

УДК 621.438.082

УПРОЩЕННЫЙ СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

В.А. ИВАНОВ¹, А.С. ПЛЕШИВЫХ²

¹iva-perm@rambler.ru

АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь

Поступила в редакцию 19.11.2023

Аннотация. Рассмотрен способ увеличения работы и повышения эффективного КПД сложного регенеративного цикла с промежуточным охлаждением и подогревом за счет выбора критерия эффективности и степени регенерации теплоты отработавших газов. Критерием эффективности является условие равенства эффективных КПД простого и сложного циклов, при котором обеспечивается увеличение работы сложного цикла и перепада температур газа и воздуха в регенераторе по сравнению с другими допустимыми по экономичности условиями, а степень регенерации соответствует границе интенсивного увеличения поверхности теплообмена регенератора. Показана возможность обеспечения рассмотренным способом эквивалентности (и замены при оптимизации) изотермно-адиабатного и сложного циклов.

Ключевые слова: сложный цикл, изотермно-адиабатный цикл, степень регенерации.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] сделан вывод, что в качестве одной из перспективных и рациональных схем ГТУ следует рассматривать тепловую и конструктивную схему, реализованную в ГТ-100.

Известен способ оптимизации (карнотизации) цикла ГТУ посредством циклов с изотермно-адиабатным сжатием и расширением (изотермно-адиабатных циклов), которые в перспективе могут быть приближенно реализованы как циклы с многоступенчатым охлаждением и подогревом [2]. Сложные циклы с одноступенчатым промежуточным охлаждением и подогревом (далее просто «сложные циклы») более просты для конструктивного исполнения и реализованы в настоящее время (ГТ-100).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Показать условия, при которых обеспечивается эквивалентность сложных регенеративных и изотермно-адиабатных циклов ГТУ по работе и эффективному КПД. Рассмотреть оптимизацию цикла газотурбинных установок с заменой изотермно-адиабатных циклов на сложные регенеративные циклы, при которых обеспечивается упрощение рассматриваемого способа оптимизации [1]

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Простые, сложные и изотермно-адиабатные циклы рассмотрим, как действительные циклы с идеальным газом, газовая постоянная, показатель адиабаты и теплоемкость которых остаются неизменными.

Выбор критерия эффективности сложных циклов. В работе [3] показано, что критерием эффективности, обеспечивающим эквивалентность изотермно-адиабатных и сложных циклов по удельной работе (далее просто «работе»), может служить условие равенства эффективных

КПД простого и сложного циклов, при котором обеспечивается наибольшее увеличение работы сложного цикла по сравнению с другими условиями, когда КПД сложного цикла больше КПД простого цикла.

Тогда рассмотрим сложные циклы при условии обеспечения равенства эффективных КПД простого (цикл 1-1) и сложного (цикл 2-2) циклов $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$, а изотермно-адиабатные циклы – при условии обеспечения максимума эффективного КПД этих циклов - $\eta_{e.u.amax}$.

В табл. 1 приведены зависимости, обеспечивающие равенство эффективных КПД простых и сложных циклов $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$ [3], а также известные зависимости [2], обеспечивающие максимум эффективного КПД изотермно-адиабатных циклов $\eta_{e.u.amax}$. Зависимости (3), (4) применимы также для нахождения степени сжатия $e_{k1opt.u.a.c}$ и степени расширения $e_{m1opt.u.a.p}$ в первой ступени циклов с изотермно-адиабатным сжатием или расширением, оптимальных по эффективному КПД.

Таблица 1

Закономерности изменения степени сжатия и расширения в первой ступени сложных и изотермно-адиабатных циклов

Достижимый эффект	Степень сжатия в первой ступени $\pi_{k1}(e_{k1})$	Степень расширения в первой ступени $\pi_{T1}(e_{T1})$
Равенство эффективных КПД простого и сложного циклов $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$	$e_{k1равн.\eta e} = \frac{\eta_{k1}}{\eta_{k2}} e (1 - \eta_{e1-1})$ (1)	$e_{m1равн.\eta e} = \frac{\eta_{m1}}{\eta_{m2}} e (1 - \eta_{e1-1})$ (2)
Максимум эффективного КПД изотермно-адиабатного цикла $\eta_{e.u.amax}$	$e_{k1opt.u.a} = \frac{\eta_{k1}}{\eta_{k2}} e (1 - \eta_{e.u.amax})$ (3)	$e_{m1opt.u.a} = \frac{\eta_{m1}}{\eta_{m2}} e (1 - \eta_{e.u.amax})$ (4)

Здесь и далее $e = \pi^{(k-1)/k}$; $e_{k1} = \pi_{k1}^{(k-1)/k}$; $e_{T1} = \pi_{T1}^{(k-1)/k}$; $\theta = T_{\Gamma}/T_a$ – степень повышения температуры в цикле при $T_a = 288\text{K}$; $\pi = p_k/p_a$ – степень повышения давления (СПД) в цикле; $\pi_{k1} = p_{k1}/p_a$ – степень сжатия в первой ступени цикла; $\pi_{T1} = p_{T1}/p_a$ – степень расширения в первой ступени цикла; p, T – полное давление и температура заторможенного потока; k – компрессор; $k.c.$ – камера сгорания; t – турбина; $в.о.$ – воздухоохладитель; p – регенератор; цикл 1-1 – простой цикл с одним охлаждением и одним подогревом; цикл 1-2 – сложный цикл с одним охлаждением и двумя подогревами; цикл 2-2 – сложный цикл с двумя охлаждениями и двумя подогревами; a – окружающая атмосфера; k – показатель адиабаты (принято $k = k_{\Gamma} = k_{в} = 1,4$); Γ – газ; $в$ – воздух; η – коэффициент полезного действия (КПД) цикла и процессов сжатия (расширения) в цикле; e – эффективный; Σ – общий.

Для простоты примем равенство КПД процессов сжатия и расширения в первой (первый компрессор, первая турбина) и второй (второй компрессор, вторая турбина) ступенях рассматриваемых циклов: $\eta_{k1} = \eta_{k2} = \eta_k$ и $\eta_{T1} = \eta_{T2} = \eta_T$. Тогда, как видно из формул (1), (2), (3), (4), $e_{k1равн.\eta e} = e_{T1равн.\eta e}$ и $e_{k1opt.u.a} = e_{T1opt.u.a}$, а также $e_{k1opt.u.a.c} = e_{T1opt.u.a.p}$, и упомянутые формулы можно заменить формулами

$$e_{1равн.\eta e} = e(1 - \eta_{e1-1}) \quad (5)$$

$$e_{1opt.u.a} = e(1 - \eta_{e.u.amax}) \quad (6)$$

$$e_{1opt.u.a.c(p)} = e(1 - \eta_{e.u.a.c(p)max}) \quad (7)$$

Заметим, что параметры $e_{1opt.u.a.c(p)}$, найденные по формуле (7), отличаются для циклов с изотермно-адиабатным сжатием (расширением) так же, как отличаются эффективные КПД этих циклов $\eta_{e.u.a.c(p)}$.

Параметры $\pi_2 = \pi/\pi_{T1}$ ($e_2 = e/e_1$), соответствующие степени сжатия (расширения) во второй ступени сложных циклов с промежуточным охлаждением (подогревом) и циклов с изотермно-адиабатным сжатием (расширением), найдем соответственно по формулам:

$$e_{2\text{равн.}\eta_e} = 1/(1 - \eta_{e1-1}) \quad (8)$$

$$e_{2\text{опт.и.а.}} = 1/(1 - \eta_{e.и.а.маx}) \quad (9)$$

$$e_{2\text{опт.и.а.с(р)}} = 1/(1 - \eta_{e.и.а.с(р)маx}) \quad (10)$$

Обеспечение максимума работы сложных циклов. Как показано на рис. 1а, в действительном сложном цикле с промежуточным подогревом при условии равенства эффективных КПД $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$ с увеличением СПД и параметра $\pi_{\tau 1}$ (увеличением подвода теплоты в КС2) максимум эффективной работы \bar{L}_{e1-2} и эффективного КПД η_{e1-2} достигаются при одинаковой общей степени повышения давления (СПД), оптимальной по эффективному КПД для простого цикла $\pi_{\Sigma\text{опт}Le1-1}$ [3]. Таким образом, $\pi_{\Sigma\text{опт}Le1-2} = \pi_{\Sigma\text{опт}Le1-1}$.

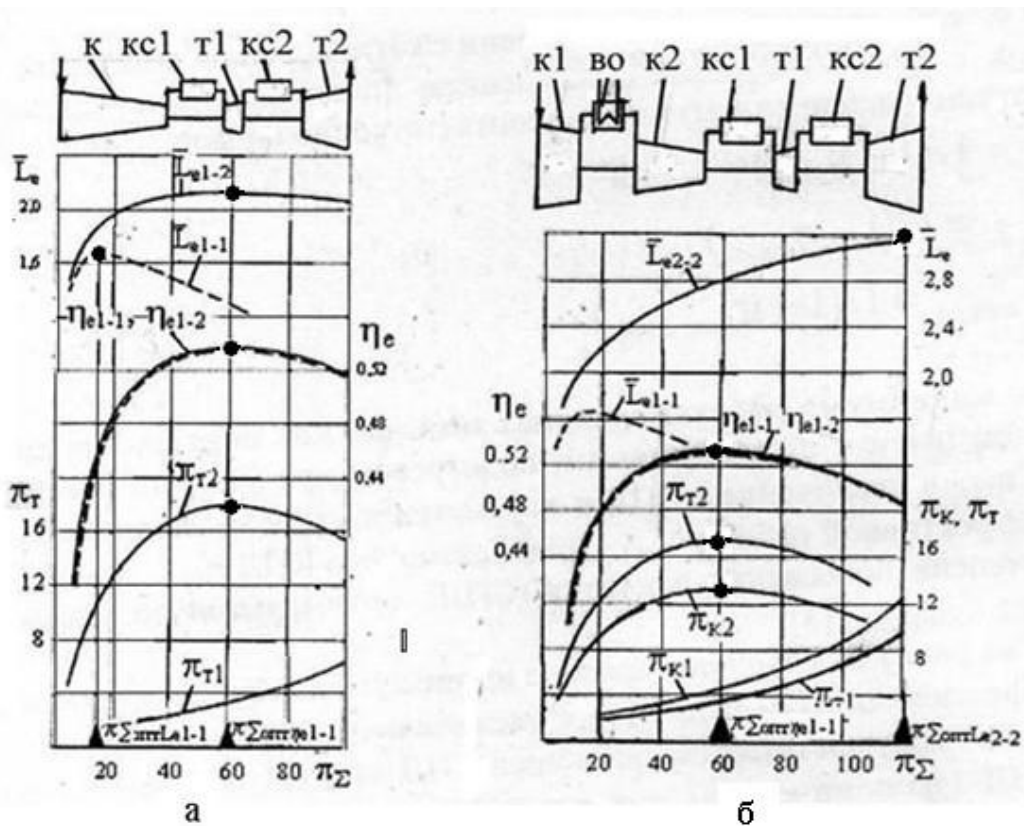


Рис. 1. Зависимость параметров простых и сложных циклов ГТУ с промежуточным подогревом (а) и промежуточным охлаждением и подогревом (б) от общей степени повышения давления

$$(\theta_1 = \theta_2 = \theta = 6; \eta_{\kappa 1} = 0,87; \eta_{\kappa 2} = \eta_{\kappa} = 0,85; \eta_{\tau 2} = \eta_{\tau} = 0,94):$$

— упомянутые сложные циклы при условии $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2} = \eta_{e2-2}$; - - - простой цикл; • максимум.

Как показано на рис. 1б, в действительном сложном цикле с промежуточным охлаждением и подогревом при равенстве эффективных КПД $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$ с увеличением СПД и параметра $\pi_{\tau 1}$ максимум эффективной работы \bar{L}_{e2-2} достигается при общей СПД $\pi_{\Sigma\text{опт}Le2-2}$, большей, оптимальной по эффективному КПД (экономической) для простого цикла $\pi_{\Sigma\text{опт}\eta_{e1-1}}$, при которой работа сложного цикла еще увеличивается с большим градиентом [3]. Здесь и далее $L_e = Le / (C_p T_a)$ – относительная работа (отнесенная к произведению теплоемкости на температуру атмосферного воздуха).

Указанные СПД $\pi_{\Sigma\text{опт}Le1-2}$ цикла с промежуточным подогревом и СПД $\pi_{\Sigma\text{опт}Le2-2}$ цикла с промежуточным подогревом и охлаждением принципиально отличаются от СПД, оптимальной по эффективной работе простого цикла $\pi_{\Sigma\text{опт}\eta_{e1-1}}$, которая значительно меньше экономической СПД $\pi_{\Sigma\text{опт}\eta_{e1-1}}$. Благодаря этому отличию в сложных циклах при равенстве эффективных КПД

$\eta_{e1-1}=\eta_{e1-2}$ и $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-2}$ существует возможность повысить экономичность и увеличить мощность ГТУ путем увеличения СПД до экономической $\pi_{\Sigma\text{опт}\eta_{e1-1}}$.

Заметим, что формулы (5), (7) отличаются лишь эффективными КПД η_{e1-1} и $\eta_{e.и.а.с(р)}$. Общность формул основывается на общности циклов, которая, как показано на рис. 2, заключается в том, что действительные циклы с промежуточным охлаждением (или подогревом) и изотермно-адиабатным сжатием (или расширением) эквивалентны по работе и эффективному КПД идеальным циклам, образованным на $T-S$ диаграммах во второй степени этих действительных циклов [4].

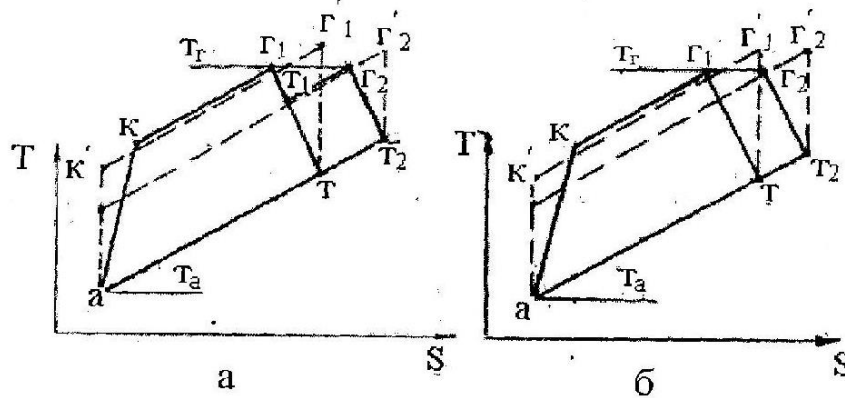


Рис. 2. $T-S$ диаграммы простых идеальных (---) и действительных (—) циклов с промежуточным подогревом (а) и изотермно-адиабатным расширением (б).

Эффективный КПД упомянутых идеальных циклов не зависит от степени повышения температуры в этих циклах, но от последней зависит работа этих циклов. Тогда степень повышения температуры $\theta_{1-2} = T'_{r2}/T_a$ и $\theta_{и.а.р} = T'_{r2}/T_a$ в упомянутых идеальных циклах, при которой обеспечивается равенство работ этих циклов и соответствующих им действительных циклов с промежуточным подогревом (а-к- Γ_1 - Γ_1 - Γ_2 - T_2 -а) и изотермно-адиабатным расширением и (а-к- Γ_1 - Γ_2 - T_2 -а), соответствует формулам [4]:

$$\theta_{1-2} = \theta \left[1 - \left(1 - \frac{1}{e_{2\text{равн}\eta_e}} \right) \eta \right] e_{2\text{равн}\eta_e} \quad (11)$$

$$\theta_{и.а.р} = \theta \left[1 - \left(1 - \frac{1}{e_{2\text{опт.и.а.р}}} \right) \eta \right] e_{2\text{опт.и.а.р}} \quad (12)$$

Заметим также, что на рис. 2а идеальный цикл (а-к'- Γ_1 - Γ_1 -а) получен из действительного простого цикла (а-к- Γ_1 - Γ_1 -а) путем замены действительных процессов сжатия и расширения на идеальные при одинаковых температурах в начале процесса сжатия и в конце процесса расширения, что соответствует одинаковому количеству отведенной теплоты в действительном и идеальном циклах. Работа полученного таким способом идеального цикла L_{Γ_1-1} является максимальной для простого цикла, а степень повышения температуры в таком идеальном цикле $\theta_{1-1} = T'_{r1}/T_a$ больше принятой $\theta = T_r/T_a$ и соответствует формуле [4]:

$$\theta_{1-1} = \theta \left[1 - \left(1 - \frac{1}{e} \right) \eta \right] e \quad (13)$$

Сложные циклы с промежуточным подогревом рассмотрим при экономической СПД, при которой с учетом равенства КПД $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$ обеспечивается максимум работы этих циклов. В таком сложном цикле параметр $\pi_{1\text{равн}\eta_e}$ ($e_{1\text{равн}\eta_e}$) и дополнительный подвод теплоты согласно формуле (5) пропорциональны СПД (параметр e) и выражению $(1-\eta_{e1-1})$, характеризующим потери энергии в действительном простом цикле. Тогда оптимальным вариантом дополнительного подвода теплоты является увеличение работы сложного цикла до величины, соответ-

ствующей компенсации влияния потерь энергии в процессах сжатия и расширения действительного простого цикла а-к-г1-т-а (рис. 2а), и превращение этого простого цикла в идеальный а-к'-г1'-т-а (без потерь энергии в процессах сжатия и расширения) со степенью повышения температуры θ_{1-1} . Работа такого идеального цикла L_{t1-1} больше работы идеального цикла с принятой степенью повышения температуры θ , является максимальной для простого цикла и обеспечивается, когда работа сложного цикла увеличивается и достигает абсолютного максимума $L_{e1-2абсmax}$ при увеличении экономической СПД $\pi_{опт\eta e1-1} = f(\eta)$ в результате увеличения в перспективе КПД η процессов сжатия и расширения. Параметр $L_{e1-2абсmax}$ необходимо обеспечить при замене изотермно-адиабатных циклов сложными циклами.

Учтем, что, как показано ранее, при условии $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$ работа сложного цикла соответствует работе эквивалентного идеального цикла L_{t1-2} , образованного во второй ступени этого сложного цикла с СПД $\pi_{2равн\eta e}$ и степенью повышения температуры θ_{1-2} , и с учетом этого соответствия выполняется равенство $L_{e1-2абсmax} = L_{t1-2}$.

Тогда сначала найдем параметр $\pi_{2равн\eta e}$, обеспечивающий абсолютный максимум работы сложного цикла, и его равенство максимальной работе простого цикла $L_{e1-2абсmax} = L_{t1-1}$.

Для простоты преобразований вместо равенства работы действительного и идеального циклов $L_{e1-2абсmax} = L_{t1-1}$ используем равенство работ идеальных циклов

$$L_{t1-1} = L_{t1-2} \quad (14)$$

С учетом известной формулы работы идеального цикла $L_t = (e-1)(\theta/e-1)$ равенство (14) будет иметь вид $(e-1)(\theta_{1-1}/e-1) = (e_2-1)(\theta_{1-2}/e_2-1)$.

Подставив в последнее равенство формулы (11) и (13) и приняв $\eta_k = \eta_t = \eta$, после преобразований получим квадратное уравнение относительно параметра e_2 .

$$e_2^2 - \left[e - \frac{\theta\eta}{(\theta-1-\theta\eta)e} \right] e_2 - \frac{\theta\eta}{(\theta-1-\theta\eta)} = 0.$$

решив которое найдем искомый параметр $\pi_{2равн\eta e}$ ($e_{2равн\eta e}$)

$$e_{2равн\eta e} = \frac{\theta\eta}{(\theta\eta + 1 - \theta)e} \quad (15)$$

Затем найдем КПД η и экономическую СПД $\pi_{опт\eta e1-1}$, при которых обеспечивается абсолютный максимум работы сложного цикла $L_{e1-2абсmax}$, равный максимуму работы эквивалентного идеального цикла $L_{e1-2абсmax} = L_{t1-2}$. Последний обеспечивается при оптимальном по работе параметре этого идеального цикла $\pi_{оптL_t} = \theta^{k/(k-1)/2}$ [5]. Тогда параметр $\pi_{2равн\eta e}$ сложного цикла при абсолютном максимуме его работы соответствует оптимальному по работе параметру идеального цикла $\pi_{оптL_t}$.

$$\pi_{2равн\eta e} = \pi_{оптL_t} (e_{2равн\eta e} = e_{оптL_t}).$$

Для простоты примем степень повышения температуры в упомянутом эквивалентном идеальном цикле приближенно равной этому параметру в простом действительном цикле $\theta_{1-2} = \theta$, хотя между этими параметрами имеется небольшое различие, показанное на рис. 2а. Тогда

$$e_{2равн\eta e} = e_{оптL_t} = \sqrt{\theta}$$

и с учетом

$$e_{2равн\eta e} = \sqrt{\theta}$$

из формулы (15), приняв $e = e_{опт\eta e1-1}$, найдем экономическую СПД $\pi_{опт\eta e1-1}$ ($e_{опт\eta e1-1}$), при которой обеспечивается абсолютный максимум работы сложного цикла $L_{e1-2абсmax}$.

$$e_{опт\eta e1-1} = \frac{\theta\eta}{(\theta\eta + 1 - \theta)\sqrt{\theta}}$$

Для нахождения КПД η приравняем полученный параметр его известному оптимальному по эффективному КПД значению [6]

$$e_{\text{опт}\eta_{e1-1}} = \sqrt{\frac{\theta\eta_k\eta_\tau}{(1-\eta_{e1-1})}}$$

Тогда с учетом $\eta_k=\eta_\tau=\eta$, получим

$$\frac{\theta\eta}{(\theta\eta+1-\theta)\sqrt{\theta}} = \sqrt{\frac{\theta\eta^2}{(1-\eta_{e1-1})}}.$$

Из полученного уравнения найдем КПД процессов сжатия и расширения η , при котором обеспечивается абсолютный максимум работы сложного цикла, равный максимальной работе простого цикла, из которого получен этот сложный цикл $L_{e1-2\text{абсmax}} = L_{t1-1}$,

$$\eta = 1 - \frac{\eta_{e1-1}}{\theta} \quad (16)$$

Формула (16) может быть использована для нахождения КПД η методом последовательных приближений, так как КПД η_{e1-1} также является функцией КПД η .

В цикле с изотермно-адиабатным расширением параметр $\pi_{1\text{опт.и.а.р}}$ ($e_{1\text{опт.и.а.р}}$) и дополнительный подвод теплоты, согласно формуле (7), также пропорциональны СПД (параметр e) и выражению $(1-\eta_{e,\text{и.а.рmax}})$, характеризующим потери энергии в действительном изотермно-адиабатном цикле. Тогда оптимальным вариантом дополнительного подвода теплоты является также увеличение работы цикла с изотермно-адиабатным расширением до величины, соответствующей компенсации влияния потерь энергии в процессах сжатия и расширения действительного простого цикла а-к-г'1-т-а (рис. 2б), из которого получен изотермно-адиабатный цикл, и превращения этого простого цикла в идеальный а-к'-г'1-т-а.

Заметим, что тогда дополнительный подвод теплоты в сложных циклах с промежуточным подогревом и циклах с изотермно-адиабатным расширением обеспечивает принципиально одинаковый результат: компенсацию потерь энергии в процессах сжатия и расширения действительных простых циклов, из которых получены эти сложные и изотермно-адиабатные циклы.

Циклы с изотермно-адиабатным расширением рассмотрим также при СПД, соответствующей экономической $\pi_{\text{опт}\eta_{e1-1}}$. Тогда, работа цикла с изотермно-адиабатным расширением так же, как цикла с промежуточным подогревом, увеличивается и достигает максимума $L_{e,\text{и.а.рmax}}$ при увеличении экономической СПД $\pi_{\text{опт}\eta_{e1-1}} = f(\eta)$ в результате увеличения в перспективе КПД η процессов сжатия и расширения [4].

Учтем, что работа цикла с изотермно-адиабатным расширением при обеспечении максимума эффективного КПД этого цикла $\eta_{e,\text{и.а.рmax}}$ соответствует работе эквивалентного идеального цикла, образованного во второй ступени этого изотермно-адиабатного цикла с СПД $\pi_{2\text{опт.и.а.р}}$ и степенью повышения температуры $\theta_{\text{и.а.р}}$. Максимум работы цикла с изотермно-адиабатным расширением $L_{e,\text{и.а.рmax}}$, так же как этот параметр сложного цикла с промежуточным подогревом, соответствует максимуму работы эквивалентного идеального цикла, т. е. выполняется равенство $L_{e,\text{и.а.рmax}} = L_{\text{и.а.р}}$. Тогда максимум параметра $L_{e,\text{и.а.рmax}}$ найдем при равенстве параметров эквивалентных идеальных циклов $\pi_{2\text{опт.и.а.р}} = \pi_{2\text{равн}\eta_e}$, чтобы обеспечить компенсацию влияния потерь энергии в процессах сжатия и расширения с учетом этого равенства при одинаковых КПД сравниваемых сложных и изотермно-адиабатных циклов $\eta_{e1-2} = \eta_{e,\text{и.а.р}}$, т.е. при одинаковых потерях энергии в этих циклах.

Как показано далее, в цикле с изотермно-адиабатным расширением при равенстве параметров $\pi_{2\text{опт.и.а.р}} = \pi_{2\text{равн}\eta_e}$ также происходит компенсация влияния потерь энергии, но при уменьшении КПД процессов сжатия и расширения η и экономической СПД $\pi_{\text{опт}\eta_{e1-1}}$ в резуль-

тате перехода от цикла с промежуточным подогревом к более совершенному циклу с изотермно-адиабатным расширением с увеличением параметра $\theta_{и.а.р}$ по сравнению с параметром θ_{1-2} .

На рис. 3 показано обеспечение абсолютного максимума работы сложного цикла с промежуточным подогревом $L_{e1-2абстmax}$, равного максимальной работе простого цикла L_{t1-1} , и максимума работы цикла с изотермно-адиабатным расширением $L_{и.а.р.аmax}$, который меньше максимальной работы простого цикла L_{t1-1} , т.к. достигается при меньшей экономической СПД по сравнению со сложным циклом и соответственно меньшем дополнительном подводе теплоты согласно формуле (7). Параметры сложных и изотермно-адиабатных циклов найдены по известным формулам [2, 3].

Как видно из рис. 3, с увеличением КПД процессов сжатия и расширения η увеличиваются параметры $\pi_{опт\eta e1-1}$ и $\pi_{2равн\eta e}$, и работа сложного цикла с промежуточным подогревом, являясь максимальной $L_{e1-2max}$ при этих параметрах, достигает абсолютного максимума и, как ранее показано теоретически, становится равной максимальной работе простого цикла $L_{e1-2абстmax} = L_{t1-1}$ при КПД $\eta_{оптL_{e1-2}} = 0,941$, найденном по формуле (16), которому соответствует оптимальная СПД $\pi_{опт\eta e1-1} = 85$ и оптимальный по работе цикла параметр $\pi_{2равн\eta e} = 22$.

Видно также, что с увеличением КПД процессов сжатия и расширения η работа цикла с изотермно-адиабатным расширением также увеличивается и достигает максимума $L_{и.а.р.аmax}$, который для простоты найден также из рис. 4 при равенстве параметров $\pi_{2опт.и.а.р} = \pi_{2равн\eta e}$ с использованием зависимости $\pi_{2опт.и.а.р} = f(\eta)$. Этот максимум обеспечивается при меньшей величине КПД $\eta_{оптL_{и.а.р}} = 0,923$ и СПД $\pi_{опт\eta e1-1} = 65$. Как показано на рис. 3, КПД сравниваемых сложных и изотермно-адиабатных циклов при равенстве параметров $\pi_{2опт.и.а} = \pi_{2равн\eta e}$ также оказываются равными $\eta_{e2-2} = \eta_{и.а.р} = \eta_{и.а.}$.

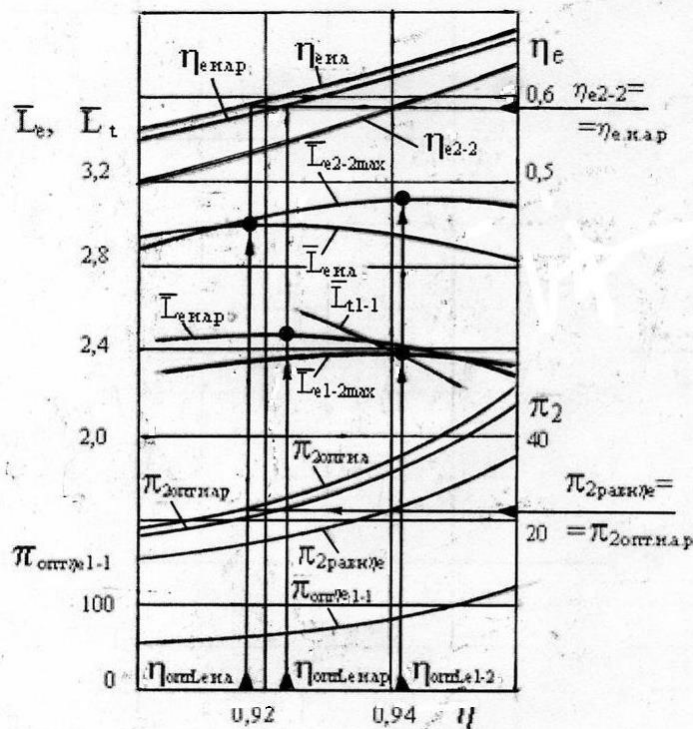


Рис. 3. Зависимость параметров изотермно-адиабатных и сложных циклов с промежуточным охлаждением и подогревом от КПД процессов сжатия и расширения ($\eta_k = \eta_t = \eta$, $\pi_{2опт.\eta e1-1} = f(\eta)$, $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 6$):

• максимум

На рис. 3 показано также, что при введении промежуточного охлаждения дополнительно к промежуточному подогреву абсолютный максимум работы такого сложного цикла $L_{e2-2абстmax}$

обеспечивается также при КПД $\eta_{\text{оптLe1-2}} = 0,941$, т.к. параметр $\pi_{2\text{равн}\eta_e}$, зависящий от эффективного КПД простого цикла η_{e1-1} , является одинаковым для циклов с промежуточным охлаждением (подогревом) при $\eta_{e1-2} = \eta_{e2-1} = \eta_{e1-1}$.

Аналогично при введении изотермно-адиабатного сжатия дополнительно к изотермно-адиабатному расширению также обеспечивается максимум работы такого изотермно-адиабатного цикла $L_{e.u.a.max}$, но с уменьшением КПД процессов сжатия и расширения от $\eta_{\text{оптLi.a.p}} = 0,923$ до $\eta_{\text{оптLi.a.}} = 0,918$ так, как КПД $\eta_{e.i.a} > \eta_{e.i.ap}$ и соответственно $\pi_{2\text{опт.i.a}} > \pi_{2\text{опт.i.a.p}}$ при $\eta = const$.

Обеспечение эквивалентности изотермно-адиабатных и сложных циклов с промежуточным охлаждением и подогревом по эффективному КПД при повышении эффективного КПД сложного цикла за счет регенерации теплоты отработавших газов. При повышении эффективного КПД сложного цикла за счет регенерации теплоты отработавших в турбине газов (ОГ) при условии равенства эффективных КПД простых и сложных циклов $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$ увеличиваются перепад температур газа и воздуха в регенераторе и эффективность регенерации по сравнению с другими допустимыми условиями, когда $\eta_{e2-2} > \eta_{e1-1}$.

В работе [7] приведена формула оптимальной степени регенерации, при которой обеспечивается максимум эффективного КПД сложного цикла η_{e2-2p} при равенстве эффективных КПД $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$ (при параметре $\pi_{1\text{равн}\eta_e}$).

$$\sigma_{p.опт} = \frac{(\theta \eta_k \eta_m + e) [e^{2_{равн}\eta_e} - (1 - \eta_{e2-2p}) e]}{(e^{2_{равн}\eta_e} \theta \eta_k \eta_m + e^2) \eta_{e2-2p}} \quad (17)$$

где $\theta = T_2/T_a$ – степень повышения температуры в цикле при $T_a = 288K$; η_{e2-2p} – КПД сложного цикла с регенерацией; параметр $e_{1\text{равн}\eta_e}$ соответствует формуле (5).

Как видно из рис. 4, в сложном цикле при степени сжатия и расширения в первой ступени $\pi_{1\text{равн}\eta_e}$ и степени регенерации $\sigma_{p.опт}$ достигается увеличение эффективного КПД до максимального значения $\eta_{e2-2pmax}$, при котором параметр $\pi_{1\text{равн}\eta_e}$ и экономическая СПД цикла $\pi_{\Sigma\text{опт}\eta_{e1-1}}$ становятся оптимальными по этому КПД.

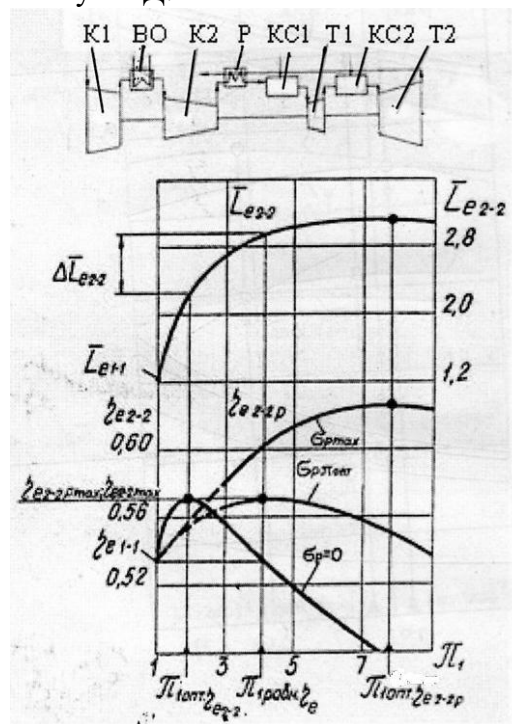


Рис. 4. Зависимость параметров сложных циклов ГТУ с промежуточным охлаждением и подогревом от степени сжатия и расширения в первой ступени при экономической СПД и раз-
ной степени регенерации ($\theta_1 = \theta_2 = \theta = 6$; $\pi_{\Sigma\text{опт}\eta_{e1-1}} = 60$; $\eta_{k1} = \eta_{k2} = \eta_k = 0,85$; $\eta_{t1} = \eta_{t2} = \eta_t = 0,94$): • максимумы.

Это объясняется тем, что при увеличении параметра $\pi_1 > \pi_{1\text{опт}\eta_{e2-2}}$ уменьшается эффективный КПД цикла η_{e2-2} без регенерации ($\sigma_p = 0$), но увеличивается эффективность регенерации, т. к. увеличивается температура ОГ и понижается температура воздуха за компрессором. В результате при условии равенства эффективных КПД $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$ (при параметре $\pi_{1\text{равн}\eta_e}$) обеспечивается практически равенство КПД $\eta_{e2-2p\text{max}} = \eta_{e2-2\text{max}}$.

Тогда эффективность использования теплоты ОГ со степенью регенерации $\sigma_{p,\text{опт}}$ при увеличении степени сжатия и расширения в первой ступени от $\pi_{1\text{опт}\eta_{e2-2}}$ до $\pi_{1\text{равн}\eta_e}$ заключается в увеличении работы сложного цикла на величину $\Delta \bar{L}_{e2-2}$ практически без потери экономичности.

Как видно также из рис. 4, при увеличении степени регенерации от $\sigma_{p,\text{опт}}$ до максимальной $\sigma_{p\text{max}} = 1$ максимум эффективного КПД сложного цикла $\eta_{e2-2p\text{max}}$ достигается при $\pi_{1\text{опт}\eta_{e2-2p}} > \pi_{1\text{равн}\eta_e}$, когда при отсутствии регенерации этот КПД падает значительно ниже эффективного КПД простого цикла $\eta_{e2-2} \ll \eta_{e1-1}$. Так как последний обеспечивается повышением термодинамических параметров цикла T_r и π_Σ , то такой способ повышения эффективного КПД сложного цикла за счет усложнения регенератора нельзя считать оптимальным.

Для увеличения работы и эффективного КПД сложного цикла нужно увеличивать общую СПД до экономической, а степень регенерации до величины равной или большей $\sigma_{p,\text{опт}}$ при равенстве эффективных КПД $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$. Таким образом, регенерация дополняет повышение экономичности за счет повышения термодинамических параметров цикла, и усложнение регенератора соответствует усложнению двигателя.

Найдем также степень регенерации $\sigma_{p,\text{эkv}}$, обеспечивающую равенство эффективных КПД сложного и изотермно-адиабатного циклов $\eta_{e2-2p} = \eta_{e,\text{и.аmax}}$, т.е. эквивалентность этих циклов по эффективному КПД. Как показано в [7], при $\eta_{k1} = \eta_{k2} = \eta_k$, $\eta_{t1} = \eta_{t2} = \eta_t$.

$$\sigma_{p,\text{эkv}} = \left(1 - \frac{\eta_{e1-1}}{\eta_{e,\text{и.а}}}\right) \frac{Q_1 + \theta \eta_t (1 - 1/e_{1\text{равн}\eta_e})}{Q_1 - \theta \eta_t \eta_{e1-1}} \quad (18)$$

где

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

теплота, подведенная в первой ступени сложного цикла. При оптимизации необходимо обеспечить равенство $\sigma_{p,\text{опт}} = \sigma_{p,\text{эkv}}$.

Обеспечение эквивалентности изотермно-адиабатных и сложных циклов по работе и эффективному КПД. На рис. 5 показано обеспечение эквивалентности по работе и эффективному КПД изотермно-адиабатного и сложного циклов с промежуточным охлаждением и подогревом при КПД $\eta_{\text{опт}L_{e,\text{и.а}}}$, соответствующем максимуму работы изотермно-адиабатного цикла.

При увеличении КПД процессов сжатия и расширения η и СПД $\pi_{\text{опт}\eta_{e1-1}}$ параметр $\sigma_{p,\text{опт}}$ уменьшается, а параметр $\sigma_{p,\text{эkv}}$ увеличивается, т.к. уменьшается перепад температур газа и воздуха в регенераторе. При КПД процессов сжатия и расширения $\eta_{\text{эkv}}$, который немного меньше КПД $\eta_{\text{опт}L_{e,\text{и.а}}}$, обеспечивается равенство $\sigma_{p,\text{опт}} = \sigma_{p,\text{эkv}}$, и степень регенерации становится оптимально-эквивалентной $\sigma_{p,\text{опт(эkv)}} = 0,65$, соответствующей границе интенсивного увеличения поверхности теплообмена регенератора [8].

Эффективные КПД изотермно-адиабатного и сложного циклов с оптимально-эквивалентной степенью регенерации также равны $\eta_{e2-2p,\text{опт(эkv)}} = \eta_{e,\text{и.аmax}}$, а работа сложного цикла намного больше работы изотермно-адиабатного цикла $L_{e2-2} > L_{e,\text{и.аmax}}$.

Увеличение работы сложного цикла $L_{e2-2} > L_{e,\text{и.аmax}}$ объясняется тем, что потери энергии в сложном цикле (в котором отсутствуют изотермные участки сжатия и расширения) больше,

чем в изотермно-адиабатном цикле. Соответственно уменьшается эффективный КПД сложного цикла, равный η_{e1-1} , а параметр $\pi_{1\text{равн}\eta_e}$ ($\epsilon_{1\text{равн}\eta_e}$) и дополнительный подвод теплоты увеличиваются, как видно из формулы (5).

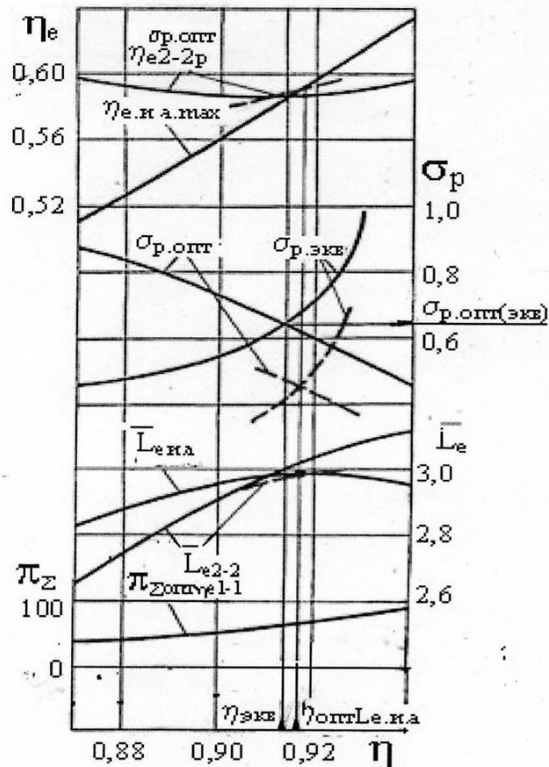


Рис. 5. Зависимость параметров изотермно-адиабатных и сложных циклов с промежуточным охлаждением и подогревом со степенью регенерации $\sigma_{p,\text{опт}}$ и $\sigma_{p,\text{экв}}$ от КПД процессов сжатия и расширения (условия на рис. 4): — при одинаковых КПД процессов сжатия и расширения в циклах; - - - при одинаковых потерях энергии в процессах сжатия и расширения.

Как видно из рис. 5, при выравнивании потерь энергии в процессах сжатия и расширения циклов (за счет увеличения КПД этих процессов сложного цикла) обеспечивается эквивалентность сложного и изотермно-адиабатного циклов по работе и эффективному КПД при КПД процессов сжатия и расширения $\eta_{\text{опт},Le.н.а.}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При оптимизации сложного цикла с одноступенчатым промежуточным охлаждением и подогревом для увеличения работы и повышения эффективного КПД за счет регенерации теплоты ОГ необходимо при условии равенства эффективных КПД простого и сложного циклов $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$ (при параметре $\pi_{1\text{равн}\eta_e}$) увеличивать СПД до оптимальной по эффективному КПД простого цикла $\pi_{\Sigma\text{опт},\eta_{e1-1}}$, а степень регенерации – до равной или большей оптимальной величины $\sigma_{p,\text{опт}}$, при которой СПД $\pi_{\Sigma\text{опт},\eta_{e1-1}}$ и параметр $\pi_{1\text{равн}\eta_e}$ становятся оптимальными по эффективному КПД сложного регенеративного цикла η_{e2-2p} .

2. При оптимизации сложного цикла по п. 1 с учетом повышения КПД процессов сжатия и расширения в перспективе обеспечивается равенство максимальной работы изотермно-адиабатного цикла и работы сложного цикла $L_{e2-2} = L_{e.н.а.макс}$, а также равенство (эквивалентность) эффективных КПД изотермно-адиабатного цикла и сложного регенеративного цикла $\eta_{e2-2p} = \eta_{e.н.а.макс}$ с оптимально-эквивалентной степенью регенерации теплоты ОГ $\sigma_{p,\text{опт}(экв)}$, соответствующей границе интенсивного увеличения поверхности теплообмена регенератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фаворский О.Н., Полищук В.Л.** Выбор тепловой схемы и профиля отечественной мощной энергетической ГТУ нового поколения и ПГУ на ее основе. // Теплоэнергетика. 2010. №2. С. 2–6. [Favorskiy O.N., Polishchuk V. L. *Selecting the thermal circuit and profile of a Russian large new-generation power-generating gas turbine unit and a combined-cycle plant built around it*. Thermal Engineering. 2010. Vol. 57. No. 2. P. 2–6 (in Russian).]
2. **Уваров В.В.** Газовые турбины и газотурбинные установки. М.: Высшая школа, 1970. 320 с. [Uvarov, V.V. *Gas turbines and gas turbine plants*. Moscow: Vysshaya Shkola. 1970. 320 p. (in Russian).]
3. **Иванов В.А.** Путь увеличения эффективности цикла газотурбинных установок // Вестник СГАУ. 2009. № 3(19). С. 102–108. [Ivanov V.A. *Way of increase in efficiency of cycle gas turbine units*. Vestnik of Samara State Aerospace University. 2009. No. 3(19), P. 102–108 (in Russian).]
4. **Иванов В.А.** Общность идеальных, изотермно-адиабатных и сложных циклов ГТУ и нахождение максимума их работы // Извещения РАН. Энергетика. 2010. №2. С. 113–123. [Ivanov V.A. *Air standard brayton, isotherm, adiabat, compound cycles of gas turbine and finding of maximum its work*. Izvestiya RAN. Energetika. 2010. No. 2. P.113–123 (in Russian).]
5. **Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок** / В. И. Бакулев [и др.]. М.: МАИ, 2003. 682 с. [Bakulev V.I. et al. *Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants*. Moscow: MAI. 2003. 682 p. (in Russian).]
6. **Андрющенко А.И.** Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок. М.: Высшая школа, 1985. 320 с. [An-dryushchenko A.I. *Fundamentals of thermodynamics of heat and power plant cycles*. Moscow: Vysshaya Shkola. 1985. 320 p. (in Russian).]
7. **Ильин Р.А., Иванов В.А.** Регенерация теплоты отработавших газов в ГТУ простого и сложного циклов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 2. С. 21–24. [Ilyin R.A., Ivanov V.A. *Thermal ratio of waste gases in gas turbine of simple and complex cycles*. Chemical and Petroleum Engineering. 2016. No. 2. P. 21–24 (in Russian).]
8. **Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г.** Стационарные газотурбинные установки: Справочник. Л.: Машиностроение, 1989. 512 с. [Ar-seniev L.V., Tyryshkin V.G. *Stationary gas turbine units: Reference book*. Leningrad: Mashinostroenie Publ. 1989. 512 p. (in Russian).]

ОБ АВТОРАХ

ИВАНОВ Вадим Александрович, инженер-конструктор 1-й категории АО «ОДК-Авиадвигатель». Дипл. инж.-механ. по авиац. двиг. (ППИ, 1967), канд. техн. наук. по тепл. двиг. (КГТУ, 1996). Иссл. сложных циклов ГТУ.

ПЛЕШИВЫХ Артур Сергеевич, инженер отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования систем автоматического управления АО «ОДК-Авиадвигатель», аспирант кафедры «Прикладная математика» ПНИПУ.

METADATA

Title: Simplified method of optimizing the cycle of gas turbine units.

Authors: V.A. Ivanov¹, A.S. Pleshivikh

Affiliation: JSC UEC-Aviadvigatel, Russia.

Email: ¹ iva-perm@rambler.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 28, no. 1 (103), pp. 14-24, 2024. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The paper examines a method for increasing the work and effective efficiency of a complex regenerative cycle with intermediate cooling and heating by means of selecting the efficiency criterion and the degree of regeneration of exhaust gases. The efficiency criterion is the condition of equality of the effective efficiencies of simple and complex cycles under which it ensured that the work of the complex cycle and the temperature difference between gas and air in the regenerator increase in comparison with other conditions acceptable in terms of economic efficiency, while the degree of regeneration corresponds to the boundary of an intensive increase in the regenerator's heat exchange surface. It is shown that it is possible to provide, using the considered method, the equivalence (and replacement during optimization) of the isothermal-adiabatic and complex cycles.

Key words: complex cycle, isothermal-adiabatic cycle, degree of regeneration

About authors:

IVANOV Vadim Aleksandrovich, 1st category design engineer at JSC UEC-Aviadvigatel. Dipl. mechanical engineer in the field of aircraft engines (Perm Polytechnic Institute, 1967), Cand. of Tech. Sci. in the field of heat engines (KSTU, 1996). Studies the complex cycles of gas turbine plants.

PLESHIVYKH Arthur Sergeevich, engineer at the Department of the Computational and Experimental Work and Design of Automatic Control Systems of JSC UEC-Aviadvigatel, postgraduate student at the Department of Applied Mathematics of Perm National Research Polytechnic University