

УДК 621.438.082

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ РАБОТЫ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КПД ПРИ ВВЕДЕНИИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПОДОГРЕВА В ЦИКЛ ГТУ

В. А. ИВАНОВ

[iva-perm@rambler.ru](mailto:iva-perm@rambler.ru)

АО «ОДК-Авиадвигатель»

*Поступила в редакцию 17.03.2022*

**Аннотация.** Показано теоретически, что в ГТУ сложного цикла со свободной турбиной и промежуточным подогревом обеспечивается эквивалентность критериев эффективности: равенства эффективных КПД простого и сложного цикла и максимума степени понижения давления в свободной турбине при степени повышения давления, соответствующей этому максимуму в ГТУ простого цикла. Показано, что при этой степени повышения давления обеспечивается также компенсация потерь энергии в процессах сжатия и расширения и, соответственно, максимальная удельная работа сложного цикла, которая становится равной удельной работе простого идеального цикла. Показано также, что в упомянутой ГТУ сложного цикла при использовании как критерия эффективности максимума степени понижения давления в свободной турбине и степени повышения давления, соответствующей абсолютному максимуму этого критерия эффективности, обеспечивается максимальная величина эффективного КПД, достижение которой возможно и в простом цикле, но за счет повышения температуры газа и, соответственно, экономической степени повышения давления до ее равенства упомянутой степени повышения давления ГТУ сложного цикла.

**Ключевые слова:** простой цикл, сложный цикл, промежуточный подогрев, эффективный КПД.

### ВВЕДЕНИЕ

Так как схемы ГТУ, созданных на базе современных судовых и авиационных ГТД, обычно включают свободную силовую турбину, то в работе [1] вместо обеспечивающего одинаковую экономичность равенства эффективных КПД простого и сложного цикла [2] предложено использовать максимум степени понижения давления в свободной турбине (СТ) как критерий эффективности проектирования ГТУ сложного цикла. Использование предложенного критерия эффективности рассмотрено в интервале увеличения степени повышения давления в цикле (СПД) от соответствующей максимуму степени понижения давления в СТ ГТУ простого цикла до соответствующей абсолютному максимуму этого параметра в СТ ГТУ сложного цикла.

Рассмотрен физический смысл использования предложенного критерия эффективности и его эквивалентность равенству эффективных КПД простого и сложного цикла при СПД, соответствующей максимуму степени понижения давления в СТ ГТУ простого цикла. Показано повышение эффективности использования дополнительно подведенной теплоты при увеличении СПД ГТУ сложного цикла больше упомянутой СПД ГТУ простого цикла. Последнее аналогично повышению эффективного КПД простого цикла в процессе его сравнения с эффективным КПД сложного цикла.



Введем обозначения:

к – компрессор;

кс – камера сгорания;

тк – турбина компрессора ГТУ простого цикла;

т – турбина компрессора ГТУ сложного цикла;

ст – свободная турбина ГТУ простого и сложного цикла;

$p^*$ ,  $T$  – полное давление и температура заторможенного потока;

$C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении;

а – окружающая атмосфера;

Г – газ;

в – воздух;

$\kappa$  – показатель адиабаты (принято  $\kappa = \kappa_c = \kappa_e = 1,4$ );

опт – оптимальный;

е – эффективный;

э – эквивалентный;

$\theta = T_{\Gamma}^*/T_a$  – степень повышения температуры в простом и сложном цикле при  $T_a = 288\text{K}$ ;

$\pi^* = p^*/p_a$  – степень повышения давления (СПД) в простом и сложном цикле;

$\pi_{\text{тк1}}^* = p_{\text{тк1}}^*/p_{\text{тк1}}^*$  ( $\pi_{\text{т1}}^* = p_{\text{т1}}^*/p_{\text{т1}}^*$ ) – степень понижения давления в первой турбине ГТУ простого (сложного) цикла;

$\pi_{\text{ст1-1}}^* = p_{\text{тк2}}^*/p_a$  ( $\pi_{\text{ст1-2}}^* = p_{\text{т2}}^*/p_a$ ) – степень понижения давления в свободной турбине ГТУ простого (сложного) цикла;

$e = \pi^{*(\kappa-1)/\kappa}$ ;

$e_{\text{тк1}}^* = \pi_{\text{тк1}}^{*(\kappa-1)/\kappa}$ ;

$e_{\text{т1}}^* = \pi_{\text{т1}}^{*(\kappa-1)/\kappa}$ ;

$e_{\text{ст1-1}}^* = \pi_{\text{ст1-1}}^{*(\kappa-1)/\kappa}$ ;

$e_{\text{ст1-2}}^* = \pi_{\text{ст1-2}}^{*(\kappa-1)/\kappa}$ ;

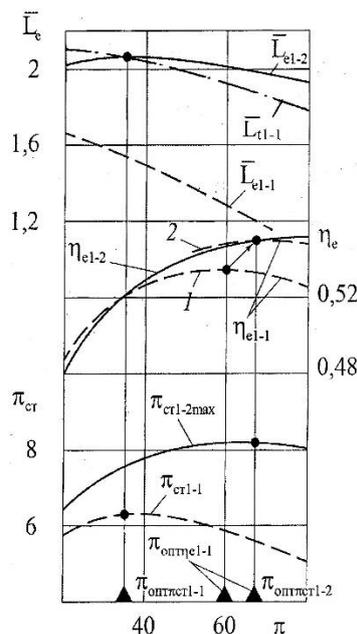
$\eta$  – коэффициент полезного действия (КПД) цикла и процессов сжатия (расширения) в цикле;

$L$  – удельная работа;

$Q$  – удельное количество подведенной теплоты;

1, 2 – первая и вторая ступень расширения цикла.

На рис. 2 показана зависимость от СПД эффективного КПД  $\eta_e$ , удельной работы  $\bar{L}_e$  и других параметров ГТУ простого и сложного цикла при критерии эффективности  $\pi_{\text{ст1-2max}}^*$ . Здесь  $\bar{L}_e = L_e / (C_p T_a)$  – относительная удельная работа (далее – просто работа) ГТУ простого и сложного циклов (отнесенная к произведению теплоемкости на температуру атмосферного воздуха). Параметры ГТУ простого и сложного циклов со свободной турбиной найдены по формулам, полученным в [1].



**Рис. 2.** Зависимость параметров ГТУ простого и сложного циклов со свободной турбиной от степени повышения давления в цикле ( $\theta_1=\theta_2=\theta=6$ ;  $\eta_k=0,85$ ;  $\eta_{r1}=\eta_{r2}=0,88$ ;  $\eta_{cr}=0,95$ ): — — ГТУ простого действительного цикла; — ГТУ сложного цикла при использовании критерия эффективности  $\pi_{cr1-2max}$ ; — · — · ГТУ простого идеального цикла; • максимум, абсолютный максимум; 1 – КПД простого цикла при  $\eta_k=0,85$ ; 2 – КПД простого цикла при  $\eta_k=0,88$ ; —→ повышение КПД ГТУ простого цикла  $\eta_{e1-1max}$  при повышении КПД компрессора этой ГТУ с  $\eta_k=0,85$  до  $\eta_k=0,88$ .

Как видно из рис. 2, максимум степени понижения давления в СТ ГТУ сложного цикла  $\pi_{cr1-2max}^*$  и равенство эффективных КПД простого (цикл 1-1) и сложного (цикл 1-2) циклов  $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$  являются эквивалентными критериями эффективности при СПД  $\pi_{оптπср1-1}^*$ , соответствующей максимуму степени понижения давления в СТ ГТУ простого цикла  $\pi_{cr1-1max}^*$ . Покажем теоретически эквивалентность упомянутых критериев эффективности при этой СПД. Формула СПД  $\pi_{оптπср1-1}^*$  ( $e_{оптπср1-1}$ ) получена в [3]:

$$e_{оптπср1-1} = \frac{\theta \eta_k \eta_{mk} + 1}{2} \quad (1)$$

где  $\eta_{tk}$  – КПД турбины компрессора ГТУ простого цикла.

Эквивалентность рассматриваемых критериев эффективности  $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$  и  $\pi_{cr1-2max}^*$  будет обеспечена при равенстве параметров

$$\pi_{m1оптπср1-2}^* = \pi_{m1равн\eta_e}^* (e_{r1оптπср1-2} = e_{r1равн\eta_e}) \quad (2)$$

Учтем, что при данной СПД максимум степени понижения давления в СТ ГТУ сложного цикла  $\pi_{cr1-2max}^*$  достигается при оптимальной степени расширения в первой турбине (первой ступени цикла) этой ГТУ  $\pi_{r1оптπср1-2}^*$  ( $e_{r1оптπср1-2}$ ) [1]

$$e_{m1оптπср1-2} = 1 / \left( 1 - \frac{e-1}{2\theta \eta_k \eta_{m1}} \right) \quad (3)$$

где  $\eta_{r1}$  – КПД первой турбины компрессора ГТУ сложного цикла.

Учтем, также что равенство эффективных КПД ГТУ простого и сложного циклов  $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$  достигается при параметре  $\pi_{r1равн\eta_e}^*$  ( $e_{r1равн\eta_e}$ ) [2]

$$e_{m1равн\eta_e} = (\eta_{m1} / \eta_{m\Sigma}) e (1 - \eta_{e1-1}) \quad (4)$$

где  $\eta_{r\Sigma}$  – общий КПД турбин ГТУ простого цикла.

Подставим формулы (3) и (4) в равенство (2). Тогда получим уравнение

$$(\eta_{\tau 1} / \eta_{\tau \Sigma}) e(1 - \eta_{e1-1}) = 1 / (1 - \frac{e-1}{2\theta\eta_{\kappa}\eta_{\tau 1}}),$$

в левой части которого, используя известную формулу КПД простого цикла [4]

$$\eta_{e1-1} = (e-1)(\theta\eta_{\kappa}\eta_{\tau\Sigma} / e-1) / \eta_{\kappa}[\theta - (e-1) / \eta_{\kappa} - 1].$$

Найдем параметр

$$(1 - \eta_{e1-1}) = [e(\theta - 1 - \theta\eta_{m\Sigma}) + \theta\eta_{m\Sigma} J / e[\theta - (e-1) / \eta_{\kappa} - 1]],$$

а затем после преобразований с учетом найденного параметра получим уравнение

$$e^2 - \frac{[(\theta - 1 - \theta\eta_{m\Sigma}) / \eta_{m\Sigma} J(2\theta\eta_{\kappa}\eta_{m1} + 1) + \theta]}{(\theta - 1 - \theta\eta_{m\Sigma}) / \eta_{m\Sigma}} e - \frac{2\theta\eta_{\kappa}(\theta\eta_{m1} - \theta + 1) - \theta}{(\theta - 1 - \theta\eta_{m\Sigma}) / \eta_{m\Sigma}} = 0,$$

решением которого является корень

$$e = \frac{ab + \theta + \sqrt{[(ab + \theta)^2 + 4a(c - \theta)]}}{2a} \quad (5)$$

где  $a = (\theta - 1 - \theta\eta_{\tau\Sigma}) / \eta_{\tau\Sigma}$ ,  $b = 2\theta\eta_{\kappa}\eta_{\tau 1} + 1$ ,  $c = 2\theta\eta_{\kappa}(\theta\eta_{\tau 1} - \theta + 1)$ .

Найденное решение соответствует СПД  $\pi_{\text{э.кр}}^*$  ( $e_{\text{э.кр}}$ ), при которой выполняется равенство (2) и обеспечивается эквивалентность рассматриваемых критериев эффективности при одинаковых потерях энергии в процессах сжатия и расширения простого и сложного циклов.

На рис. 2 показано также, что при СПД  $\pi_{\text{опт.ст1-1}}^*$ , соответствующей максимуму степени понижения давления в СТ ГТУ простого цикла  $\pi_{\text{ст1-1max}}^*$ , обеспечивается максимум работы сложного цикла  $\bar{L}_{e1-2max}$ .

Покажем теоретически, что максимум параметра  $\bar{L}_{e1-2max}$  обеспечивается при компенсации потерь энергии в процессах сжатия и расширения за счет дополнительного подвода теплоты между турбинами компрессора ГТУ сложного цикла, т.е. этот максимум соответствует работе идеального простого цикла.

Для этого запишем равенство работ действительного сложного и идеального простого цикла

$$\overline{L}_{e1-2} = \overline{L}_{t1-1} \quad (6)$$

и найдем СПД, при которой это равенство обеспечивается и которая должна соответствовать СПД  $\pi_{\text{опт.ст1-1}}^*$ .

В равенстве (6) работа идеального простого цикла соответствует формуле  $\overline{L}_{t1-1} = (e-1)(\theta/e-1)$ , а работу сложного цикла представим как  $\overline{L}_{e1-2} = \eta_{e1-2} \overline{Q}_{1-2}$ . Тогда при использовании равенства эффективных КПД  $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$  вместо критерия эффективности  $\pi_{\text{ст1-2max}}^*$  с учетом эквивалентности этих параметров при СПД  $\pi_{\text{опт.ст1-1}}^*$  и известной формулы параметра  $\overline{Q}_{1-2} = [\theta - (e-1) / \eta_{\kappa}] - 1 + \theta\eta_{\tau 1}(1 - 1/e_{\tau 1})$  [1] получим уравнение

$$[\theta - (e-1) / \eta_{\kappa}] - 1 + \theta\eta_{\tau 1}(1 - 1/e_{\tau 1}) = (e-1)(\theta/e-1) / \eta_{e1-1},$$

которое после преобразования правой части с использованием известной формулы КПД  $\eta_{e1-1}$  принимает вид

$$[\theta - (e-1) / \eta_{\kappa}] - 1 + \theta\eta_{\tau 1}(1 - 1/e_{\tau 1}) = (\theta - e)(\theta - (e-1) / \eta_{\kappa}) - 1 / (\theta\eta_{\kappa}\eta_{\tau\Sigma} - e) / \eta_{\kappa}.$$

После преобразований с использованием в левой части этого уравнения формулы (3) параметра  $e_{\text{т1опт.е.ст1-2}}$  вместо формулы (4) параметра  $e_{\text{т1равн}\eta e}$  с учетом эквивалентности этих параметров при СПД  $\pi_{\text{опт.ст1-1}}^*$  получим уравнение

$$e^2 - \frac{2\eta_{\kappa}^2(\theta - 1) - [(\theta\eta_{\tau\Sigma} - 4)\eta_{\kappa} + 1]}{2\eta_{\kappa} - 1} e - \frac{\theta\eta_{\kappa}[2\eta_{\kappa}(\theta - 1)(\eta_{\tau\Sigma} - 1) + \eta_{\tau\Sigma} - 2]}{2\eta_{\kappa} - 1} = 0,$$

решением которого является корень

$$e = \frac{(a-c)\eta_k + 1 - \sqrt{[(a-c)\eta_k + 1]^2 + \theta\eta_k[a(\eta_{т\Sigma} - 1) + \eta_{т\Sigma} - 2]4b}}{2b} \quad (7)$$

где  $a = 2\eta_k(\theta - 1)$ ,  $b = 2\eta_k - 1$ ,  $c = \theta\eta_{т\Sigma} - 4$ .

Найденное решение соответствует СПД  $\pi^*_{\text{ком}}$  ( $e_{\text{ком}}$ ), при которой выполняется равенство (6) и обеспечивается компенсация потерь энергии в процессах сжатия и расширения сложного цикла.

Затем покажем, что найденные СПД  $\pi^*_{\text{э.кр}}$  и  $\pi^*_{\text{ком}}$  соответствуют СПД  $\pi^*_{\text{оптпст1-1}}$ . Результаты расчетов по формулам (1), (5) и (7) одинаковы, хотя первая формула является функцией КПД турбины компрессора  $\eta_{\text{тк}}$ , вторая – функцией КПД первой турбины  $\eta_{\text{т1}}$  и общего КПД турбины двигателя  $\eta_{\text{т\Sigma}}$ , третья – функцией КПД  $\eta_{\text{т\Sigma}}$ , а преобразование полученных формул к зависимости от одинаковых КПД является сложной задачей. Таким образом, теоретически показано, что эквивалентность рассматриваемых критериев эффективности и максимальная работа сложного цикла, равная работе простого идеального цикла, обеспечивается при СПД, соответствующей максимуму степени понижения давления в СТ ГТУ простого цикла  $\pi^*_{\text{ст1-1max}}$ .

Как видно также из рис. 2, с увеличением СПД больше  $\pi^*_{\text{оптпст1-1}}$  эффективный КПД ГТУ сложного цикла из-за повышения эффективности использования дополнительно подведенной теплоты при увеличении максимума степени понижения давления в СТ  $\pi^*_{\text{ст1-2max}}$  становится больше эффективного КПД простого цикла  $\eta_{\text{е1-1}}$ , и при СПД  $\pi^*_{\text{оптпст1-2}}$  обеспечивается практически максимум эффективного КПД ГТУ сложного цикла  $\eta_{\text{е1-2max}}$ , который становится заметно выше максимума эффективного КПД ГТУ простого цикла  $\eta_{\text{е1-1max}}$  при СПД  $\pi^*_{\text{оптпст1-1}}$ .

Как показано в [5], равенство эффективных КПД  $\eta_{\text{е1-1max}} = \eta_{\text{е1-2max}}$ , соответствующее равенству оптимальных СПД

$$\pi^*_{\text{оптпст1-1}} = \pi^*_{\text{оптпст1-2}} \quad (e_{\text{оптпст1-1}} = e_{\text{оптпст1-2}}), \quad (8)$$

можно обеспечить, увеличивая параметр  $\pi^*_{\text{оптпст1-1}}$  ( $e_{\text{оптпст1-1}}$ ) и эффективный КПД простого цикла  $\eta_{\text{е1-1max}}$  за счет повышения КПД компрессора  $\eta_k$  или общего КПД турбин  $\eta_{\text{т\Sigma}}$  этого цикла. Выбор одного из этих КПД для нахождения увеличенного значения КПД  $\eta_{\text{е1-1max}}$  не имеет принципиального значения. Тогда для простоты найдем КПД компрессора простого цикла  $\eta_{\text{к1-1}}$ , при котором обеспечивается равенство (8). Для этого используем известное выражение СПД  $\pi^*_{\text{оптпст1-1}}$  ( $e_{\text{оптпст1-1}}$ ) [4]

$$e_{\text{оптпст1-1}} = \frac{\theta\eta_{\text{м\Sigma}} - \sqrt{(\theta\eta_{\text{м\Sigma}})^2 - \theta\eta_{\text{м\Sigma}}(\theta\eta_{\text{м\Sigma}} + 1 - \theta)(\theta\eta_k + 1 - \eta_k)}}{(\theta\eta_{\text{м\Sigma}} + 1 - \theta)}, \quad (9)$$

которое дает непосредственную зависимость этого параметра от КПД процессов сжатия и расширения  $\eta_k$  и  $\eta_{\text{т\Sigma}}$ .

Приравняв параметры  $e_{\text{оптпст1-2}}$  и  $e_{\text{оптпст1-1}}$ , получим уравнение

$$e_{\text{оптпст1-2}} = [\theta\eta_{\text{м\Sigma}} - \sqrt{(\theta\eta_{\text{м\Sigma}})^2 - \theta\eta_{\text{м\Sigma}}(\theta\eta_{\text{м\Sigma}} + 1 - \theta)(\theta\eta_{\text{к1-1}} + 1 - \eta_{\text{к1-1}})}] / (\theta\eta_{\text{м\Sigma}} + 1 - \theta)$$

которое после преобразований принимает вид

$$\theta\eta_{\text{м\Sigma}}(\theta - 1)\eta_k = 2\theta\eta_{\text{м\Sigma}}e_{\text{оптпст1-2}} - e_{\text{оптпст1-2}}^2(\theta\eta_{\text{м\Sigma}} + 1 - \theta) - \theta\eta_{\text{м\Sigma}}.$$

Из полученного уравнения найдем КПД компрессора простого цикла  $\eta_{\text{к1-1}}$ , обеспечивающий равенство КПД  $\eta_{\text{е1-1max}} = \eta_{\text{е1-2max}}$  и СПД  $\pi^*_{\text{оптпст1-1}} = \pi^*_{\text{оптпст1-2}}$ :

$$\eta_{\text{к1-1}} = \frac{2e_{\text{оптпст1-2}}(1 - \frac{ae_{\text{оптпст1-2}}}{2\theta\eta_{\text{м\Sigma}}}) - 1}{(\theta - 1)}, \quad (10)$$

где  $a = (\theta\eta_{\text{т}} + 1 - \theta)$ ,  $e_{\text{оптпст1-2}} = (2\theta\eta_k\eta_{\text{т1}} + 1)/3$  – параметр получен в [1].

Как показано на рис. 2, в ГТУ сложного цикла при СПД  $\pi^*_{\text{опт}\pi_{\text{ст}1-2}} = 67$  за счет повышения эффективности использования дополнительно подведенной теплоты при обеспечении параметра  $\pi^*_{\text{ст}1-2\text{абс.макс}}$  эффективный КПД ГТУ сложного цикла повышается практически до максимума  $\eta_{\text{e}1-2\text{макс}}$ . Показано также повышение эффективного КПД ГТУ простого цикла до обеспечения равенства  $\eta_{\text{e}1-1\text{макс}} = \eta_{\text{e}1-2\text{макс}}$  при обеспечении равенства СПД сравниваемых циклов  $\pi^*_{\text{опт}\eta_{\text{e}1-1}} = \pi^*_{\text{опт}\pi_{\text{ст}1-2}}$  за счет повышения КПД компрессора этой ГТУ, найденное по формуле (10), с  $\eta_{\text{к}1-1} = 0,85$  до  $\eta_{\text{к}1-1} = 0,88$ .

Таким образом, физический смысл СПД  $\pi^*_{\text{опт}\pi_{\text{ст}1-2}}$ , соответствующей абсолютному максимуму степени понижения давления в СТ ГТУ сложного цикла  $\pi^*_{\text{ст}1-2\text{абсмакс}}$ , заключается в ее равенстве СПД  $\pi^*_{\text{опт}\eta_{\text{e}1-1}}$ , увеличенной за счет повышения КПД компрессора  $\eta_{\text{к}1-1}$  ГТУ простого цикла.

В табл. также показано повышение КПД компрессора ГТУ простого цикла  $\eta_{\text{к}1-1}$ , обеспечивающее равенство эффективных КПД  $\eta_{\text{e}1-1\text{макс}} = \eta_{\text{e}1-2\text{макс}}$  при одинаковых оптимальных по экономичности СПД сравниваемых циклов  $\pi^*_{\text{опт}\eta_{\text{e}1-1}} = \pi^*_{\text{опт}\pi_{\text{ст}1-2}}$ , найденное по формуле (10), при разной степени повышения температуры  $\theta$  в ГТУ сложного цикла, от которой зависит величина оптимальных СПД  $\pi^*_{\text{опт}\pi_{\text{ст}1-2}}$  и максимальных КПД  $\eta_{\text{e}1-2\text{макс}}$

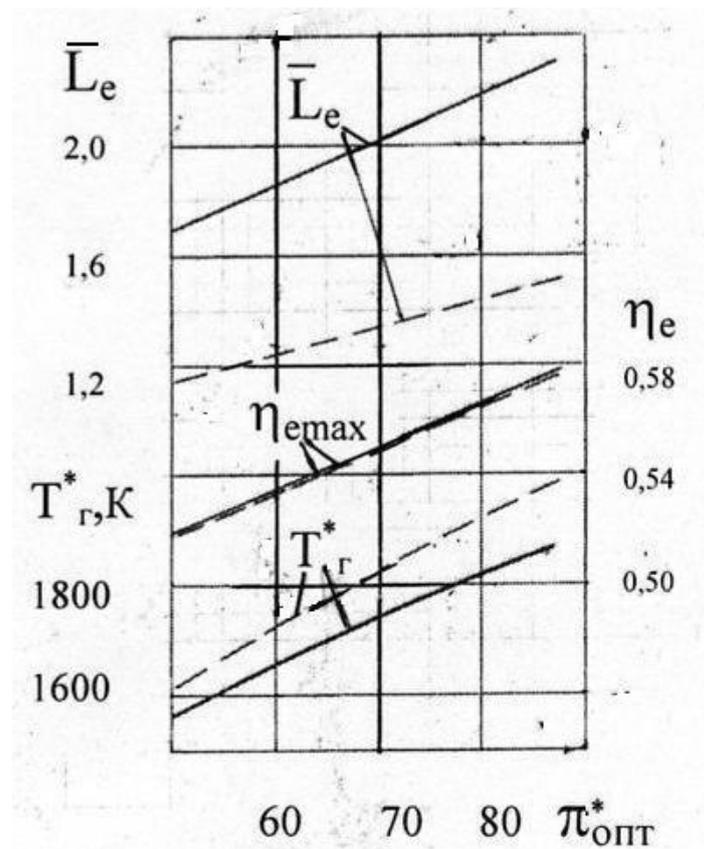
Таблица 1

**Повышение КПД компрессора ГТУ простого цикла  $\eta_{\text{к}1-1}$   
в процессе обеспечения равенства эффективных КПД  $\eta_{\text{e}1-1\text{макс}} = \eta_{\text{e}1-2\text{макс}}$**

$\theta$	5,5	6	6,5
$T^*_\Gamma$	1584	1728	1872
$\pi^*_{\text{опт}\eta_{\text{e}1-1}} = \pi^*_{\text{опт}\pi_{\text{ст}1-2}}$	51	67	86
$\eta_{\text{e}1-1\text{макс}} = \eta_{\text{e}1-2\text{макс}}$	0,52	0,546	0,576
$\eta_{\text{к}1-1}$	0,872	0,879	0,886

Достижение максимума эффективного КПД в ГТУ сложного цикла при СПД, соответствующей абсолютному максимуму степени понижения давления в СТ, возможно также и в ГТУ простого цикла при одинаковых КПД процессов сжатия и расширения за счет повышения температуры газа и, соответственно, оптимальной по эффективному КПД (экономической) степени повышения давления до обеспечения ее равенства упомянутой СПД сложного цикла. Повышение температуры газа (параметр  $\theta$ ) в ГТУ простого цикла вместо повышения КПД компрессора  $\eta_{\text{к}1-1}$  найдено по зависимости, которую дает формула (9) при увеличении СПД  $\pi^*_{\text{опт}\eta_{\text{e}1-1}}$  ( $\pi^*_{\text{опт}\eta_{\text{e}1-1}}$ ) до обеспечения ее равенства  $\pi^*_{\text{опт}\eta_{\text{e}1-1}} = \pi^*_{\text{опт}\pi_{\text{ст}1-2}}$ .

На рис. 3 показано найденное таким способом повышение температуры газа в ГТУ простого цикла по сравнению с ГТУ сложного цикла (или понижение температуры газа в ГТУ сложного цикла по сравнению с ГТУ простого цикла) при одинаковых оптимальных СПД  $\pi^*_{\text{опт}\eta_{\text{e}1-1}} = \pi^*_{\text{опт}\pi_{\text{ст}1-2}} = \pi^*_{\text{опт}}$ , одинаковых эффективных КПД  $\eta_{\text{e}1-1\text{макс}} = \eta_{\text{e}1-2\text{макс}} = \eta_{\text{емакс}}$  и одинаковых КПД процессов сжатия и расширения.



**Рис. 3.** Зависимость температуры газа и удельных параметров ГТУ простого и сложного цикла от оптимальной степени повышения давления  $\pi^*_{\text{опт}\eta_{e1-1}} = \pi^*_{\text{опт}\pi_{c1-2}} = \pi^*_{\text{опт}}$ :

--- ГТУ простого цикла;  
 ——— ГТУ сложного цикла.

Как видно из рис. 3, в ГТУ сложного цикла за счет обеспечения максимума параметра  $\pi^*_{\text{ст}1-2\text{max}}$  как критерия эффективности удельная работа  $\bar{L}_{\text{уд}}$  на 40–50 % больше, а температура газа перед турбиной  $T^*_{\text{г}}$  на 50–100 К ниже, чем в ГТУ простого цикла при одинаковых оптимальных СПД  $\pi^*_{\text{опт}}$  и максимальных эффективных КПД  $\eta_{e\text{max}}$ .

### ВЫВОДЫ

1. Теоретически показано, что в сложном цикле ГТУ со свободной турбиной и промежуточным подогревом обеспечивается эквивалентность критериев эффективности: равенства эффективных КПД ГТУ простого и сложного цикла и максимума степени понижения давления в СТ ГТУ сложного цикла при степени повышения давления, соответствующей упомянутому максимуму в ГТУ простого цикла.

2. Теоретически показано, что в сложном цикле ГТУ со свободной турбиной и промежуточным подогревом при использовании как критерия эффективности максимума степени понижения давления в СТ и СПД, соответствующей максимуму степени понижения давления в СТ ГТУ простого цикла, обеспечивается компенсация потерь энергии в процессах сжатия и расширения и максимальная удельная работа, которая становится равной удельной работе простого идеального цикла и больше этой работы при дальнейшем увеличении СПД с повышением эффективного КПД по сравнению с простым действительным циклом.

3. Теоретически показано, что в сложном цикле ГТУ со свободной турбиной и промежуточным подогревом при использовании как критерия эффективности максимума степени понижения давления в СТ и СПД, соответствующей абсолютному максимуму этого критерия эффективности, обеспечивается максимальная величина эффективного КПД, достижение

которой возможно также и в простом цикле, но за счет повышения температуры газа и, соответственно, экономической степени повышения давления до обеспечения ее равенства упомянутой СПД сложного цикла.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов В.А.** Выбор оптимальной степени повышения давления и принципа проектирования ГТУ сложного цикла // Изв. РАН. Энергетика, 2016, №1. С. 106-114. [V.A. Ivanov, "Choice of optimum degree of increase pressure and principle of design of gas turbine of complex cycle", (in Russian), in Izv. RAN. Energetika, no. 1, pp. 106-114, 2016.]
2. **Иванов В.А.** Путь увеличения эффективности цикла газотурбинных установок // Вестник СГАУ. 2009. № 3 (19). С. 102-108. [V.A. Ivanov, Way of increase in efficiency of cycle gas turbine units, (in Russian), in Vestnik SSAU, no. 3 (19), pp. 102-108, 2009.]
3. **Иванов В.А.** Определение оптимальной степени повышения давления в газотурбинных установках // Вестник Астраханского ГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2014. №4. С. 81-85. [V.A. Ivanov, "Determination of the optimal degree of pressure increase in gas turbine units", (in Russian), in Vestnik ASTU, Ser.: Marine engineering and technology, no. 4, pp. 81-85, 2014.]
4. **Теория**, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / В. И. Бакулев [и др.]. М.: МАИ, 2003. 682 с. [V. I. Bakulev, et al., "Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants", (in Russian). Moscow: MAI, 2003. 682 p.]
5. **Иванов В.А.** Критерий эффективности ГТУ сложного цикла с промежуточным подогревом и свободной турбиной // Вестник УГАТУ, 2022, т. 26, № 2 (96). С. 53-59. [V.A. Ivanov, "Criterion to effective of gas turbine of complex cycle with intermediate heating and free turbine", (in Russian), in Vestnik UGATU, vol. 26, no. 2 (96), pp. 53-59, 2022.]

#### ОБ АВТОРАХ

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

#### METADATA

**Title:** Ensuring maximum work and increasing effective efficiency when introducing intermediate heating in the cycle of a gas turbine plant

**Authors:** V. A. Ivanov

**Affiliation:**

JSC UEC-Aviadvigatel, Russia.

**Email:** iva-perm@rambler.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 1(99), pp. 13-21, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** It is shown theoretically that in a gas turbine plant of a complex cycle with a free turbine and intermediate heating, equivalence is provided for the efficiency criteria: the equality of the effective efficiencies of a simple and complex cycle and the maximum degree of pressure decrease in a free turbine at a degree of pressure increase corresponding to this maximum in a gas turbine plant of a simple cycle. It is shown that at this degree of pressure increase, also provided is the compensation of energy losses in the processes of compression and expansion and, correspondingly, the maximum specific work of a complex cycle, which becomes equal to the specific work of a simple ideal cycle. It is also shown that in the above-mentioned gas turbine plant of a complex cycle, when using, as the efficiency criterion, the maximum degree of pressure decrease in a free turbine and the degree of pressure increase corresponding to the absolute maximum of this efficiency criterion, provided is the maximum value of effective efficiency, which can be achieved in a simple cycle as well, but due to an increase in gas temperature and, correspondingly, the economic degree of pressure increase until its equality to the above-mentioned degree of pressure increase in a gas turbine plant of a complex cycle.

**Key words:** simple cycle, complex cycle, intermediate heating, effective efficiency.

**About authors:**

**IVANOV Vadim Aleksandrovich**, 1st category design engineer at JSC "UEC-Aviadvigatel". Dipl. mechanical engineer for aircraft engines (PPI, 1967), Cand. of Tech. Sci. (KSTU, 1996). Studies the complex cycles of gas turbine plants.