

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.438.082

РАЦИОНАЛЬНЫЙ СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

В.А. Иванов

ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь
iva-perm@rambler.ru

Резюме: 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 по сравнению с другими допустимыми условиями. 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.

RATIONAL METHOD OF OPTIMIZATION OF CYCLE OF GAS TURBINE UNIT

V.A. Ivanov

Open Society “Aviadvigatel”, Perm
E-mail: iva-perm@rambler.ru

Abstract: The method of increase of work and efficiency of complex regenerative cycle with intermediate cooling and heating is considers to account of choice criterion to effective and degree to regeneration of heat outflow gas. The criterion effective is a condition equality effective efficiency of simple and complex cycles, under which is provided increase of work of complex cycle in contrast with other of possible condition. The degree to regeneration correspond of border of intensive increase to surface regenerator. It is shown possibility of provision of considered method of equivalence (and change at optimization) of isothermal-adiabatic and complex cycles.

Key words: complex cycle, isothermal-adiabatic cycle, degree to regeneration.

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. Показать условия, при которых обеспечивается эквивалентность сложных 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 которой обеспечивается рациональность рассматриваемого способа оптимизации [1].

Теоретический анализ. Для простоты 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 для обеспечения эквивалентности 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.

Таблица 1

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 $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-2}$	$e_{k1\text{равн}\eta e} = \frac{\eta_{k1}}{\eta_{k2}} e(1 - \eta_{e1-1}) \quad (1)$	$e_{t1\text{равн}\eta e} = \frac{\eta_{t1}}{\eta_{t2}} e(1 - \eta_{e1-1}) \quad (2)$
Максимум эффективного КПД изотермно - адиабатного цикла $\eta_{e.и.а\max}$	$e_{k10пт\eta e} = \frac{\eta_{k1}}{\eta_{k2}} e(1 - \eta_{e.и.а\max}) \quad (3)$	$e_{t10пт\eta e} = \frac{\eta_{t1}}{\eta_{t2}} e(1 - \eta_{e.и.а\max}) \quad (4)$

В табл. 1 приведены закономерности, обеспечивающие равенство эффективных КПД простого (цикл 1-1) и сложного (цикл 2-2) циклов $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-2}$ [3], а также известные закономерности [2], обеспечивающие максимум эффективного КПД изотермно-адиабатных циклов $\eta_{e.и.а\max}$.

Здесь и далее $e=\pi^{(\kappa-1)/\kappa}$; $e_{k1}=\pi_{k1}^{(\kappa-1)/\kappa}$; $e_{t1}=\pi_{t1}^{(\kappa-1)/\kappa}$; $\pi=p_{\kappa}/p_a$ – степень повышения давления (СПД) в цикле; $\pi_{k1}=p_{k1}/p_a$ – степень сжатия в первой ступени цикла; $\pi_{t1}=p_{\kappa}/p_{t1}$ – степень расширения в первой ступени цикла; p , T – полное давление и температура заторможенного потока; κ – компрессор; $\kappa.c$ – камера сгорания; t – турбина; $в.о$ – воздухоохладитель; p – регенератор; 1, 2–первая и вторая ступень сжатия и расширения сложного цикла; $а$ – окружающая атмосфера; κ – показатель адиабаты (принято $\kappa=\kappa_{\Gamma}=\kappa_{в}=1,4$); Γ – газ; $в$ – воздух; η – коэффициент полезного действия (КПД) цикла и процессов сжатия (расширения) в цикле; e – эффективный; Σ – общий.

Обеспечение максимума работы и эффективного КПД сложных циклов

Как видно из рис. 1, в сложном цикле при равенстве эффективных КПД $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-2}$ 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. (Здесь и далее $\bar{L}_e = L_e / (C_p T_a)$ – относительная работа (отнесенная к произведению теплоемкости на температуру атмосферного воздуха), $\bar{Q} = Q / (C_p T_a)$ – относительная удельная теплота.

Указанное отличие СПД $\pi_{\Sigma \text{опт.}Le2-2}$ и $\pi_{\Sigma \text{опт.}\eta_{e1-1}}$ в сложном цикле показано теоретически в статье [3] и является принципиальным отличием от простого цикла, в котором экономическая СПД $\pi_{\Sigma \text{опт.}\eta_{e1-1}}$ значительно больше оптимальной по эффективной работе $\pi_{\Sigma \text{опт.}Le1-1}$. Благодаря этому отличию в сложном цикле при равенстве эффективных КПД $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$ существует возможность повысить экономичность и увеличить мощность ГТУ путем увеличения СПД до экономической.

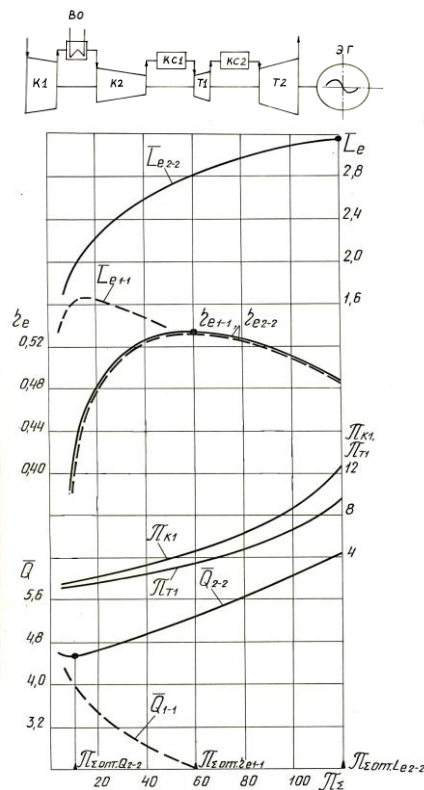


Рис. 1. Зависимость параметров простых и сложных циклов ГТУ с промежуточным охлаждением и подогревом от общей степени повышения давления ($\theta_1 = \theta_2 = \theta = 6$; $\eta_{k1} = 0,87$; $\eta_{k2} = \eta_k = 0,85$; $\eta_{t1} = 0,89$; $\eta_{t2} = \eta_t = 0,94$): — сложный цикл с промежуточным охлаждением и подогревом при условии $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$; - - - простой цикл; • - экстремумы

Оптимальный способ повышения эффективного КПД сложного цикла за счет регенерации

Повышение эффективного КПД сложного цикла за счет регенерации теплоты отработавших в турбине газов (ОГ) рассмотрим при условии равенства эффективных КПД простых и сложных циклов $\eta_{e1-1} = \eta_{e2-2}$, так как при этом условии, по сравнению с другими допустимыми условиями (когда $\eta_{e2-2} > \eta_{e1-1}$), увеличивается перепад температур газа и воздуха в регенераторе и эффективность регенерации.

Для простоты примем условия $\eta_{k1}=\eta_{k2}=\eta_k$ и $\eta_{t1}=\eta_{t2}=\eta_t$, при которых формулы параметров (1) и (2) можно заменить одной формулой

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

которой соответствует равенство $\pi_{k1\text{равн.}\eta_e} = \pi_{t1\text{равн.}\eta_e} = \pi_{1\text{равн.}\eta_e}$.

В работе [4] получена формула степени регенерации, при которой обеспечивается максимум зависимости эффективного КПД сложного цикла η_{e2-2p} от степени сжатия и расширения в первой ступени π_1 при равенстве эффективных КПД $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-2}$ (при параметре $\pi_{1\text{равн.}\eta_e}$),

$$\sigma_{\text{рлопт}} = \frac{(\theta \eta_k \eta_t + e)[e_{1\text{равн.}\eta_e}^2 - (1 - \eta_{e2-2p})e]}{(e_{1\text{равн.}\eta_e}^2 \theta \eta_k \eta_t + e^2) \eta_{e2-2p}}, \quad (6)$$

где $\theta=T_t/T_a$ – степень повышения температуры в цикле при $T_a=288\text{K}$; η_{e2-2p} –КПД сложного цикла с регенерацией.

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

Это объясняется тем, что при увеличении параметра $\pi_1 > \pi_{1\text{опт.}\eta_{e2-2}}$ уменьшается эффективный КПД η_{e2-2} без регенерации, но увеличивается эффективность регенерации, так как 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 максимум КПД $\eta_{e2-2p\text{max}}$.

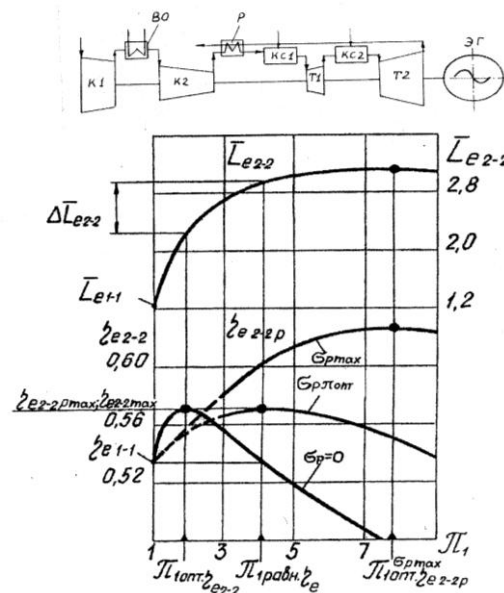


Рис.2. Зависимость параметров сложных циклов ГТУ от степени сжатия и расширения в первой ступени при разной степени регенерации ($\theta_1=\theta_2=\theta=6$; $\pi_{\Sigma\text{опт.}\eta_{e1-1}}=60$; $\eta_{k1}=\eta_{k2}=\eta_k=0,85$; $\eta_{t1}=\eta_{t2}=\eta_t=0,94$): • - максимумы

Эффективность использования теплоты ОГ со степенью регенерации $\sigma_{\text{рлопт}}$ при увеличении степени сжатия и расширения в первой ступени от $\pi_{1\text{опт}\eta_{\text{е2-2}}}$ до $\pi_{1\text{равн}\eta_{\text{е}}}$ заключается в увеличении работы сложного цикла на величину $\Delta \bar{L}_{\text{е2-2}}$ практически без потери экономичности.

Как видно также из рис. 2, при увеличении степени регенерации от $\sigma_{\text{рлопт}}$ до максимальной $\sigma_{\text{рmax}}=1$ максимум эффективного КПД сложного цикла $\eta_{\text{е2-2рmax}}$ достигается при $\pi_{1\text{опт}\eta_{\text{е2-2рmax}}} > \pi_{1\text{равн}\eta_{\text{е}}}$, когда при отсутствии регенерации этот КПД падает значительно ниже эффективного КПД простого цикла $\eta_{\text{е2-2}} < \eta_{\text{е1-1}}$. Так как последний обеспечивается повышением термодинамических параметров цикла $T_{\text{г}}$ 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 $\sigma_{\text{рлопт}}$ при равенстве эффективных КПД $\eta_{\text{е1-1}} = \eta_{\text{е2-2}}$. Таким образом, регенерация дополняет повышение экономичности за счет повышения термодинамических параметров цикла $T_{\text{г}}$ и π_{Σ} , и усложнение регенератора соответствует усложнению двигателя.

Обеспечение эквивалентности изотермно-адиабатных и сложных циклов по работе и эффективному КПД

Сложные циклы рассмотрим при условии обеспечения равенства эффективных КПД $\eta_{\text{е1-1}} = \eta_{\text{е2-2}}$, а изотермно-адиабатные циклы – при условии обеспечения максимума эффективного КПД этих циклов – $\eta_{\text{е.и.а.макс}}$. Условия сравнения циклов обеспечим при степени сжатия и расширения в первой ступени, найденным по формулам в табл. 1, которые отличаются лишь эффективными КПД $\eta_{\text{е1-1}}$ и $\eta_{\text{е.и.а.}}$.

Общность формул основывается на общности этих циклов, которая заключается в том, что экономичность и работа действительных циклов с промежуточным охлаждением (или подогревом) и изотермно-адиабатным сжатием (или расширением) равны экономичности и работе идеальных циклов, образованных на T - S диаграммах во второй ступени этих действительных циклов [5].

С использованием общности циклов найдем оптимальную по работе степень сжатия (расширения) во второй ступени упомянутых действительных циклов $\pi_{2\text{опт.Ле}}$, которая должна соответствовать параметру $\pi_{\text{оптLt}}$ идеальных циклов, т.е.

$$\pi_{2\text{оптLe}} = \pi_{\text{оптLt}} (e_{2\text{оптLe}} = e_{\text{оптLt}}), \quad (7)$$

где $e_{\text{оптLt}} = \sqrt{\theta}$.

Заметим, что в идеальных циклах невозможно использование промежуточного охлаждения (подогрева) для увеличения работы циклов без уменьшения термического КПД $\eta_{\text{т}}$. Тогда на рис. 3 показано изменение работы действительных изотермно-адиабатных и сложных циклов по мере их приближения к идеальным циклам при увеличении в перспективе КПД процессов сжатия и расширения $\eta_{\text{к}} = \eta_{\text{т}} = \eta$ (и, соответственно, экономической СПД $\pi_{\Sigma\text{опт.}\eta_{\text{е1-1}}}$).

Как видно из рис. 3, при увеличении КПД процессов сжатия и расширения η работа сложных и изотермно-адиабатных действительных циклов увеличивается и достигает максимума при параметре $\pi_{2\text{опт.Ле}}$, при котором КПД этих циклов также оказываются равными $\eta_{\text{е2-2}} = \eta_{\text{е.и.а.}}$.

Как видно также из рис. 3, максимум работы сложного цикла имеет большую величину и достигается при большем значении КПД процессов сжатия и расширения ($\eta_{\text{опт.Ле2-2}} = 0,943$), чем максимум работы изотермно-адиабатного цикла ($\eta_{\text{опт.Ле.и.а}} = 0,918$). Это объясняется более высоким КПД изотермно-адиабатного цикла $\eta_{\text{е.и.а}}$ и, соответственно,

большей величиной параметра $\pi_{2\text{опт}\eta_{e.и.а}}$ по сравнению с параметрами η_{e2-2} и $\pi_{2\text{равн}\eta_e}$ сложного цикла при $\eta=\text{const}$ на рис. 3. Увеличение максимума работы $L_{e2-2\text{max}} > L_{e.и.а\text{max}}$ 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 $\pi_{1\text{равн}\eta_{e1-1}}$ ($e_{1\text{равн}\eta_{e1-1}}$) увеличивается.

Найдем степень регенерации, обеспечивающую равенство эффективных КПД сложного и изотермно-адиабатного циклов $\eta_{e2-2p} = \eta_{e.и.а\text{max}}$, т.е. эквивалентность этих циклов по эффективному КПД. Как показано в работе [4], при $\eta_{k1} = \eta_{k2} = \eta_k$, $\eta_{t1} = \eta_{t2} = \eta_t$

$$\sigma_{p.\text{экв}} = (1 - \frac{\eta_{e1-1}}{\eta_{e.и.а}}) \frac{Q_1 + \theta \eta_t (1 - 1/e_{1\text{равн.}\eta_e})}{Q_1 - \theta \eta_t \eta_{e1-1}}, \quad (8)$$

где $Q_1 = (\theta - \frac{e/e_{1\text{равн.}\eta_e} - 1}{\eta_k} - 1)$ – теплота, подведенная в первой ступени сложного цикла.

Согласно ранее сказанному, при оптимизации необходимо обеспечить равенство $\sigma_{p\text{опт}} = \sigma_{p.\text{экв}}$.

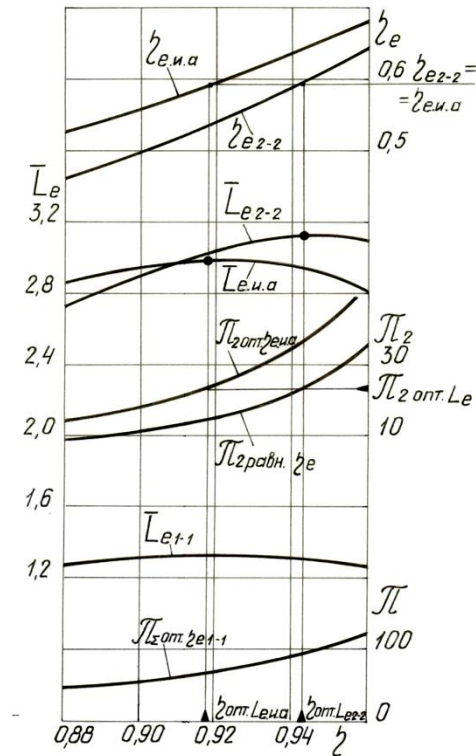


Рис. 3. Зависимость параметров изотермно-адиабатных и сложных циклов с промежуточным охлаждением и подогревом от КПД процессов сжатия и расширения ($\eta_k = \eta_t = \eta$, $\pi_{2\text{опт.}\eta_{e1-1}} = f(\eta)$, $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 6$): •-максимум

На рис. 4 показано обеспечение эквивалентности изотермно-адиабатного и сложного циклов при КПД $\eta_{\text{опт.Л.е.и.а.}}$, соответствующем максимуму работы изотермно-адиабатного цикла. При увеличении КПД процессов сжатия и расширения η параметр $\sigma_{\text{р.опт}}$ уменьшается, а параметр $\sigma_{\text{р.экв}}$ увеличивается. При КПД $\eta_{\text{экв}}$, который немного меньше КПД $\eta_{\text{опт.Л.е.и.а.}}$, обеспечивается равенство $\sigma_{\text{р.опт}} = \sigma_{\text{р.экв}}$ и степень регенерации становится оптимально-эквивалентной $\sigma_{\text{р.опт(экв)}} = 0,65$, соответствующей границе интенсивного увеличения поверхности теплообмена регенератора [6]. Эффективные КПД изотермно-адиабатного и сложного циклов с оптимально-эквивалентной степенью регенерации также равны $\eta_{\text{е2-2р}}^{\sigma_{\text{р.опт(экв)}}} = \eta_{\text{е.и.а.мак}}$, а работа сложного цикла равна или немного больше работы изотермно-адиабатного цикла $L_{\text{е2-2}} \geq L_{\text{е.и.а.}}$.

Как видно из рис. 4, при выравнивании потерь энергии в процессах сжатия и расширения циклов (за счет увеличения КПД процессов сложного цикла) обеспечивается эквивалентность сложного и изотермно-адиабатного циклов по работе и эффективному КПД при КПД процессов сжатия и расширения $\eta_{\text{опт.Л.е.и.а.}}$.

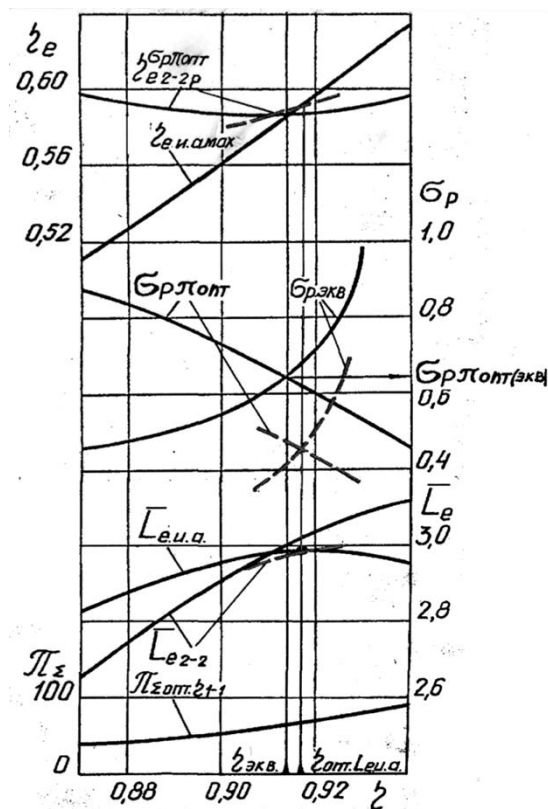


Рис. 4. Зависимость параметров изотермно-адиабатных и сложных циклов со степенью регенерации $\sigma_{\text{р.опт}}$ и $\sigma_{\text{р.экв}}$ от КПД процессов сжатия и расширения (условия на рис. 3): — при одинаковых КПД процессов сжатия и расширения в циклах; - - - при одинаковых потерях энергии в процессах сжатия и расширения

Выводы.

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 $\eta_{e1-1}=\eta_{e2-2}$, увеличивать СПД до оптимальной по эффективному КПД простого цикла $\pi_{\text{опт.}\eta_{e1-1}}$, а степень регенерации до равной или большей величины $\sigma_{p\text{опт}}$, при которой эта СПД становится оптимальной 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 $L_{e2-2}=L_{e.i.\text{amax}}$, а также равенство эффективных КПД изотермно-адиабатного цикла и сложного цикла $\eta_{e2-2p}=\eta_{e.i.\text{amax}}$ со степенью регенерации теплоты ОГ $\sigma_{p\text{опт(эКВ)}}$, соответствующей границе интенсивного увеличения поверхности теплообмена регенератора.

Литература

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.
2. Уваров В.В. Газовые турбины и газотурбинные установки. М.: Высшая школа, 1970. 320с.
3. Иванов В. А. Путь увеличения эффективности цикла газотурбинных установок // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3(19). С. 102–108.
4. 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.
5. Иванов В.А. Общность идеальных, изотермно-адиабатных и сложных циклов ГТУ и нахождение максимума их работы // Известия РАН. Энергетика. 2010. №2. С. 113–123.
6. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Стационарные газотурбинные установки: справочник. Л.: Машиностроение, 1989. 512с.

Авторы публикации

Иванов Вадим Александрович – канд. техн. наук, инженер ОАО“Авиадвигатель”.
E-mail: iva-perm@rambler.ru

References

1. Favorskiy O. N., Polishchuk V. L. The choice of the thermal scheme and a profile of domestic powerful power Gas–Turbine of new generation and Combined-Cycle Plants on its basis.//Thermal engineering, 2010, No. 2. P. 2-6. (in Russ).
- 2.. Uvarov V. V. Gas Turbines and Gas–Turbine Plants (Vysshaya Shkola, Moscow, 1970, 320p) (in Russ).
3. Ivanov V. A. Way of increase in efficiency of cycle gas turbine units // Samara state aerospace university. Bulletin. issue No. 3 (19). 2009. P. 102-108. (In Russ.)
4. Ilyin R. A., Ivanov V. A. Regeneration of warmth of the fulfilled gases in Gas–Turbine of simple and complex cycles//Chemical and petroleum engineering, 2016, No. 2. P. 21-24. (In Russ.)
5. V. A. Ivanov V. A. Equivalence of Ideal, Isothermal–Adiabatic, and Complex Cycles of Gas Turbine Power Plants and Determination of the Maximum Efficiency of Their Operation// Izvestiya Ran. Energetika. 2010. No. 2. P.113-123. (In Russ.)

©В.А. Иванов

6. Arseniev L.V., Tyryshkin V.G. Stationary gas turbine units. Reference book. Leningrad: Mashinostroenie Publ, 1989. 512p. (in Russ).

Authors of the publication

Vadim A. Ivanov – cand. sci. (techn.) , engineer of Open Society “Aviadvigatel”.

Поступила в редакцию

19 декабря 2016 г.