

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ГТД С ОДНО- И ДВУХСТУПЕНЧАТЫМ ОТВОДОМ И ПОДВОДОМ ТЕПЛА ПРИ РАВЕНСТВЕ ИХ ЭФФЕКТИВНЫХ КПД

Иванов В.А.

ОАО «АВИАДВИГАТЕЛЬ», г. Пермь

Обозначения:  $L$  - работа;  $Q$  подведенное тепло;  $\eta$  коэффициент полезного действия (КПД);  $T$  - температура;  $p$  - давление;  $\theta$  - степень повышения температуры в цикле;  $\pi$  - степень сжатия (расширения);  $k$  - показатель адиабаты;  $R$  - газовая постоянная;  $\Delta$  - приращение параметра; в.у - входное устройство; в.о - воздухоохладитель; к - компрессор; к.с - камера сгорания; т - турбина; вых.у - выходное устройство; с - сжатие; р - расширение; н.п - невозмущенный поток; \* - параметры заторможенного потока;  $\Sigma$  - общий; пр - приведенный; е - эффективный; s - изэнтропический; опт - оптимальный; в - воздух; г - газ; 1-1 цикл с одноступенчатым отводом тепла в компрессоре и одноступенчатым подводом тепла в турбине (простой цикл); 1-2 - цикл с одноступенчатым отводом тепла в компрессоре и двухступенчатым подводом тепла в турбине; 2-1 - цикл с двухступенчатым отводом тепла в компрессоре и одноступенчатым подводом тепла в турбине; 2-2 цикл с двухступенчатым отводом тепла в компрессоре и двухступенчатым подводом тепла в турбине; 1 - первая ступень сжатия (входное устройство и первый компрессор) и расширения (первая турбина); 2 - вторая ступень сжатия (второй компрессор) и расширения (вторая турбина и выходное устройство).

В работе [1] сравнивалась эффективность реальных циклов ГТД с одно- и двухступенчатым подводом тепла в турбине при условии равенства эффективных КПД и степени сжатия сравниваемых циклов. Эффективность циклов ГТД определяется соотношением эффективной работы и эффективного КПД циклов.

В настоящей работе при упомянутом условии сравнивается эффективность простого цикла ГТД с одноступенчатым отводом и подводом тепла и сложного цикла ГТД с двухступенчатым отводом и подводом тепла. Последний цикл реализован в наземных энергетических ГТУ сложного цикла [2] с охлаждением воздуха посредством воды, а также может быть реализован в авиационных ГТД в случае использования криогенного топлива, которое перед сгоранием используется для охлаждения воздуха. Рассматриваемые схемы ГТД показаны на рис. 1. В общем случае часть работы турбины может передаваться на воздушный винт или наземные агрегаты, в частном

случае имеем одновалный турбокомпрессор, который может служить газогенератором в более сложных ГТД со свободной турбиной.

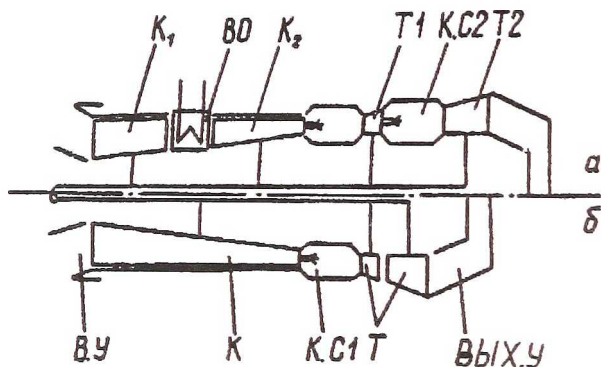


Рис. 1. Схемы ГТД с одно (б)- и двухступенчатым (а) отводом и подводом тепла

Введем обозначения:  $\theta = T_{г}^*/T_{н.п}$ ;  $\theta_1 = T_{г1}^*/T_{н.п}$ ;  $\theta_2 = T_{г2}^*/T_{н.п}$ ;  $\pi_{\Sigma} = \pi_{c1}\pi_{c2} = P^*/P_{н.п}$ ;  $e = \pi_{\Sigma}^{(k-1)/k}$ ;  $e_{c1} = \pi_{c1}^{(k-1)/k}$ ;  $e_{c2} = \pi_{c2}^{(k-1)/k}$ ;  $e_{p1} = \pi_{p1}^{(k-1)/k}$ ;  $e_{p2} = \pi_{p2}^{(k-1)/k}$ , где принято  $k = k_{в} = 1,4$ .

Пусть двухступенчатый отвод тепла в компрессоре и двухступенчатый подвод тепла в турбине увеличивают количество подведенного в цикле тепла (соответственно в первой и второй камерах сгорания) на величину  $\Delta Q$ , а работу цикла - на величину  $\Delta L_e$ . Тогда для эффективного КПД такого цикла можно записать следующее выражение:

$$\eta_{e2-2} = \frac{L_{e\text{пр}2-2}}{Q_{\text{пр}2-2}} = \frac{L_{e\text{пр}1-1} + \Delta L_{e\text{пр}}}{Q_{\text{пр}1-1} + \Delta Q_{\text{пр}}} = \eta_{e1-1} \frac{1 + \Delta L_{e\text{пр}}/L_{e\text{пр}1-1}}{1 + \Delta Q_{\text{пр}}/Q_{\text{пр}1-1}}, \quad (1)$$

где  $\eta_{e1-1} = L_{e\text{пр}1-1}/Q_{\text{пр}1-1}$ ,  $L_{e\text{пр}} = L_e / \left(\frac{k}{k-1} R T_{н.п}\right)$ ,

$$Q_{\text{пр}} = Q / \left(\frac{k}{k-1} R T_{н.п}\right).$$

Очевидно, условие равенства эффективных КПД сравниваемых циклов  $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$  будет выполняться, если  $\Delta L_{e\text{пр}}/L_{e\text{пр}1-1} = \Delta Q_{\text{пр}}/Q_{\text{пр}1-1}$ , или:

$$\Delta L_{e\text{пр}} = \eta_{e1-1} \Delta Q_{\text{пр}}. \quad (2)$$

Выразим  $\Delta L_{\text{emp}}$ ,  $\Delta Q_{\text{пр}}$  через параметры простого цикла и независимые переменные  $e_{c1}$ ,  $e_{p1}$ , обеспечивающие принятое условие сравнения циклов. С этой целью найдем выражение для эффективной работы, подведенного тепла и эффективного КПД цикла с двухступенчатым отводом и подводом тепла при условии равенства температур воздуха (газа) на входе в первую и вторую ступени сжатия (расширения). Последнее условие соответствует равенству  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$  ( $T_{r1} = T_{r2} = T_r$ ).

Эффективную работу цикла найдем как разность действительных работ расширения и сжатия в первой и второй ступенях:

$$L_{e2-2} = L_{p1s} \eta_{p1} + L_{p2s} \eta_{p2} - L_{c1s} / \eta_{c1s} - L_{c2s} / \eta_{c2s}, \quad (3)$$

где изэнтропические работы сжатия и расширения определим по известным формулам

$$L_{c1s} = \frac{k}{k-1} R T_{\text{н.п}} (\pi_{c1}^{(k-1)/k} - 1), L_{c2s} = \frac{k}{k-1} R T_{\text{н.п}} (\pi_{c2}^{(k-1)/k} - 1),$$

$$L_{p1s} = \frac{k_r}{k_r - 1} R_r T_r \left(1 - \frac{1}{\pi_{p1}^{(k_r-1)/k_r}}\right), L_{p2s} = \frac{k_r}{k_r - 1} R_r T_r \left(1 - \frac{1}{\pi_{p2}^{(k_r-1)/k_r}}\right).$$

Тогда получим следующую формулу для эффективной работы цикла с двухступенчатым отводом и подводом тепла:

$$L_{e2-2} = \frac{k}{k-1} R T_{\text{н.п}} \left\{ \theta \left[ m_1 \left(1 - \frac{1}{e_{p1}}\right) \eta_{p1} + m_2 \left(1 - \frac{1}{e_{p2}}\right) \eta_{p2} \right] - \frac{e_{c1} - 1}{\eta_{c1}} - \frac{e_{c2} - 1}{\eta_{c2}} \right\}, \quad (4)$$

где коэффициенты  $m_1$ ,  $m_2$  учитывают различие параметров воздуха и газа в первой и второй ступенях расширения [1].

Количество подведенного в цикле тепла определим как сумму тепла, подведенного в первой и второй камерах сгорания [1]:

$$Q_{2-2} = \frac{k}{k-1} R T_{\text{н.п}} \left[ m_{r2-1} \left( \theta - \frac{e_{c2} - 1}{\eta_{c2}} - 1 \right) + m_{r1-2} \theta \left( 1 - \frac{1}{e_{p1}} \right) \eta_{p1} \right], \quad (5)$$

где коэффициенты  $m_{r2-1}$ ,  $m_{r1-2}$  учитывают различие между условной теплоемкостью газа в первой и второй камерах сгорания и теплоемкостью воздуха.

Тогда получим следующую формулу для эффективного КПД цикла с двухступенчатым отводом и подводом тепла:

$$\eta_{c2-2} = \frac{\theta[m_1(1 - \frac{1}{e_{p1}})\eta_{p1} + m_2(1 - \frac{1}{e_{p2}})\eta_{p2}] - \frac{e_{c1}-1}{\eta_{c1}} - \frac{e_{c2}-1}{\eta_{c2}}}{m_{r2-1}(\theta - \frac{e_{c2}-1}{\eta_{c2}} - 1) + m_{r1-2}\theta(1 - \frac{1}{e_{p1}})\eta_{p1}} \quad (6)$$

Далее рассмотрим реальные циклы с идеальным газом ( $k_r = k_b = 1,4$ ), для которых можно использовать формулы (4), (5), (6), если принять коэффициенты  $m_1 = m_2 = 1$ ,  $m_{r2-1} = m_{r1-2} = 1$ .

Приведем формулу (4) к виду  $L_{e_{np2-2}} = L_{e_{np1-1}} + \Delta L_{епр}$ , а формулу (5) - к виду  $Q_{np2-2} = Q_{np1-1} + \Delta Q_{пр}$ , где  $L_{e_{np1-1}} = (e-1)(\theta\eta_c\eta_p/e-1)/\eta_c$ ,  $Q_{np1-1} = (\theta - (e-1)/\eta_c - 1)$ . С этой целью к правой части формулы (4) прибавим и отнимем выражение  $\theta\eta_{p2}/e + e/\eta_{c2}$ , а к правой части формулы (5) - выражение  $e/\eta_{c2}$ . Тогда с учетом  $e_{c2} = e/e_{c1}$  и  $e_{p2} = e/e_{p1}$  после преобразований получим следующие выражения:

$$L_{e_{np2-2}} = \frac{e-1}{\eta_{c2}} \left( \frac{\theta\eta_{c2}\eta_{p2}}{e} - 1 \right) + \theta \left( 1 - \frac{1}{e_{p1}} \right) \eta_{p1} - \frac{\theta\eta_{p2}e_{p1}}{e} - \frac{e_{c1}-1}{\eta_{c1}} - \frac{e}{e_{c1}\eta_{c2}} + \frac{\theta\eta_{p2}}{e} + \frac{e}{\eta_{c2}},$$

$$Q_{np2-2} = \left( \theta - \frac{e-1}{\eta_{c2}} - 1 \right) + \theta\eta_{p1} \left( 1 - \frac{1}{e_{p1}} \right) - \frac{e}{e_{c1}\eta_{c2}} + \frac{e}{\eta_{c2}}.$$

Как видно из полученных выражений, при условиях  $\eta_{c2} = \eta_c$  и  $\eta_{p2} = \eta_p$

$$\Delta L_{e_{np}} = \theta\eta_{p1} \left( 1 - \frac{1}{e_{p1}} \right) - \frac{\theta\eta_{p2}e_{p1}}{e} - \frac{e_{c1}-1}{\eta_{c1}} - \frac{e}{e_{c1}\eta_{c2}} + \frac{\theta\eta_{p2}}{e} + \frac{e}{\eta_{c2}}, \quad (7)$$

$$\Delta Q_{np} = \theta\eta_{p1} \left( 1 - \frac{1}{e_{p1}} \right) - \frac{e}{e_{c1}\eta_{c2}} + \frac{e}{\eta_{c2}}. \quad (8)$$

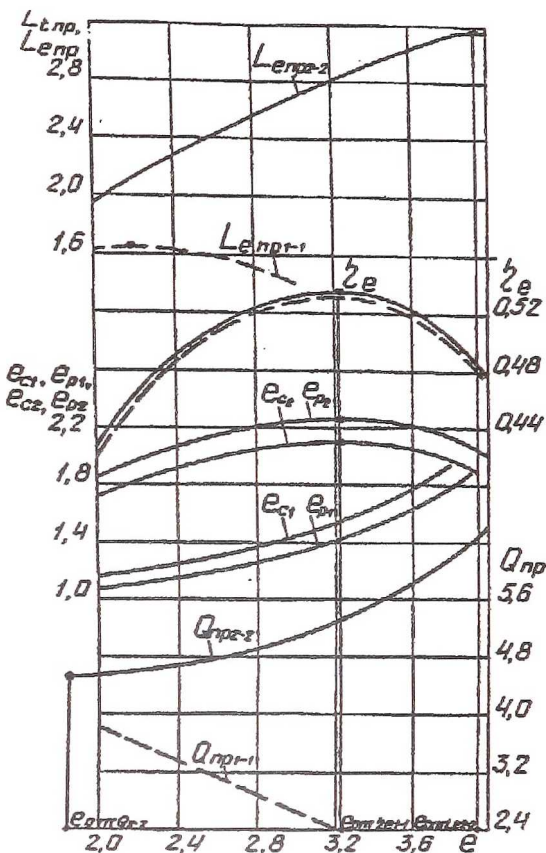


Рис. 2. Зависимость параметров реальных циклов ГТД с одно- и двухступенчатым отводом и подводом тепла от степени сжатия ( $\theta = 6$ ;  $\eta_{c1} = 0,87$ ;  $\eta_{c2} = \eta_c = 0,85$ ;  $\eta_{p1} = 0,89$ ;  $\eta_{p2} = \eta_p = 0,94$ ):

— цикл с двухступенчатым отводом и подводом тепла при условии  $\eta_{c1-1} = \eta_{c2-2}$ ;  
 - - - цикл с одноступенчатым отводом и подводом тепла (простой цикл);  
 • - экстремумы.

Подставив выражения (7) и (8) в уравнение (2) и приняв сначала постоянной величину  $\epsilon_{c1}$ , получим квадратное уравнение относительно переменной  $\epsilon_{p1}$ :

$$\epsilon_{p1}^2 - \left[ \frac{\eta_{p1}}{\eta_{p2}} \epsilon (1 - \eta_{c1-1}) + a \right] \epsilon_{p1} + \frac{\eta_{p1}}{\eta_{p2}} \epsilon (1 - \eta_{c1-1}) = 0,$$

$$\text{где } a = \frac{[\eta_{c1}(1 - \eta_{c1-1}) - \epsilon_{c1} \eta_{c2}] \epsilon (\epsilon_{c1} - 1)}{\theta \eta_{c1} \eta_{c2} \eta_{p2} \epsilon_{c1}} + 1.$$

Решением этого уравнения является подходящий по физическому смыслу корень

$$e_{p1} = \frac{e(1 - \eta_{e1-l}) \eta_{p1} / \eta_{p2} + a}{2} + \sqrt{\left[ \frac{e(1 - \eta_{e1-l}) \eta_{p1} / \eta_{p2} + a}{2} \right]^2 - e(1 - \eta_{e1-l}) \eta_{p1} / \eta_{p2}}. \quad (9)$$

Нетрудно видеть, что при  $a=1$  решением уравнения является более простой корень:

$$e_{p1} = \frac{\eta_{p1}}{\eta_{p2}} e(1 - \eta_{e1-l}). \quad (10)$$

Пусть далее величина  $e_{c1}$  - переменная, обеспечивающая равенство  $a=1$ , которое преобразуем в квадратное уравнение относительно переменной  $e_{c1}$ :

$$e_{c1}^2 - \left[ \frac{\eta_{c1}}{\eta_{c2}} e(1 - \eta_{e1-l}) + 1 \right] e_{c1} + \frac{\eta_{c1}}{\eta_{c2}} e(1 - \eta_{e1-l}) = 0.$$

Решением этого уравнения являются корни  $e_{c1}=1$  и

$$e_{c1} = \frac{\eta_{c1}}{\eta_{c2}} e(1 - \eta_{e1-l}). \quad (11)$$

Последний корень имеет практическое значение.

Тогда условие равенства эффективных КПД сравниваемых циклов  $\eta_{e1-l} = \eta_{e2-2}$  будет выполняться, если переменные величины  $e_{p1}$  и  $e_{c1}$  будут определяться по формулам (10) и (11).

Если принять сначала постоянной величину  $e_{p1}$ , то подобные преобразования относительно переменной  $e_{c1}$  приводят также к формулам (10) и (11).

Используя формулы (10) и (11) для определения параметров  $e_{p1}$  и  $e_{c1}$ , а также известные и полученные формулы для определения эффективного КПД, эффективной работы и подведенного тепла, определим зависимости этих параметров от степени сжатия в сравниваемых циклах в случае идеального газа (рис. 2).

Как видно из рис. 2, в цикле с двухступенчатым отводом и подводом тепла при условии  $\eta_{e1-l} = \eta_{e2-2}$  максимум эффективной работы достигается при степени сжатия большей степени сжатия, соответствующей максимуму эффективного КПД, при которой работа цикла еще увеличивается с большим градиентом. Это является

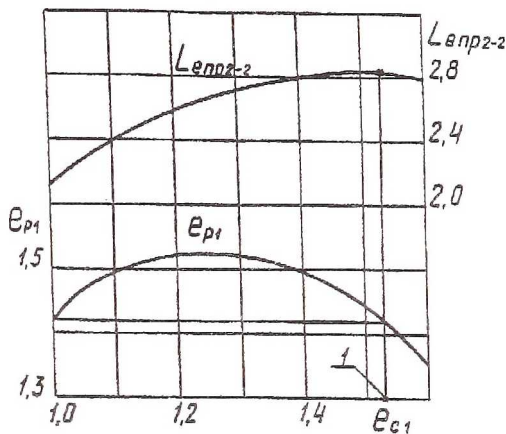


Рис. 3. Зависимость работы цикла с двухступенчатым отводом подводом тепла от степеней сжатия и расширения в первой ступени ( $\eta_{e1} = \eta_{e2-2}$ ,  $e = e_{\text{опт}\eta_{e1-1}}$ , остальные условия см. на рис. 2): • - экстремум.

Если переменную  $e_{c1}$  задавать произвольно (не по формуле (11)), то переменную  $e_{p1}$  следует определять по формуле (9) с учетом величины  $a \neq 1$ . В этом случае, как видно из рис. 3, с уменьшением или увеличением переменной  $e_{c1}$  от ее значения по формуле (11) (точка 1) работа цикла уменьшается от максимального значения.

#### Список литературы

1. Иванов В.А. Исследование эффективности реальных циклов ГТД с одно- и двухступенчатым подводом тепла при равенстве их эффективных КПД //Изв. вузов. Авиационная техника. 1995. N 3. с.26-31.
2. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. М.: Энергоатомиздат. 1985. 304с.