

ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ИЗОТЕРМНО - АДИАБАТНОГО И СЛОЖНОГО ЦИКЛОВ ГТУ

Иванов В.А.

ОАО "АВИАДВИГАТЕЛЬ", г. Пермь

Обозначения: в.о - воздухоохладитель; к - компрессор; к.с - камера сгорания; т - турбина; р - регенерация; эг - электрогенератор; L - работа; Q_1 - подведенное тепло; Q_2 - отведенное тепло; η - коэффициент полезного действия (КПД); σ_p - степень регенерации; S - энтропия; T - температура; p - давление; θ - степень повышения температуры; π - степень сжатия (расширения); k - показатель адиабаты; а - окружающая атмосфера; Σ - общий; пр - приведенный; t - термический (идеальный); e - эффективный; опт - оптимальный; макс - максимальный; равн - равный; экв - эквивалентный; в - воздух; г - газ; и.а.- изотермно-адиабатный цикл; 1-1 - простой цикл; 2-2 - сложный цикл с промежуточным охлаждением и подогревом; 1 - первая ступень сжатия (первый компрессор) и расширения (первая турбина); 2 - вторая ступень сжатия (второй компрессор) и расширения (вторая турбина).

Схема энергетической ГТУ сложного цикла с промежуточным охлаждением и подогревом (далее просто сложного цикла) показана на рис.1. Схема ГТУ изотермно - адиабатного цикла в настоящее время не реализована.

Упомянутые циклы рассматриваются без учета различия параметров воздуха и газа, т.е. как реальные циклы с идеальным газом.

Введем обозначения: $\theta = T_r/T_a$; $\pi_\Sigma = \pi_{k1}\pi_{k2} = p_k/p_a$; $e = \pi_\Sigma^{(k-1)/k}$; $e_{k1} = \pi_{k1}^{(k-1)/k}$; $e_{k2} = \pi_{k2}^{(k-1)/k}$; $e_{t1} = \pi_{t1}^{(k-1)/k}$; $e_{t2} = \pi_{t2}^{(k-1)/k}$; где принято $k = k_r = k_b = 1,4$.

Изотермно-адиабатный цикл рассматривается при условии обеспечения максимума эффективного КПД этого цикла, а сложный цикл - при условии обеспечения равенства эффективных КПД простого и сложного циклов $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$. Упомянутые условия обеспечиваются путем выдерживания известных закономерностей [1], [2], приведенных в табл.1.

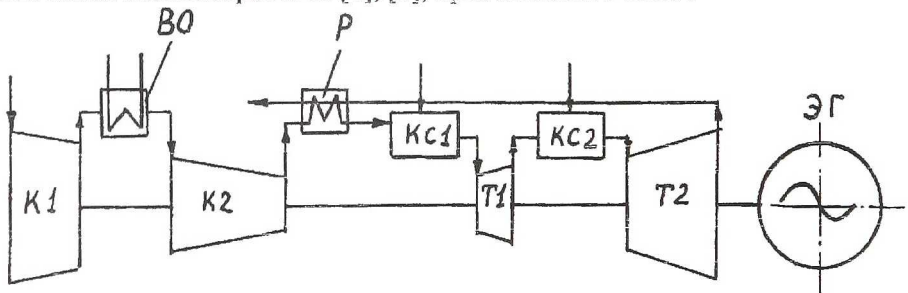


Рис.1. Схема энергетической ГТУ сложного цикла с промежуточным охлаждением и подогревом и регенерацией тепла отработавших в турбине газов

Найдем соотношение работ рассматриваемых циклов. Используя известные формулы найдем зависимость работ изотермно-адиабатного и

сложного циклов от КПД компрессоров и турбин при их равенстве $\eta_k = \eta_T = \eta$. Такая зависимость при общей степени сжатия $\pi_\Sigma = 60$ показана на рис.2.

Таблица 1
Закономерности изменения степени сжатия и расширения
в первой ступени изотермно-адиабатного и сложного циклов

Достижимый эффект	Степень сжатия в первой ступени	Степень расширения в первой ступени
Равенство эффективных КПД простого и сложного циклов $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$	$e_{k1\text{равн.}\eta} = \frac{\eta_{k1}}{\eta_{k2}} e^{(1-\eta_{e1-1})}$ (1)	$e_{T1\text{равн.}\eta} = \frac{\eta_{T1}}{\eta_{T2}} e^{(1-\eta_{e1-1})}$ (2)
Максимум эффективного КПД изотермно-адиабатного цикла $\eta_{e.и.а.макс}$	$e_{k1\text{опт.}\eta} = \frac{\eta_{k1}}{\eta_{k2}} e^{(1-\eta_{e.и.а.})}$ (3)	$e_{T1\text{опт.}\eta} = \frac{\eta_{T1}}{\eta_{T2}} e^{(1-\eta_{e.и.а.})}$ (4)

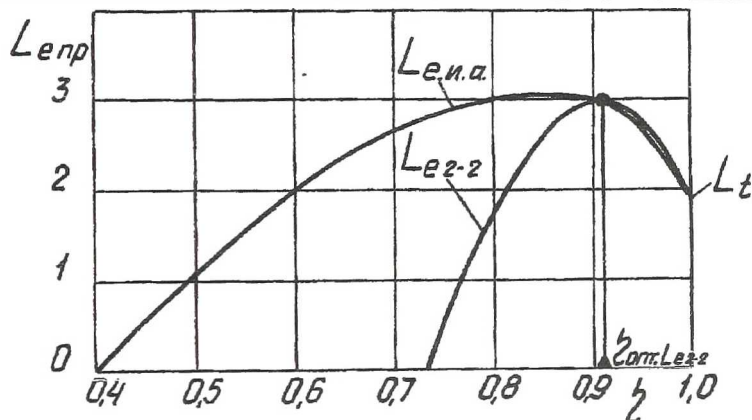


Рис.2. Зависимость эффективных работ изотермно-адиабатного и сложного циклов от КПД компрессоров и турбин ($\theta=6$; $\pi_\Sigma=60$; $\eta_k=\eta_T=\eta$): • - максимум

Как видно из рис.2, равенство работ изотермно-адиабатного и сложного циклов достигается при отсутствии потерь в узлах $\eta=1$ и значении КПД узлов, оптимальном по работе сложного цикла $\eta_{\text{опт.}Le2-2}=0,91$, при котором общая степень сжатия $\pi_\Sigma=60$ является оптимальной по эффективному КПД (экономической) для простого цикла.

В первом случае теоретически несложно показать, что работы изотермно-адиабатного и сложного циклов равны одной величине: работе простого идеального цикла L_a , а во втором случае равенство работ рассмат-

риваемых циклов $L_{e.и.а} = L_{e2-2\max}$ подтверждается расчетами ввиду сложности теоретического обоснования.

Тогда, как видно из рис.2, работы изотермно-адиабатного и сложного циклов практически совпадают при высоких значениях КПД узлов $\eta = 0,9 \dots 1$, а при более низких значениях КПД узлов ($\eta < 0,9$) работы этих циклов значительно отличаются

Эффективный КПД сложного цикла (при условии $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$) можно повысить и в принципе обеспечить его равенство эффективному КПД изотермно-адиабатного цикла путем регенерации тепла отработавших в турбине газов (ОГ). С этой целью на рис.3 показана T-S диаграмма реального сложного и изотермно-адиабатного циклов.

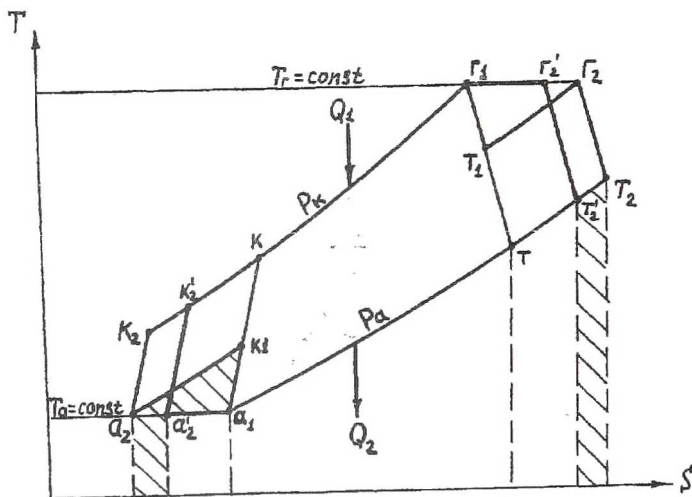


Рис.3. T-S диаграмма реального изотермно-адиабатного и сложного циклов

Как видно из рис.3, для увеличения эффективного КПД сложного цикла (площадь $a_1-k_1-a_2-k_2-\Gamma_1-T_1-\Gamma_2-T_2-a_1$) до эффективного КПД изотермно-адиабатного цикла (площадь $a_1-a_2-k_2-\Gamma_1-\Gamma_2-T_2-a_1$) при равенстве работ этих циклов (равенстве указанных площадей) необходимо обеспечить также равенство отведенного в этих циклах тепла. С этой целью необходимо часть отведенного в сложном цикле тепла Q_2 (соответствует заштрихованным площадям) путем регенерации присоединить к подводенному теплу Q_1 .

Найдем степень регенерации, обеспечивающую равенство эффективных КПД изотермно-адиабатного и сложного циклов:

$$\eta_{e2-2p} = \eta_{e.и.а.макс} \quad (5)$$

В статье для простоты приняты условия $\eta_{k1}=\eta_{k2}=\eta_k$ и $\eta_{T1}=\eta_{T2}=\eta_T$, при которых, как видно из формул (1), (2) $e_{k1 \text{ равн.}\eta}=e_{T1 \text{ равн.}\eta}=e_{1 \text{ равн.}\eta}$, а из формул (3), (4) $e_{k1 \text{ опт.}\eta}=e_{T1 \text{ опт.}\eta}=e_{1 \text{ опт.}\eta}$, где

$$e_{1 \text{ равн.}\eta} = e(1 - \eta_{e1-1}), \quad (6)$$

$$e_{1 \text{ опт.}\eta} = e(1 - \eta_{e.u.a}). \quad (7)$$

Известны формулы эффективного КПД сложного и изотермно-адиабатного циклов

$$\eta_{e2-2} = \frac{L_{e2-2np}}{Q_{2-2np}} = \frac{\theta \left[\left(1 - \frac{1}{e_{T1}}\right) \eta_{T1} + \left(1 - \frac{1}{e_{T2}}\right) \eta_{T2} \right] - \frac{e_{k1} - 1}{\eta_{k1}} - \frac{e_{k2} - 1}{\eta_{k2}}}{\left(\theta - \frac{e_{k2} - 1}{\eta_{k2}} - 1\right) + \theta \left(1 - \frac{1}{e_{T1}}\right) \eta_{T1}}, \quad (8)$$

$$\eta_{e.u.a} = \frac{L_{e.u.a.np}}{Q_{u.a.np}} = \frac{\theta \left[\ln e_{T1} \eta_{T1} + \left(1 - \frac{1}{e_{T2}}\right) \eta_{T2} \right] - \frac{\ln e_{k1}}{\eta_{k1}} - \frac{e_{k2} - 1}{\eta_{k2}}}{\left(\theta - \frac{e_{k2} - 1}{\eta_{k2}} - 1\right) + \theta \ln e_{T1} \eta_{T1}}. \quad (9)$$

Известна также формула эффективного КПД сложного цикла с регенерацией тепла ОГ

$$\eta_{e2-2p} = \frac{\theta \left[\left(1 - \frac{1}{e_{T1}}\right) \eta_{T1} + \left(1 - \frac{1}{e_{T2}}\right) \eta_{T2} \right] - \frac{e_{k1} - 1}{\eta_{k1}} - \frac{e_{k2} - 1}{\eta_{k2}}}{\left(\theta - \frac{e_{k2} - 1}{\eta_{k2}} - 1\right) + \theta \left(1 - \frac{1}{e_{T1}}\right) \eta_{T1} - \sigma_p \left[\left(\theta - \frac{e_{k2} - 1}{\eta_{k2}} - 1\right) - \theta \left(1 - \frac{1}{e_{T2}}\right) \eta_{T2} \right]}. \quad (10)$$

При $e_1=e_{1 \text{ равн.}\eta}$ формула (10) будет иметь вид

$$\eta_{e2-2p} = \frac{\eta_{e1-1}}{1 - \sigma_p \frac{Q_1 - \theta \eta_T (1 - e_{1 \text{ равн.}\eta} / e)}{Q_1 + \theta \eta_T (1 - 1 / e_{1 \text{ равн.}\eta})}}, \quad (11)$$

где $Q_1 = \left(\theta - \frac{e / e_{1 \text{ равн.}\eta} - 1}{\eta_k} - 1\right)$.

Подставив формулу (11) в равенство (5), найдем искомую степень регенерации, обеспечивающую равенство эффективных КПД рассматриваемых циклов, а при высоких значениях КПД узлов их эквивалентность

$$\sigma_{p.экс} = \left(1 - \frac{\eta_{e1-1}}{\eta_{e.u.a}}\right) \frac{Q_1 + \theta \eta_T (1 - 1 / e_{1 \text{ равн.}\eta} / e)}{Q_1 - \theta \eta_T (1 - e_{1 \text{ равн.}\eta} / e)}. \quad (12)$$

Используя известные и полученные формулы, найдем зависимость эффективного КПД и работы изотермно-адиабатного и сложного циклов от степени сжатия (расширения) в первой ступени. Такая зависимость при экономической общей степени сжатия показана на рис. 4.

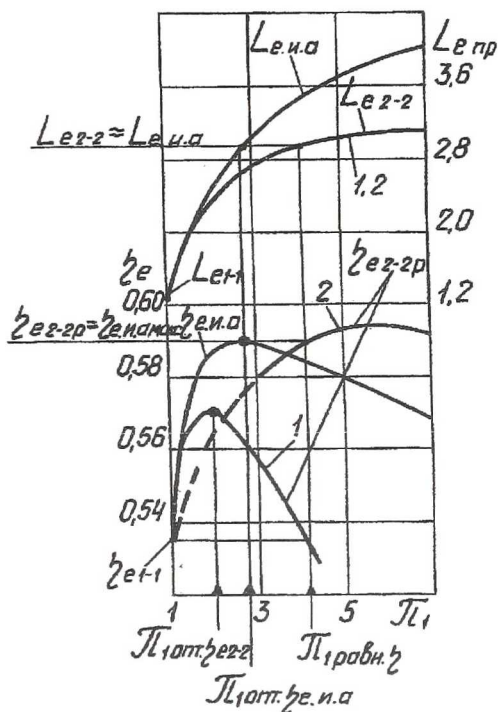


Рис.4. Зависимость эффективного КПД и работы изотермно-адиабатного и сложного циклов от степени сжатия (расширения) в первой ступени ($\theta=6$; $\pi_{\Sigma опт. \eta_{e1-1}}=60$; $\eta_{к1}=\eta_{к2}=\eta_{к}=0,85$; $\eta_{т1}=\eta_{т2}=\eta_{т}=0,94$):
 1 - сложный цикл без регенерации $\sigma_p=0$;
 2 - сложный цикл с эквивалентной степенью регенерации $\sigma_{p, экв}$; • - максимумы

Как видно из рис. 4, при степени сжатия (расширения) в первой ступени $\pi_1_{равн. \eta}$ достигается увеличение эффективного КПД сложного цикла от эффективного КПД простого цикла η_{e1-1} до максимума эффективного КПД изотермно-адиабатного цикла (обеспечивается равенство $\eta_{e2-2p}=\eta_{e.и.а. макс}$) путем увеличения степени регенерации от $\sigma_p=0$ до $\sigma_{p, экв}$.

Видно также, что работы сложного цикла (при $\pi_1_{равн. \eta}$) и изотермно-адиабатного цикла (при $\pi_1_{опт. \eta_{e.и.а}}$) практически равны $L_{e2-2} \approx L_{e.и.а}$, что соответствует высоким значениям КПД современных компрессоров и турбин, принятым в работе, и, следовательно, эквивалентность рассматриваемых циклов практически обеспечивается.

На рис.5 показана зависимость параметров изотермно-адиабатного и сложного циклов от общей степени сжатия.

Как видно из рис. 5, зависимости эффективного КПД и работы изотермно-адиабатного цикла и сложного цикла с эквивалентной степенью регенерации совпадают, но эффективный КПД и работа последнего цикла

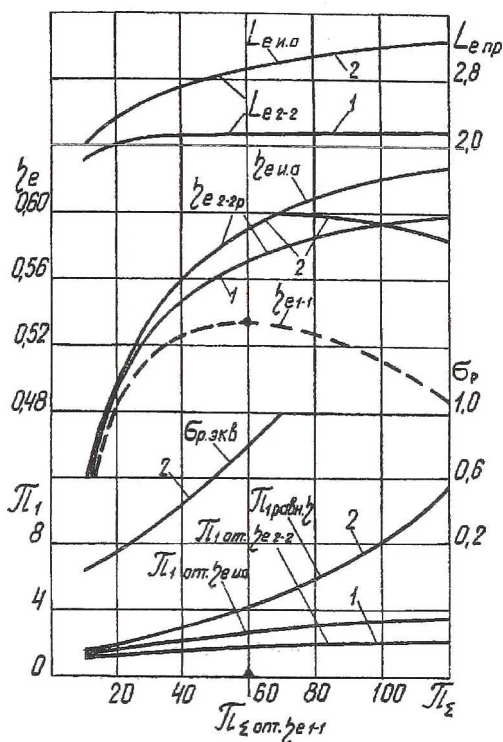


Рис.5. Зависимость параметров изотермно-адиабатного и сложного циклов от общей степени сжатия. (Условия и обозначения см. на рис.4):

— сложный цикл; ---- простой цикл;

• - максимум

степенью регенерации уменьшается.

Список литературы

1. Иванов В.А. Эффективность реальных циклов ГТД с одно-и двухступенчатым отводом и подводом тепла при равенстве их эффективных КПД/Вестник СГАУ. Серия: Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Выпуск 4. Часть 2. Самара 2000.
2. Уваров В.В. Газовые турбины и газотурбинные установки. М., Высшая школа.1970.320с.

значительно больше, чем сложного цикла без регенерации. Видно также, что степень регенерации $\sigma_{p, экв}$ обеспечивающая равенство эффективных КПД изотермно-адиабатного и сложного циклов, увеличивается с увеличением общей степени сжатия и при экономической общей степени сжатия приближается к максимальной $\sigma_{p, макс}=1$.

Заметим, что при общей степени сжатия большей экономической эффективный КПД простого цикла уменьшается и его увеличение до эффективного КПД изотермно-адиабатного цикла путем регенерации тепла ОГ практически неприемлемо, но теоретически возможно, пока степень регенерации меньше максимальной. При еще большем увеличении общей степени сжатия эффективный КПД сложного цикла с максимальной степенью регенерации уменьшается.