

ПУТЬ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

©2009 В. А. Иванов

ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь

Рассматривается возможность увеличения работы и повышения эффективного КПД сложных циклов путём увеличения степени повышения давления до оптимальной по эффективному КПД для простого цикла при условии обеспечения равенства эффективных КПД простого и сложных циклов как критерия эффективности последних.

Газотурбинная установка, цикл, эффективный КПД, степень повышения давления

В работе сравнивается эффективность простых и сложных циклов ГТУ при условии равенства их эффективных КПД, допуская экономичности и обеспечивающей большую удельную работу (далее просто работу) сложного цикла по сравнению с условием обеспечения максимума эффективного КПД этого цикла.

Эффективность сложных циклов при упомянутом условии определяется увеличением их работы по сравнению с работой простого цикла, а также, как показано далее, возможностью повышения эффективного КПД до максимальной величины для простого цикла.

Схема сложного цикла с промежуточным охлаждением и подогревом (совместно) показана на рис. 1, а схемы сложных циклов с промежуточным охлаждением (подогревом) легко получить из схемы на рис. 1 путём исключения соответственно второй камеры сгорания (КС2) или воздухоохладителя (ВО).

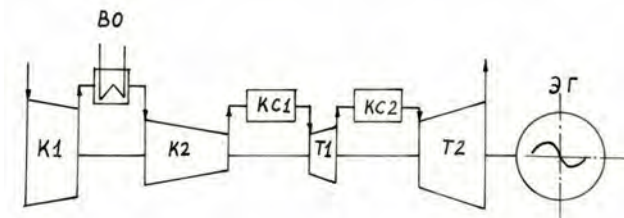


Рис. 1. Схема ГТУ сложного цикла с промежуточным охлаждением и подогревом

Далее показана возможность использования условия равенства эффективных КПД простого (цикл 1-1) и сложных циклов как критерия эффективности.

Зависимости параметров получены расчетом по известным формулам эффек-

тивного КПД η_e , работы L_e и подведенной теплоты Q для действительных сложных циклов с идеальным газом, газовая постоянная и показатель адиабаты которого остаются неизменными, независимыми от температуры и коэффициента избытка воздуха.

Вначале рассмотрим сложный цикл с промежуточным подогревом (цикл 1-2).

На рис. 2 показана последовательность достижения максимума эффективного КПД

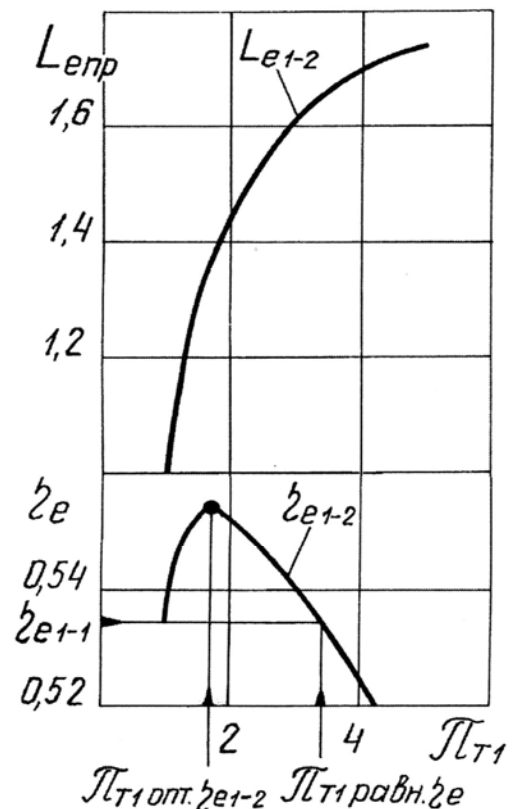


Рис. 2. Зависимость параметров ГТУ сложного цикла с промежуточным подогревом от степени расширения газа в первой турбине ($\pi_{\Sigma \text{опт. } \eta_{e1-1}}=60$; $\theta_1=\theta_2=\theta=6$; $\eta_k=0,85$; $\eta_{m1}=\eta_{m2}=0,89$; $\eta_{(m2+cm)}=0,94$):

•-максимум

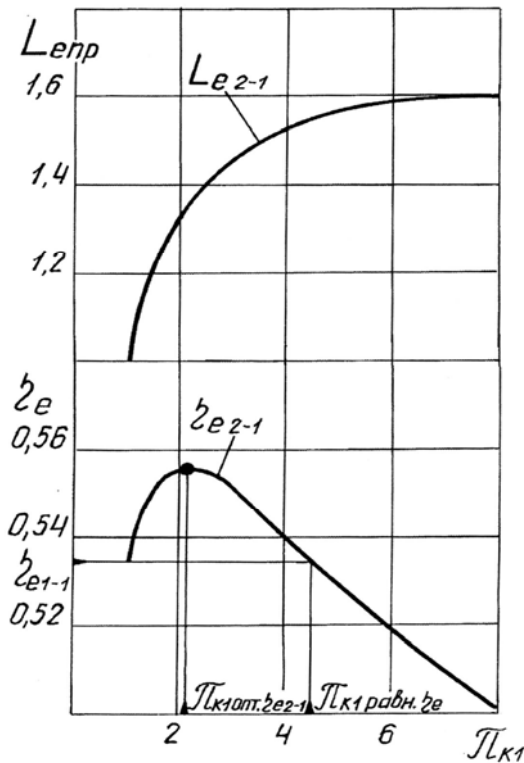


Рис.3. Зависимость параметров ГТУ сложного цикла с промежуточным охлаждением от степени сжатия воздуха в первом компрессоре ($\pi_{\Sigma \text{ опт. } \eta_{e1-1}}=60$; $\theta=6$; $T_{\text{ex1}}=T_{\text{ex2}}=T_a$; $\eta_{k1}=0,87$; $\eta_{k2}=0,85$; $\eta_m=0,89$; $\eta_{(m+cm)}=0,94$): •-максимум

сложного цикла $\eta_{e1-2\text{ макс}}$ (являющегося известным критерием эффективности) и условия равенства эффективных КПД $\eta_{e1-1}=\eta_{e1-2}$ при увеличении степени расширения газа π_{T1} в первой турбине T1 (первой ступени) ГТУ сложного цикла с промежуточным подогревом.

Как видно из рис. 2, с увеличением параметра π_{T1} (увеличением подвода теплоты в КС2) эффективный КПД цикла с промежуточным подогревом η_{e1-2} увеличивается и достигает максимума при параметре $\pi_{T1 \text{ опт. } \eta_{e1-2}}$. При еще большем увеличении параметра π_{T1} до $\pi_{T1 \text{ равн. } \eta_e}$ наступает равенство эффективных КПД $\eta_{e1-1}=\eta_{e1-2}$ при большем значении работы цикла L_{e1-2} .

Затем рассмотрим сложный цикл с промежуточным охлаждением (цикл 2-1).

На рис. 3 показана последовательность достижения максимума эффективного КПД сложного цикла $\eta_{e2-1\text{ макс}}$ (являющегося известным критерием эффективности) и условия равенства эффективных КПД $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-1}$ при увеличении степени сжатия воздуха π_{k1} в первом компрессоре K1 (первой ступени)

ГТУ сложного цикла с промежуточным охлаждением.

Как видно из рис. 3, с увеличением параметра π_{k1} (увеличением отвода теплоты в ВО) эффективный КПД цикла с промежуточным охлаждением η_{e2-1} увеличивается и достигает максимума при параметре $\pi_{k1 \text{ опт. } \eta_{e2-1}}$, а затем наступает равенство эффективных КПД $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-1}$ при параметре $\pi_{k1 \text{ равн. } \eta_e}$, имеющем большую величину и соответствующем большей работе цикла L_{e2-1} .

В работах [1,2] показано, что условие равенства эффективных КПД простого и сложных циклов обеспечивается, если степень расширения π_{T1} (e_{T1}) в первой ступени действительного сложного цикла с промежуточным подогревом найдена по формуле

$$e_{T1} = \frac{\eta_{T1}}{\eta_{T2}} e(1 - \eta_{e1-1}), \quad (1)$$

а степень сжатия π_{k1} (e_{k1}) в первой ступени действительного сложного цикла с промежуточным охлаждением - по формуле

$$e_{k1} = \frac{\eta_{k1}}{\eta_{k2}} e(1 - \eta_{e1-1}). \quad (2)$$

Здесь $e=\pi_{\Sigma}^{(k-1)/k}$; $e_{k1}=\pi_{k1}^{(k-1)/k}$; $e_{T1}=\pi_{T1}^{(k-1)/k}$; $\pi_{\Sigma}=\pi_{k1}\pi_{k2}=p_k/p_a$ -общая степень повышения давления (СПД) в цикле; $\pi_{k1}=p_{k1}/p_a$ -степень сжатия в первой ступени цикла (первом компрессоре K1); $\pi_{T1}=p_k/p_{T1}$ -степень расширения в первой ступени цикла (первой турбине T1); $\theta=T_T/T_a$ -степень повышения температуры в простом цикле; $\theta_{1,2}=T_{T1,2}/T_a$ -степень повышения температуры в первой и второй ступенях сложного цикла; η -коэффициент полезного действия (КПД) цикла и процессов сжатия (расширения) в цикле; 1, 2-первая и вторая ступень сжатия (расширения); p - полное давление заторможенного потока; k - компрессор; $k.c$ - камера сгорания; t - турбина; a - окружающая атмосфера; e - эффективный; $пр$ - приведенный; k - показатель адиабаты; $г$ - газ; $в$ - воздух; где $k=k_B=1,4$, т. е. рабочим телом рассматриваемых действительных сложных циклов является идеальный газ.

В работах [1,2] и на рис. 4 и 5 показано также, что в действительном сложном цикле с промежуточным охлаждением (подогревом) и идеальным газом при условии равенства эффективных КПД $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-1(1-2)}$ максимум эффективной работы $L_{e,пр2-1(1-2)}$ и эффек-

тивного КПД $\eta_{e2-1(1-2)}$, а также минимум подведенной теплоты $Q_{np2-1(1-2)}$ достигаются при одинаковой общей степени повышения давления (СПД), оптимальной по эффективному КПД для простого цикла $\pi_{\Sigma opt. \eta e1-1}$.

Это является существенным отличием от простого цикла, в котором СПД, оптимальная по эффективному КПД $\pi_{\Sigma opt. \eta e1-1}$ (экономическая), значительно больше оптимальной по эффективной работе $\pi_{\Sigma opt. L e1-1}$, вследствие чего при экономической СПД работа этого цикла уменьшается с большим

градиентом. Благодаря этому отличию, использование сложного цикла с промежуточным охлаждением (подогревом) позволяет повысить экономичность и увеличить мощность ГТУ путем увеличения СПД до экономической.

Физический смысл указанного отличия заключается в том, что в простом цикле при увеличении общей СПД $\pi_{к\Sigma}$ и соответственно температуры воздуха за компрессором T_k происходит уменьшение подведенной теплоты в КС1, которое в сложном цикле с

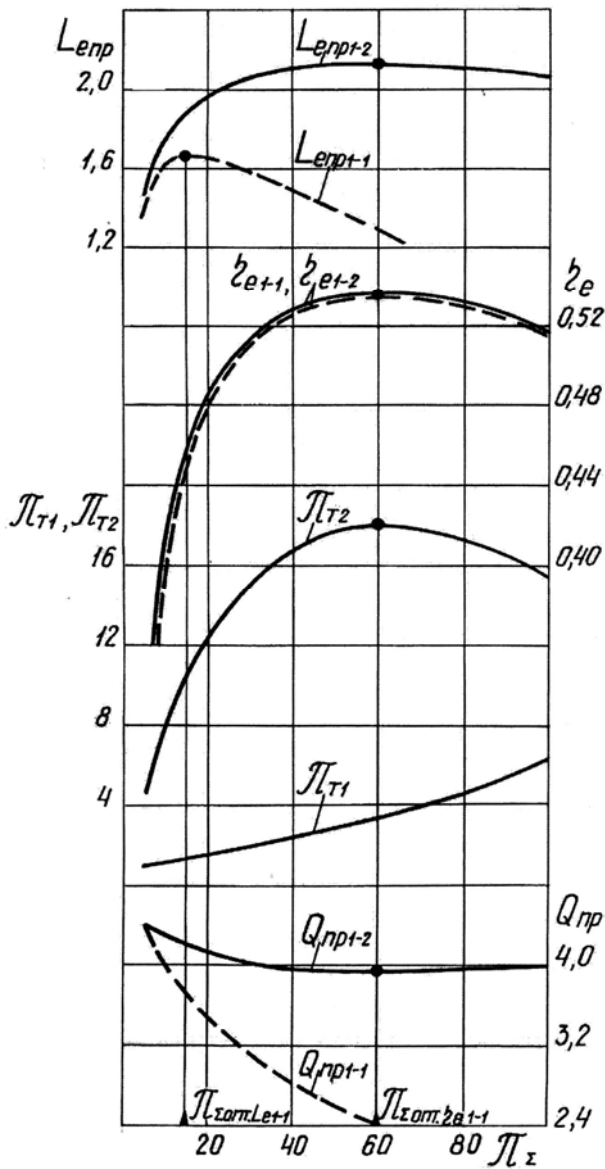


Рис. 4. Зависимость параметров простых и сложных циклов ГТУ с промежуточным подогревом от общей степени повышения давления в случае идеального газа ($\theta_1 = \theta_2 = \theta = 6$; $\eta_k = 0,85$; $\eta_{m1} = 0,89$; $\eta_{m2} = \eta_m = 0,94$):
 ————— сложный цикл с промежуточным подогревом при условии $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$;
 - - - - - простой цикл; • - экстремумы

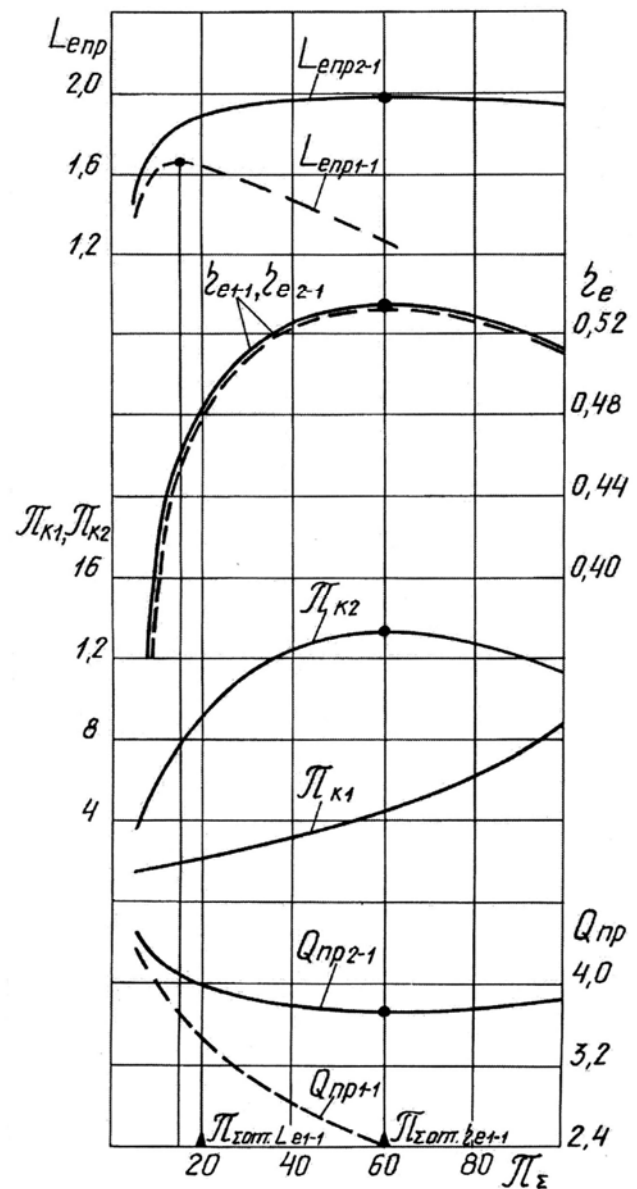


Рис. 5. Зависимость параметров простых и сложных циклов ГТУ с промежуточным охлаждением от общей степени повышения давления в случае идеального газа ($\theta = 6$; $\eta_{к1} = 0,87$; $\eta_{к2} = \eta_k = 0,85$; $\eta_m = 0,94$):
 ————— сложный цикл с промежуточным охлаждением при условии $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-1}$;
 - - - - - простой цикл; • - экстремумы

промежуточным охлаждением (подогревом) корректируется (замедляется) дополнительным подводом теплоты. В результате градиенты уменьшения подведенной теплоты и увеличения работы цикла становятся равными нулю при экономической СПД. Таким образом, за счет промежуточного охлаждения (подогрева) при условии равенства эффективных КПД $\eta_{e1-1}=\eta_{e1-2}$ достигается усовершенствование простого цикла.

В работах [1,2] показано, что в цикле с промежуточным охлаждением (подогревом) в случае идеального газа достижение максимумов эффективного КПД и эффективной работы при экономической СПД является закономерностью.

Так как $L_{e,пр2-1(1-2)}=\eta_{e1-1}Q_{пр2-1(1-2)}$, то для этого достаточно показать, что функция $Q_{пр2-1(1-2)}=f(\pi_\Sigma)$ имеет экстремум при экономической СПД, и учесть, что произведение двух экстремумов в общем случае также экстремальная величина. С этой целью получена формула для параметра $e_{opt,Q2-1(1-2)}$:

$$e_{opt,Q2-1(1-2)} = \frac{\theta\eta_m - \sqrt{\theta^2\eta_m^2 - \theta\eta_m(\theta\eta_m + 1 - \theta)(\theta\eta_\kappa + 1 - \eta_\kappa)}}{(\theta\eta_m + 1 - \theta)} \cdot (3)$$

Формула (3) совпадает с известной формулой для параметра $e_{opt,\eta_{e1-1}}$, соответствующего экономической СПД $\pi_{\Sigma opt,\eta_{e1-1}}$. Следовательно, функция $L_{e,пр2-1(1-2)}=f(\pi_\Sigma)$ имеет экстремум при экономической СПД. Параметрические расчеты показывают, что это максимум.

В работах [2, 3], показано, что в сложном цикле с промежуточным охлаждением и подогревом (совместно) условие равенства эффективных КПД обеспечивается, если степень сжатия $\pi_{\kappa 1}$ ($e_{\kappa 1}$) и расширения $\pi_{\tau 1}$ ($e_{\tau 1}$) в первой ступени сложного цикла в частном случае найдена также по формулам (1) и (2).

В упомянутых работах и на рис. 6 показано также, что в действительном сложном цикле с промежуточным охлаждением и подогревом (ц.2-2) и идеальным газом при условии равенства эффективных КПД $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-2}$ максимум эффективной работы $L_{e,пр2-2}$ достигается при общей СПД $\pi_{\Sigma opt,L_{e2-2}}$ большей экономической для простого цикла $\pi_{\Sigma opt,\eta_{e1-1}}$, при которой работа сложного цик-

ла еще увеличивается с большим градиентом. Благодаря этому отличию использование такого сложного цикла позволяет также повысить экономичность и увеличить мощность ГТУ путем увеличения СПД до экономической.

Физический смысл достижения максимума работы в сложном цикле с промежуточным охлаждением и подогревом при СПД больше экономической заключается в том, что в простом цикле при увеличении общей СПД $\pi_{\kappa\Sigma}$ и соответственно температуры воздуха за компрессором T_κ происходит уменьшение подведенной теплоты в КС1, которое в сложном цикле корректируется дважды: дополнительным подводом теплоты в КС2 (как в ц. 1-2) и в КС1 (как в ц. 2-1). В результате градиенты изменения подведенной теплоты и работы цикла при экономической СПД становятся положительными.

Показано, что в сложном цикле с промежуточным охлаждением и подогревом указанное отличие СПД, оптимальной по эффективной работе и эффективному КПД, является закономерностью.

Для этого достаточно показать, что функция $Q_{пр2-2}=f(\pi_\Sigma)$ имеет минимум при СПД меньшей экономической, после которого эта функция с увеличением СПД получает положительный градиент. Тогда с учетом $L_{e,пр2-2}=\eta_{e1-1}Q_{пр2-2}$ при увеличении СПД максимум эффективной работы будет достигнут после максимума эффективного КПД, когда функция $\eta_{e1-1}=f(\pi_\Sigma)$ получит отрицательный градиент. С этой целью получена формула для параметра $e_{opt,Q2}$:

$$e_{opt,Q2-2} = \frac{\theta\eta_m - A\sqrt{1 + \eta_\kappa(\theta\eta_m + 1 - \theta)}}{(\theta\eta_m + 1 - \theta)}, \quad (4)$$

где $A = \sqrt{\theta^2\eta_m^2 - \theta\eta_m(\theta\eta_m + 1 - \theta)(\theta\eta_\kappa + 1 - \eta_\kappa)}$.

Формула (4) отличается от известной формулы для параметра $e_{opt,\eta_{e1-1}}$, соответствующего экономической СПД $\pi_{\Sigma opt,\eta_{e1-1}}$, вторым подкоренным выражением которое уменьшает величину параметра $e_{opt,Q2-2}$. Следовательно, функция $Q_{пр2-2}=f(\pi_\Sigma)$ имеет экстремум при СПД $\pi_{\Sigma opt,Q2-2}$, меньшей экономической. Параметрические расчеты показывают, что это минимум.

В работе [2] выполнено сравнение параметров простого и сложных циклов ГТУ при повышении температуры газа и обогащении состава смеси воздуха и топлива в пределе до стехиометрического при условии равенства эффективных КПД простого и сложных циклов. Сравнение параметров указанных циклов выполнено расчетным путем, топливом является природный газ метан.

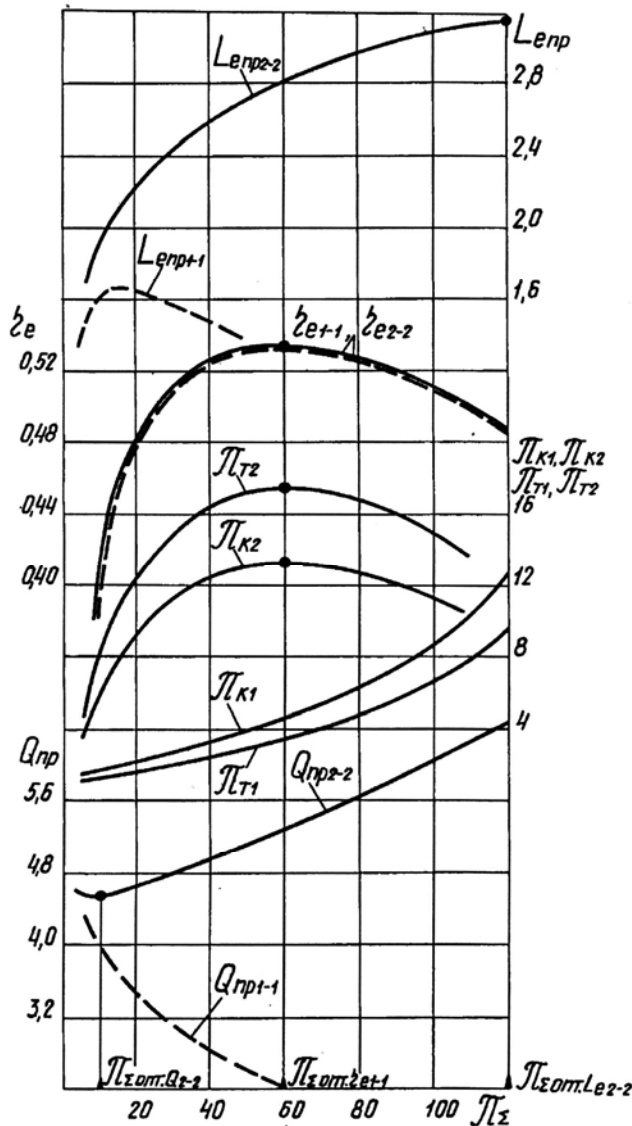


Рис. 6. Зависимость параметров простых и сложных циклов ГТУ с промежуточным охлаждением и подогревом от общей степени повышения давления в случае идеального газа ($\theta_1=\theta_2=\theta=6$; $\eta_{к1}=0,87$; $\eta_{к2}=\eta_{к}=0,85$; $\eta_{т1}=0,89$; $\eta_{т2}=\eta_{т}=0,94$):
 ————— сложный цикл с промежуточным охлаждением и подогревом при условии $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-2}$;
 - - - - - простой цикл; • - экстремумы

На рис. 7 показаны зависимости суммарного коэффициента избытка воздуха, эффективного КПД и работы простого и сложных циклов ГТУ от температуры газа в камерах сгорания. Для определения суммарного коэффициента избытка воздуха $\alpha_{\Sigma}=1/[(q_{т1}+q_{т2})L_0]$ (где L_0 - стехиометрический коэффициент) найден относительный расход топлива в первой камере сгорания $q_{т1}=G_{т1}/G_B$ по известной формуле, а относи-

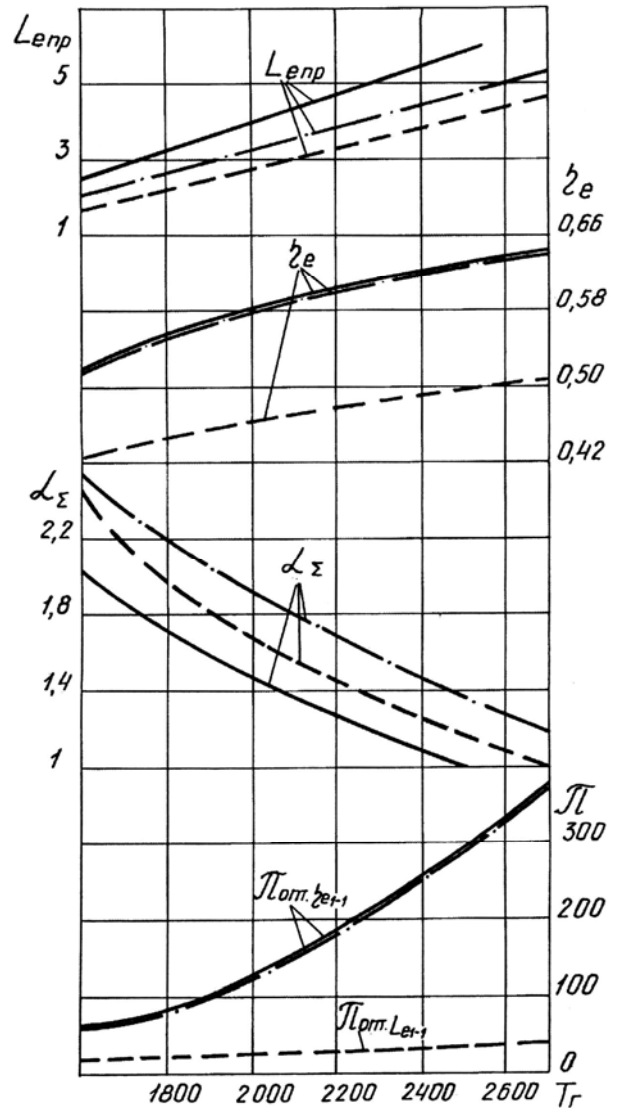


Рис. 7. Зависимость параметров простых и сложных циклов ГТУ от температуры газа в камерах сгорания ($T_{с1}=T_{с2}=T_{с}$, остальные условия см. на рис. 4 и 6):
 - - - - - простой цикл;
 - · - · цикл с промежуточным подогревом при условии $\eta_{e1-1}=\eta_{e1-1}$;
 ————— цикл с промежуточным охлаждением и подогревом при условии $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-2}$;

тельный расход топлива во второй камере сгорания $q_{T2}=G_{T2}/G_B$ - по формуле для форсажных камер сгорания.

Так как обогащение смеси топливом и повышение температуры газа производится для увеличения работы цикла, то параметры ГТУ простого цикла найдены при общей СПД $\pi_{\Sigma\text{опт.}\eta_{e1-1}}$, оптимальной по работе этого цикла (которая меньше оптимальной по эффективному КПД), а параметры ГТУ сложных циклов – при общей СПД оптимальной по работе цикла с промежуточным подогревом, которая является также оптимальной по эффективному КПД $\pi_{\Sigma\text{опт.}\eta_{e1-1}}$ (экономической) для простого цикла. Как видно из рис.7, при высокой температуре газа общая СПД, оптимальная по эффективному КПД простого цикла $\pi_{\Sigma\text{опт.}\eta_{e1-1}}$, многократно превышает общую СПД, оптимальную по эффективной работе этого цикла $\pi_{\Sigma\text{опт.}\eta_{e1-1}}$.

Тогда при одинаковой температуре газа в двух камерах сгорания ГТУ сложных циклов с промежуточным охлаждением и подогревом (отдельно и совместно) за счет увеличения СПД до экономической достигается практически такой же суммарный коэффициент избытка воздуха, как и в одной камере сгорания ГТУ простого цикла.

На рис. 7 показан также путь повышения эффективности ГТУ, заключающийся в том, что при одинаковой температуре газа эффективный КПД сложных циклов значительно выше эффективного КПД простого цикла за счет увеличения СПД в сложных циклах до экономической. Работа сложных циклов также больше работы простого цикла.

Как видно также из рис. 7, предлагаемый путь повышения эффективности (увеличения работы и эффективного КПД) цикла ГТУ реален до достижения стехиометрического состава смеси в камерах сгорания ($\alpha_{\Sigma}=1,0$ при $T_T \approx 2600$ К и $\pi_{\kappa\Sigma\text{опт.}\eta_{e1-1}} \approx 300$). Следовательно, промежуточное охлаждение и подогрев можно использовать для увеличения эффективного КПД при высоких температурах газа, соответствующих стехиометрическому составу смеси, после достижения которого дальнейшее повышение экономич-

ности может осуществляться путем реализации изотермно-адиабатного цикла (путем многоступенчатого промежуточного охлаждения воздуха и многоступенчатого промежуточного подогрева газа) при повышении общей СПД больше экономической и соответствующего обеднения состава смеси в камерах сгорания при постоянной температуре газа. Тогда предлагаемый путь повышения эффективности цикла ГТУ является переходным этапом к оптимизации (карнотизации) этого цикла посредством реализации изотермно-адиабатного цикла.

Библиографический список

1. Иванов, В.А. Исследование эффективности реальных циклов ГТД с одно- и двухступенчатым подводом тепла при равенстве их эффективных КПД/ В.А. Иванов // Изв. вузов. Авиационная техника. -1995.- № 3.- С. 26-31.
2. Иванов, В.А. Оптимизация цикла газотурбинных установок/ В.А. Иванов.- Пермь, 2006. -112 с.
3. Иванов, В. А. Эффективность реальных циклов ГТД с одно - и двухступенчатым отводом и подводом тепла при равенстве их эффективных КПД/ В.А. Иванов. Вестн. СГАУ. Сер: Проблемы и перспективы развития двигателестроения.- Вып. 4.- Ч2.- Самара, 2000. С.214-222.

References

1. Ivanov, V.A. Effectivity research of actual gas turbine cycles with equal efficiency and single and two-stage heat application // Aeronautical Engineering, 1995. №3. 26-31.
2. Ivanov, V.A. Optimization of Gas Turbine Units cycles / V.A. Ivanov.- Perm: 2006.- P.112.
3. Ivanov, V.A. Effectivity of actual gas turbine cycles with equal efficiency and single and two-stage heat application / SSAU Bulletin. Problems and Perspective of Engine Designing Series. Issue #4. Pt.2. Samara, 2000. 214-222.

WAY OF INCREASE IN EFFICIENCY OF CYCLE GAS TURBINE UNITS

©2009 V. A. Ivanov

Joint-Stock Company «Aviadvigatel», Perm

The opportunity of increase in work and increase of effective efficiency of complex cycles is considered on the way increase in a degree of increase of pressure up to optimum on effective efficiency for a simple cycle under condition of ensuring of equality of effective efficiencies simple and complex cycles as criterion of efficiency of the last.

Gas turbine Units, cycle, effective efficiency, optimization

Информация об авторах

Иванов Вадим Александрович, кандидат технических наук, инженер-конструктор 1 категории ОАО «Авиадвигатель». E-mail: iva-perm@rambler.ru. Область научных интересов – оптимизация термогазодинамических циклов газотурбинных двигателей.

Ivanov Vadim Alexandrovich, Candidate of Engineering Science, 1st class design engineer in “Aviadvigatel” Public Corporation. E-mail: iva-perm@rambler.ru. Area of research: optimization of gas turbine engine heat cycles.