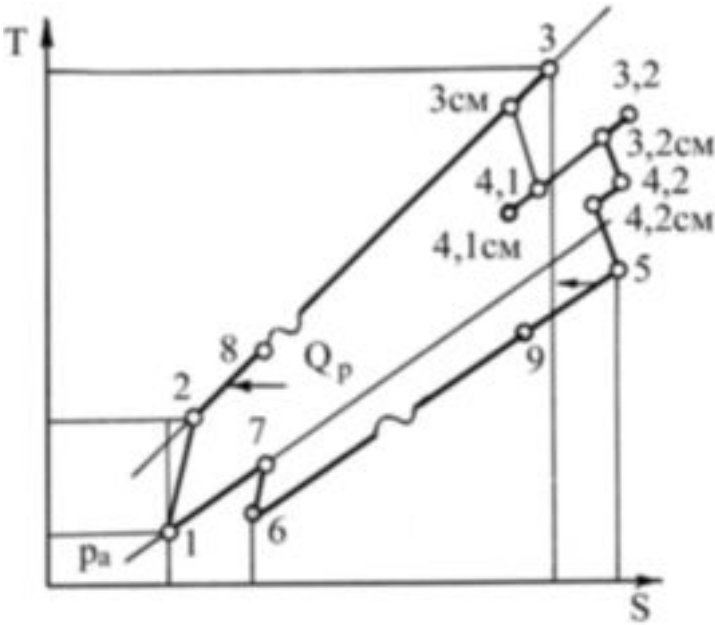


Рис. 2. Цикл ГТД с промежуточным подогревом газа, турбиной перерасширения и регенерацией теплоты.

Q_T – удельная полезная теплота (определяется по формуле (1))

$$H_{СТП} = B[(1 - \bar{G}_{во2} / 3)\mu_{гсм} \Theta_{3,2} \eta_{тк}(1 - \pi_{тк}^{-n}) + \Theta_{см2} \eta_{т2}(1 - \pi_{т2}^{-n})] - \text{удельная работа СТП,}$$

здесь $\pi_{тк} = \pi_{т1}$, $B = \bar{c}_{pг3} T_1$.

$$H_{дк} = B [\mu k_T (\pi_{дк}^m - 1) / \eta_{дк}] - \text{удельная работа ДК}$$

в процессе (6-7),

$$Q_1 = B(1 - \bar{G}_{во}) \{ \Theta - \mu [1 + (\pi_{к}^m - 1) / \eta_{к}] \} - \text{удельная}$$

теплота подогрева воздуха в КС без учета регенерации теплоты в процессе (2-3),

$$Q_2 = B(1 - \bar{G}_{во2})(\Theta - \Theta_{см1}) - \text{теплота подогрева}$$

газа в КСП в процессе (4,1_{см}-3,2),

$$Q_p = B \sigma (1 - \bar{G}_{во}) \{ \Theta_{см2} [1 - \eta_{т2}(1 - \pi_{т2}^{-n})] - \mu [1 + (\pi_{к}^m - 1) / \eta_{к}] \} - \text{теплота подогрева воздуха перед}$$

КС за счет регенерации в процессе (2-8).

Величины относительных значений температур следующие: $\Theta = T_3 / T_1$; $\Theta_{см1} = T_{4,1см} / T_1$; $\Theta_{см2} = T_{4,2см} / T_1$; $\Theta_{см3,2} = T_{3,2см} / T_1$.

Результаты исследований

Анализ теплотехнических характеристик ГТД с ПП, СТП и Р производился при изменении ве-

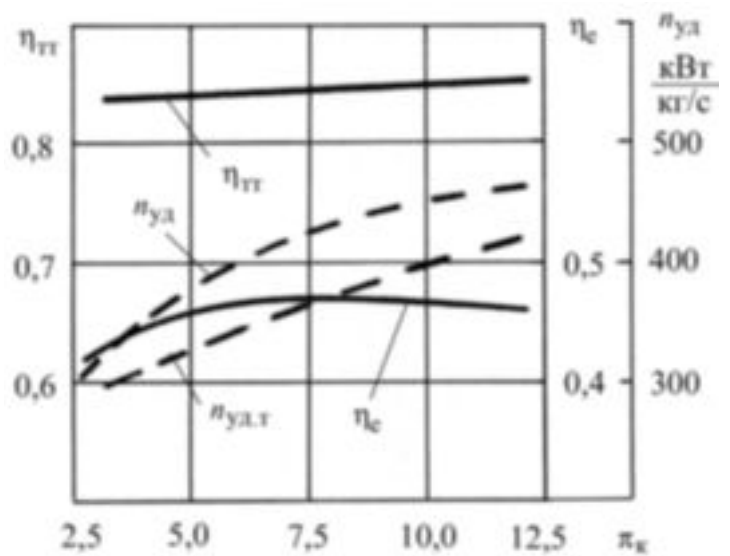


Рис. 3. Зависимости теплотехнического $\eta_{тт}$ и эффективного η_e КПД, а также удельных мощностей $n_{уд}$ и $n_{уд.т}$ для ГТД с ПП, СТП и Р от изменения π_k при $T_3 = 1473$ К, $\pi_{дк} = 2,25$ и $\sigma = 0,8$.

личины степени повышения давления в компрессоре π_k , различных начальных температурах газа T_3 , степени регенерации теплоты σ , а также изменении степени перерасширения газа в силовой турбине и следующих исходных данных:

$$\eta_k = 0,87; \quad \eta_{тк} = 0,86; \quad \bar{G}_{во} = 0,07...0,17;$$

$$\eta_{дк} = 0,87; \quad \eta_T = 0,92; \quad \epsilon = 0,8;$$

$$T_1 = 288 \text{ К}; \quad T_6 = 323; \quad T_3 = 1223...1573 \text{ К}.$$

Величина степени регенерации принималась от 0,75 до 0,85, а $\pi_{дк}$ от 1,75 до 3,0.

На рис. 3 показаны зависимости теплотехнического ($\eta_{тт}$) и эффективного (η_e) КПД, а также удельной теплофикационной мощности и удельной мощности цикла ГТД с ПП, СТП и Р от изменения степени повышения давления π_k в двигателе при $\pi_{дк} = 2,25$, $\sigma = 0,8$ и начальной температуре газа $T_3 = 1473$ К.

Из представленных зависимостей на рис. 3 видно, что в зоне оптимальных по η_e степенях повышения давления в двигателе $\eta_{тт}$ достигает значений 0,83...0,85. С увеличением π_k теплотехнический КПД несколько растет. При увеличении начальной температуры газа T_3 в двигателе в зоне оптимальных η_e теплотехнический КПД растет в пределах 0,83...0,88.

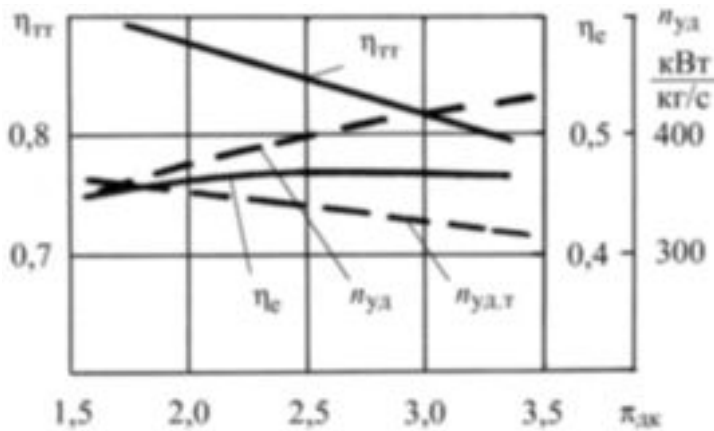


Рис. 4. Зависимости теплотехнического $\eta_{тт}$ и эффективного η_e КПД, а также удельных мощностей $n_{уд}$ и $n_{уд,т}$ для ГТД с ПП, СТП и Р от изменения $\pi_{дк}$ при $T_3 = 1473$ К, $\pi_k = 7$ и $\sigma = 0,8$.

Если в ГТД простого цикла максимальное значение удельной мощности достигается при меньших значениях π_k , чем π_k оптимальное для η_e , то в ГТД с ПП, СТП и Р $n_{уд}$ растет с увеличением π_k . С такой же интенсивностью увеличивается удельная тепловая мощность $n_{уд,т}$ с ростом π_k . При изменении π_k от 5 до 10 $n_{уд,т}$ возрастает в 1,25 раза при незначительном изменении эффективного КПД двигателя.

На рис. 4 изображены зависимости теплотехнического и эффективного КПД, а также удельных мощностей в ГТД с ПП, СТП и Р от изменения $\pi_{дк}$ при оптимальном значении π_k .

Ранее [2] закономерности изменения $\eta_e = f(T_3, \pi_{дк})$ показали, что оптимальные значения $\pi_{дк}$ составляют 2,25...2,75. При уменьшении $\pi_{дк}$ несколько падает величина η_e , однако наблюдается интенсивный рост $\eta_{тт}$. Поэтому, выбрав $\pi_{дк}$ в пределах 1,8...2,2 и потеряв примерно 0,2...0,4 % по экономичности на валу двигателя, получим увеличение $\eta_{тт}$ до 4 %. Уменьшение $\pi_{дк}$ положительно влияет на интенсификацию теплообмена в регенераторе,

уменьшает габариты проточной части охладителя газа.

В целом теплотехнический КПД с изменением степени регенерации σ остается практически на прежнем уровне, хотя эффективный КПД двигателя при этом растет и может при $T_3 = 1473$ К, $\sigma = 0,85$ и $\pi_{дк} = 2,5$ достигнуть 50 %.

Выводы

1. Усложнение цикла ГТД с регенерацией путем введения промподогрева и перерасширения газа за силовой турбиной позволяет существенно улучшить теплотехнические характеристики ГТУ.

2. Теплотехнический КПД ГТД с ПП, СТП и Р в зависимости от температуры газа в двигателе составляет 83...88 %, что соответствует современным требованиям технологий энергосбережения.

3. ГТД сложного цикла с турбиной перерасширения является установкой когенерационного типа с высоким уровнем использования теплоты топлива, а также большей долей выработки электрической энергии по сравнению с когенерационной установкой, выполненной на базе ГТД простого цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев В.Т., Куркин И.А. Результаты исследования характеристик циклов судовых ГТД с турбиной перерасширения и регенерацией теплоты // Вестник СевГТУ: Сб. научн. трудов. — Севастополь, 1998. — Вып 15. — С. 103—105.

2. Матвеев В.Т. Характеристики циклов когенерационной газотурбинной установки с промежуточным подогревом газа, турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты // Пром.теплотехника. — 2003. — Т. 25, № 5. — С. 41—44.

Получено 03.10.2005 г.