

УДК 621.438: 621.11

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2014 А.Н. Гришин, В.А. Слесарев

Уфимский государственный авиационный технический университет

Поступила в редакцию 29.11.2014

Предлагается активная система охлаждения высокотемпературного газотурбинного двигателя, в которой в качестве источника энергии используется парогазовая установка. Выполнено сопоставление расчетных значений термического КПД для двух аналогичных газотурбинных двигателей с активными системами охлаждения, но имеющих в качестве источника энергии системы охлаждения в первом случае газотурбинную установку, а во втором случае парогазовую установку. Доказано, что при использовании в качестве источника энергии парогазовой установки термический КПД газотурбинного двигателя имеет более высокое значение.

Ключевые слова: *высокотемпературный газотурбинный двигатель, система охлаждения, газотурбинная установка, парогазовая установка, термический КПД, теплообменник-парогенератор, регенератор, холодильник, инжектор, теплота, удельная работа*

В высокотемпературном газотурбинном двигателе (ГТД) с большой степенью повышения давления в компрессоре возникает проблема надежного и экономичного охлаждения горячих деталей проточной части. Эта проблема может быть решена в ГТД с активной системой охлаждения (СО) турбины [1]. Схема ГТД с такой СО приведена на рис. 1. Источником энергии в ней является газотурбинная установка (ГТУ), содержащая компрессор 4, камеру сгорания 5 и турбину 6. Воздух отбирается за компрессором 1 ГТД и охлаждается в теплообменнике-парогенераторе 8. Часть его поступает в компрессор 4, камеру сгорания 5 и турбину 6 ГТУ. Из ГТУ продукты сгорания подводятся в камеру сгорания 2 ГТД. Оставшаяся часть воздуха поступает в компрессор 7 системы охлаждения, сжимается в нем, а затем охлаждается в теплообменнике-парогенераторе 9. Из него воздух подается в каналы охлаждения 10 открытой СО турбины 3 ГТД. Благодаря повышению давления охлаждающего воздуха, существенно интенсифицируется процесс теплообмена в каналах охлаждения газовой турбины [1-7].

Теплота воздуха теплообменников-парогенераторов 8, 9 используется для генерации пара в паротурбинной установке (ПТУ), являющейся дополнительным источником энергии СО. Схема одного из вариантов ПТУ приведена на

рис. 2. В качестве рабочего тела в ней может использоваться органическое рабочее тело с положительным наклоном пограничной кривой пара в Т-*s* координатах. В этом случае процесс расширения рабочего тела будет всегда заканчиваться в области перегретого пара, а, следовательно, будет отсутствовать проблема снижения КПД турбины и эрозии её лопаток из-за появления конденсата. Большинство таких рабочих тел имеет низкую температуру плавления и достаточно высокую температуру термического разложения. Например, для органического рабочего тела СР-25 $t_{пл} = -95^{\circ}\text{C}$, $T_{т.р.} = 753\text{K}$ [8].

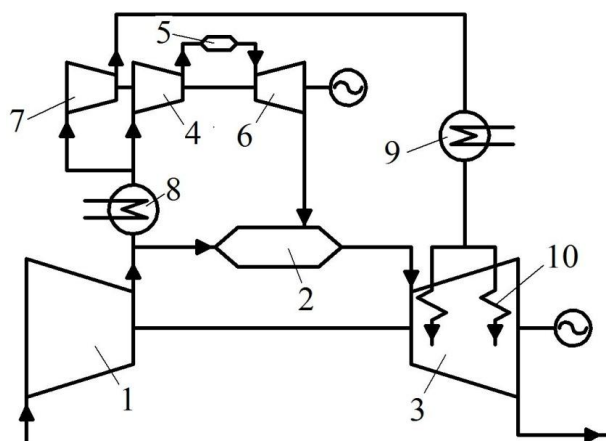


Рис. 1. Схема ГТД с активной системой охлаждения:

1, 2, 3 – компрессор, камера сгорания и турбина ГТД; 4, 5, 6 – компрессор, камера сгорания и турбина ГТУ; 7, 8, 9, 10 – компрессор, теплообменники-парогенераторы и каналы охлаждения СО

Гришин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент

Слесарев Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: VASSAV55@mail.ru

ПТУ получает теплоту из теплообменников ГТУ и СО. Поэтому источником энергии СО становится парогазовая установка (ПГУ). Пар из теплообменников-парогенераторов 8, 9 поступает в ступень высокого давления 11 и ступень низкого давления 12 паровой турбины, охлаждающаяся после расширения в них соответственно в регенераторах 14 и 15. После этого он подается в

конденсирующий инжектор 13. Одна часть полученного в нем конденсата с помощью насоса 17 подается через охлаждающие стороны регенераторов 15 и 14 в теплообменники-парогенераторы 8, 9. Другая часть насосом 18 прокачивается через холодильник 16 и поступает в конденсирующий инжектор 13.

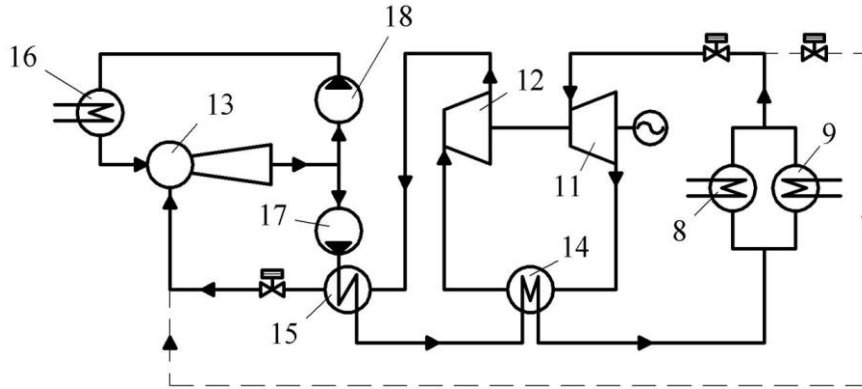


Рис. 2. Схема ПТУ источника энергии активной системы охлаждения: 8, 9 – теплообменники-парогенераторы; 11, 12 – ступени паровой турбины; 13 – конденсирующий инжектор; 14, 15 – регенераторы; 16 – холодильник; 17, 18 – насосы

Применение теплообменников-парогенераторов со змеевиковыми парогенерирующими каналами и конденсирующего инжектора обеспечивает надежную работу ПТУ при любых положениях летательного аппарата в пространстве и знакопеременных перегрузках. ПТУ с органическими рабочими телами находят применение в космических и глубоководных радиоизотопных энергоустановках, имеют большой ресурс и высокую надежность работы [8]. При использовании в качестве источника энергии СО только ГТУ термический КПД ГТД равен:

$$\eta_{\Sigma}^{\text{ГТУ}} = \frac{\ell + \ell_{\text{ГТУ}}}{\ell + \ell_{\text{ГТУ}} + q_2 + q_{\text{ТО } \Sigma}} = \eta \cdot \frac{(1 + \bar{\ell}_{\text{ГТУ}})}{\left(1 + \frac{\eta}{\eta_a^{\text{ГТУ}}} \cdot \bar{\ell}_{\text{ГТУ}}\right)}, \quad (1)$$

где ℓ , $\ell_{\text{ГТУ}}$ – удельные полезные работы ГТД и ГТУ (отнесены к величине расхода воздуха через ГТД); q_2 – удельная теплота, отводимая из цикла ГТД; $q_{\text{ТО } \Sigma} = (q_{\text{ТО}} + q_{\text{ТО СО}})$ – удельная теплота, отводимая из теплообменников ГТУ и СО; $\bar{\ell}_{\text{ГТУ}} = \ell_{\text{ГТУ}} / \ell$ – относительная работа ГТУ; $\eta_a^{\text{ГТУ}} = \ell_{\text{ГТУ}} / (\ell_{\text{ГТУ}} + q_{\text{ТО } \Sigma})$ – коэффициент преобразования дополнительно подведенной теплоты в дополнительную полезную работу [2]; $\eta = \ell / (\ell + q_2)$ – термический КПД ГТД с

идеализированной СО (не учитываются дополнительные затраты тепловой и механической энергии на её функционирование).

Если в качестве источника энергии СО используется ПГУ, то термический КПД ГТД можно найти по формуле:

$$\eta_{\Sigma}^{\text{ПГУ}} = \frac{\ell + \ell_{\text{ПГУ}}}{\ell + \ell_{\text{ПГУ}} + q_2 + q_x} = \eta \cdot \frac{(1 + \bar{\ell}_{\text{ПГУ}})}{\left(1 + \frac{\eta}{\eta_a^{\text{ПГУ}}} \cdot \bar{\ell}_{\text{ПГУ}}\right)}, \quad (2)$$

где $\ell_{\text{ПГУ}}$ – удельная полезная работа ПГУ (отнесена к величине расхода воздуха через ГТД); q_x – удельная теплота, отводимая из цикла ПТУ через холодильник; $\bar{\ell} = \ell_{\text{ПГУ}} / \ell$ – относительная работа ПГУ; $\eta_a^{\text{ПГУ}} = \ell_{\text{ПГУ}} / (\ell_{\text{ПГУ}} + q_x)$ – коэффициент преобразования дополнительно подведенной теплоты в дополнительную полезную работу.

Коэффициент преобразования дополнительно подведенной теплоты в дополнительную полезную работу $\eta_a^{\text{ПГУ}}$ может быть приведен к виду:

$$\eta_a^{\text{ПГУ}} = \frac{1}{1 + \frac{\ell_{\text{ПГУ}}}{\ell_{\text{ПГУ}}} \cdot \frac{(1 - \eta_{\text{ПГУ}})}{\eta_{\text{ПГУ}}}}, \quad (3)$$

где $\ell_{\text{пгу}}$ – удельная работа ПГУ;
 $\eta_{\text{пгу}} = \ell_{\text{пгу}} / q_{\text{то } \Sigma}$ – термический КПД ПГУ;
 $q_{\text{то } \Sigma} = (q_{\text{то}} + q_{\text{то со}})$ – удельная теплота, передаваемая в теплообменниках-парогенераторах от воздуха к органическому рабочему телу.

Приближенно можно принять $\eta_{\text{пгу}} \approx 0,3$ [8]. Обычно в ПГУ утилизационного типа отношение $\ell_{\text{пгу}} / \ell_{\text{гтд}} \approx 0,3$. В этом случае из формулы (3) получим следующую оценку величины коэффициента преобразования дополнительно подведенной теплоты в дополнительную полезную работу $\eta_a^{\text{пгу}} \approx 0,59$. Термический КПД современных ГТД равен величине $\eta \approx 0,3-0,4$. Тогда из формулы (2) следует неравенство:

$$\eta_{\Sigma}^{\text{пгу}} > \eta. \quad (4)$$

Так как величина η характеризует термический КПД ГТД с идеализированной СО, в которой не учитываются дополнительные затраты тепловой и механической энергии на её функционирование, то $\eta > \eta_0$, где η_0 – термический КПД ГТД с обычной пассивной СО (с отбором мощности для привода компрессора СО от коробки агрегатов ГТД).

Учтя неравенства $\eta_a^{\text{пгу}} > \eta_a^{\text{гту}}$ и $\ell > \ell_0$, где ℓ_0 – удельная работа ГТД с пассивной СО, можно сделать вывод, что ГТД с активной СО, имеющей источник энергии СО в виде ПГУ, будет

всегда более эффективным по сравнению с ГТД, использующим источник энергии СО в виде ГТУ и тем более эффективным по сравнению с ГТД, имеющим пассивную СО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гришин, А.Н. Активные воздушные системы охлаждения для интенсификации теплообмена в энергетических установках / А.Н. Гришин, В.А. Слесарев // Интенсификация теплообмена: Тр.1-й Рос. нац. конф. по теплообмену. – М.: МЭИ, 1994. Т.8. С. 52-57.
2. Гришин, А.Н. Основы теории рабочих процессов энергетических и энерготехнологических установок с активными вспомогательными системами // Вестник УГАТУ. 2002. Т. 3, №2. С. 119-126.
3. Пат. 18226613 (РФ). Способ работы газотурбинного двигателя / А.Н. Гришин. 1993.
4. Пат. 2064060 (РФ). Способ работы энергетической установки / А.Н. Гришин. 1996. Бюл. №20.
5. Пат. 2064062 (РФ). Способ работы газотурбинной установки / А.Н. Гришин, В.А. Слесарев, О.К. Полев. 1996. Бюл. №20.
6. Пат. 2006631 (РФ). Способ работы высокотемпературного газотурбинного двигателя и высокотемпературный газотурбинный двигатель / А.Н. Гришин. 1994. Бюл. №2.
7. Пат. 2053397 (РФ). Способ работы газотурбинного двигателя / А.Н. Гришин. 1996. Бюл. №3.
8. Гришутин, М.М. Паротурбинные установки с органическими рабочими телами / М.М. Гришутин, А.П. Севастьянов, Л.И. Селезнев, Е.Д. Федорович. – Л.: Машиностроение, 1988. 219 с.

APPLICATION OF STEAM-GAS POWER UNIT AS THE POWER SOURCE OF ACTIVE COOLING SYSTEM OF GAS-TURBINE ENGINE

© 2014 A.N. Grishin, V.A. Slesarev

Ufa State Aviation Technical University

The active cooling system of the high-temperature gas-turbine engine in which as a power source steam-gas unit is used is offered. Comparison of calculated values of thermal efficiency for two similar gas-turbine engines with active cooling systems but having as cooling system power source in the first case the gas-turbine unit, and in the second case steam-gas unit is executed. It is proved that when using as a power source the steam-gas unit the thermal efficiency of gas-turbine engine has higher value.

Key words: high-temperature gas-turbine engine, cooling system, gas-turbine unit, steam-gas unit, thermal efficiency, heat exchanger steam generator, regenerator, refrigerator, injector, heat, specific work