

УДК 621.452.3

ЦИКЛ ГТД С ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ РАСШИРЕНИЕМ В ТУРБИНЕ

М. А. МУРАЕВА¹, И. М. ГОРЮНОВ², В. Ф. ХАРИТОНОВ³

¹ marija_muraeva@rambler.ru, ² gorjunov@mail.ru, ³ vkhariton@yandex.ru,

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 5 июня 2015 г.

Аннотация. В настоящей статье представлены результаты теоретического анализа цикла ГТД с изотермическим расширением в турбине. Проанализировано влияние параметров цикла на его эффективность, проведено сравнение идеального цикла ГТД с изэнтропическим и изотермическим расширением в турбине.

Ключевые слова: цикл ГТД, изотермическое расширение, турбина.

ВВЕДЕНИЕ

Термодинамическая эффективность цикла тепловой машины является базовым условием его применения. Основными показателями термодинамического совершенства цикла являются работа цикла $L_{ц}$ и эффективный КПД цикла η_e (термический КПД η_t в случае идеального цикла).

Рабочий процесс ГТД основан на цикле Брайтона, в идеальном случае представляющим собой чередование процессов изэнтропического увеличения давления (сжатия), изобарного увеличения температуры рабочего тела, изэнтропического уменьшения давления (расширения) и изобарного уменьшения температуры. В настоящее время параметры цикла авиационных ГТД приблизились к предельным значениям. Дальнейшее существенное повышение эффективности ГТД можно обеспечить внесением принципиальных изменений в рабочий процесс. Одним из направлений исследований в области совершенствования рабочего процесса ГТД является применение изотермического расширения в турбине.

В настоящей статье представлены результаты теоретического анализа идеального цикла ГТД с изотермическим расширением в турбине. Приведены формулы расчета работы цикла и КПД. Проанализировано влияние параметров цикла ГТД с изотермическим расширением в турбине на его эффективность, а также проведено сравнение идеального цикла ГТД с изэнтропическим и изотермическим расширением в турбине.

Условные обозначения

C_p – теплоемкость при постоянном давлении;
 k – показатель адиабаты;
 L – работа;
 p – давление;
 q – количество тепла;
 q_t – относительный расход топлива;
 R – газовая постоянная;
 s – энтропия;
 T – температура;
 v – объем;
 δ – относительная разница;
 η – коэффициент полезного действия;
 θ – степень подогрева;
 π – степень повышения (понижения) давления;
 $P_{уд}$ – удельная тяга.

Индексы

* – по заторможенным параметрам;
 Σ – суммарный;
 e – эффективный;
 t – термический;
 B – сечение на входе в компрессор;
 Γ – сечение на входе в турбину;
 K – сечение на выходе из компрессора;
 k – компрессор;
отв. – отведенный;
подв. – подведенный;
 C – сечение на срезе сопла;
 T – сечение на выходе из турбины;
 t – турбина;
 ζ – цикл.

Сокращения

ГТД – газотурбинный двигатель;
КПД – коэффициент полезного действия.

РАБОТА И КПД ИДЕАЛЬНОГО ЦИКЛА С ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ РАСШИРЕНИЕМ В ТУРБИНЕ

На рис. 1 представлены $T-s$ и $p-v$ диаграммы идеального цикла ГТД с изотермическим расширением в турбине. На этом рисунке процесс, происходящий в турбине, представлен изотермой $\Gamma^* - T^*$

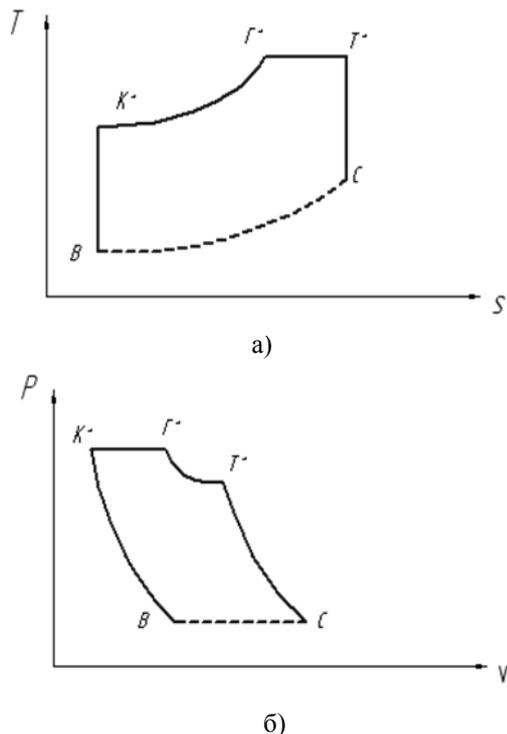


Рис. 1. $T-s$ (а) и $p-v$ (б) диаграммы идеального цикла с изотермическим расширением

Анализ математических моделей процессов, происходящих в рассматриваемом цикле, позволяет сделать вывод о том, что цикл определяется тремя параметрами: температурой газа в турбине T_{Γ}^* (или степенью подогрева $\theta = \frac{T_{\Gamma}^*}{T_B^*}$), степенью повышения давления в компрессоре π_K^* , степенью понижения давления в турбине π_T^* . Причем при заданных двух параметрах третий однозначно определяется из условия равенства (3) работы турбины (2) и работы компрессора (1)

$$L_K = \frac{k}{k-1} RT_B^* \left(\pi_K^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$L_T = RT_{\Gamma}^* \ln(\pi_T^*) \quad (2)$$

$$L_T = L_K$$

$$\frac{k}{k-1} RT_B^* \left(\pi_K^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) = RT_{\Gamma}^* \ln(\pi_T^*). \quad (3)$$

Из равенства (3) получены зависимости каждого из параметров цикла от двух других:

$$\theta = \frac{k}{k-1} \frac{1}{\ln(\pi_T^*)} \left(\pi_K^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right). \quad (4)$$

$$\pi_T^* = \exp \left[\frac{k}{k-1} \frac{1}{\theta} \left(\pi_K^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

$$\pi_K^* = \frac{k-1}{k} \theta \ln \pi_T^* + 1 \quad (6)$$

Работа цикла

Работа цикла по определению равна:

$$L_{\text{Ц}} = q_{\text{подв.}} - q_{\text{отв.}} = q_{K^*-\Gamma^*} + q_{\Gamma^*-T^*} - q_{C-B^*} \quad (7)$$

Учитывая выражение $q_{\Gamma^*-T^*} = L_T$ для идеального изотермического расширения и равенство работы турбины и компрессора выразим количество подведенного и отведенного тепла в выражении (7) через теплосодержание:

$$L_{\text{Ц}} = C_p T_{\Gamma}^* - C_p T_K^* + C_p T_K^* - C_p T_B^* - C_p T_C + C_p T_B^* \quad (8)$$

Из выражения (8) получим выражение для определения работы идеального цикла с изотермическим расширением:

$$L_{\text{Ц}} = C_p (T_{\Gamma}^* - T_C). \quad (9)$$

Учитывая изменение давления в цикле и уравнение изоэнтропы для процесса $T^* - C$, получим формулу для определения работы турбины через параметры цикла:

$$L_{\text{Ц}} = C_p T_{\Gamma}^* \left(1 - \left(\frac{\pi_T^*}{\pi_K^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right). \quad (10)$$

Подставляя в выражение (10) формулы (4)–(6) можем получить математические зависимости работы цикла с изотермическим расширением от двух параметров цикла вместо трех. Выразим работу идеального цикла с изотермическим расширением через температуру газа перед турбиной и степень повышения давления в компрессоре:

$$L_{\text{Ц}} = C_p T_{\Gamma}^* \left(1 - \left(\frac{\exp \left[\frac{k}{k-1} \frac{T_B^*}{T_{\Gamma}^*} \left(\pi_K^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right]}{\pi_K^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right). \quad (11)$$

Термический КПД цикла

Термический КПД цикла по определению равен:

$$\eta_t = \frac{L_{ц}}{q_{подв.}} \quad (12)$$

Подставим в уравнение (12) выражение (9), а также выразим подведенное количество тепла через теплосодержание, получим:

$$\eta_t = \frac{C_p(T_{Г}^* - T_{С})}{C_p(T_{Г}^* - T_{К}^*) + C_p(T_{К}^* - T_{В}^*)}. \quad (13)$$

После преобразований получим:

$$\eta_t = \frac{T_{Г}^* - T_{С}}{T_{Г}^* - T_{В}^*} \quad (14)$$

Выразим КПД цикла через параметры цикла:

$$\eta_t = \frac{1 - \left(\frac{\pi_{Г}^*}{\pi_{К}^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \frac{1}{\theta}}. \quad (15)$$

Аналогично работе цикла, подставив в выражение (15) формулы (4)–(6), получим аналитические зависимости КПД цикла с изотермическим расширением от двух параметров цикла, например, от температуры газа перед турбиной и степени повышения давления в компрессоре:

$$\eta_t = \frac{1 - \left(\frac{\exp\left[\frac{k}{k-1} \frac{T_{В}^*}{T_{Г}^*} \left(\pi_{К}^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)\right]}{\pi_{К}^*} \right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \frac{T_{В}^*}{T_{Г}^*}}. \quad (16)$$

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ РАБОТЫ И ТЕРМИЧЕСКОГО КПД ИДЕАЛЬНОГО ЦИКЛА ГТД С ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ РАСШИРЕНИЕМ В ТУРБИНЕ ОТ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

Для выбора параметров рабочего процесса ГТД важно знать, как эти параметры влияют на работу и КПД цикла.

На основании формулы (11) построены зависимости работы цикла от степени повышения давления в компрессоре и степени подогрева (рис. 2). С увеличением степени подогрева работа цикла монотонно возрастает, причем практически линейно. При увеличении степени по-

вышения давления в компрессоре работа цикла возрастает, достигает максимального значения при оптимальном значении степени повышения давления, а затем медленно уменьшается. Чем больше температура газа в турбине, тем больше оптимальное значение степени повышения давления. В статистическом диапазоне степени повышения давления и температуры газа цикл с изотермическим расширением не имеет оптимальной степени повышения давления.

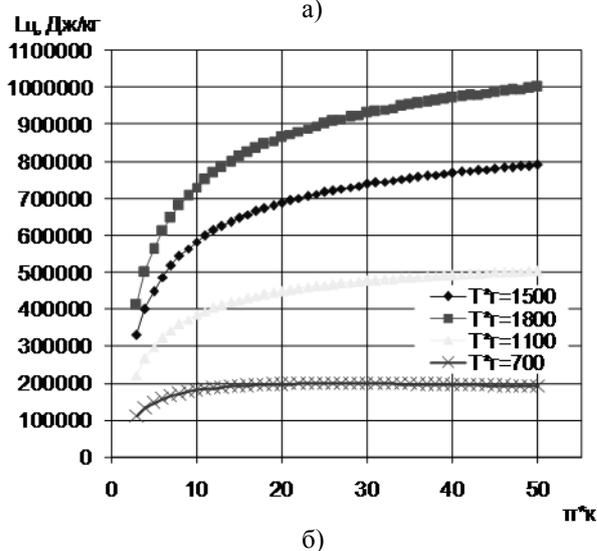
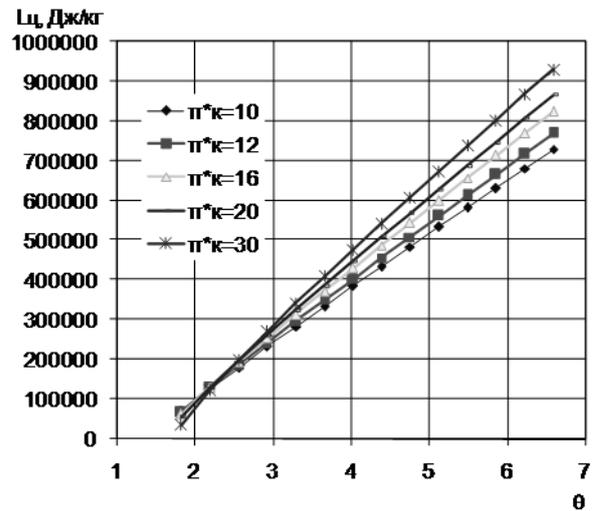


Рис. 2. Зависимость работы цикла с изотермическим расширением от степени: а) подогрева; б) повышения давления в компрессоре

Зависимость КПД цикла, построенная на основании выражения (16), от степени подогрева и степени повышения давления представлена на рис. 3. Увеличение степени подогрева приводит к повышению эффективности цикла. При увеличении степени подогрева его влияние на КПД уменьшается, и при больших значениях температуры газа в турбине КПД практически

не меняется. При очень низких величинах степени подогрева целесообразно применять циклы с малой степенью повышения давления в компрессоре. Степень повышения давления с точки зрения максимального КПД, так же как и с точки зрения работы цикла, имеет оптимальное значение, недостижимое в статистическом диапазоне температур и давлений. Поэтому с увеличением степени повышения давления КПД цикла возрастает.

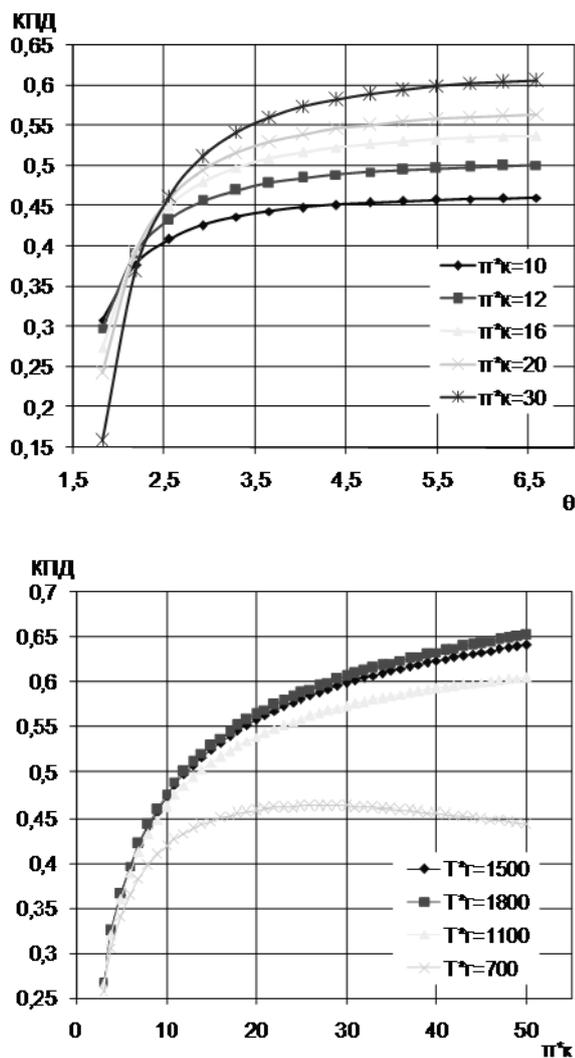


Рис. 3. Зависимость КПД цикла с изотермическим расширением от степени: а) подогрева; б) повышения давления в компрессоре

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИДЕАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ГТД С ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ И ИЗОЭНТРОПИЧЕСКИМ РАСШИРЕНИЕМ ПРИ ОДИНАКОВЫХ ПАРАМЕТРАХ ЦИКЛА

Зависимости работы и КПД цикла с изотропическим расширением от параметров цикла определяются выражениями [1]:

$$L_{\text{ц}} = C_p T_B^* \left[\theta \left(1 - \frac{1}{\pi_{\kappa}^* \frac{k-1}{k}} \right) - \left(\pi_{\kappa}^* \frac{k-1}{k} - 1 \right) \right] \quad (17)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi_{\kappa}^* \frac{k-1}{k}} \quad (18)$$

На рис. 4 представлено изменение работы цикла с изотропическим и изотермическим расширением в зависимости от степени подогрева при степени повышения давления в компрессоре равной 20 (оптимальное значение степени повышения давления для цикла с изотропическим расширением).

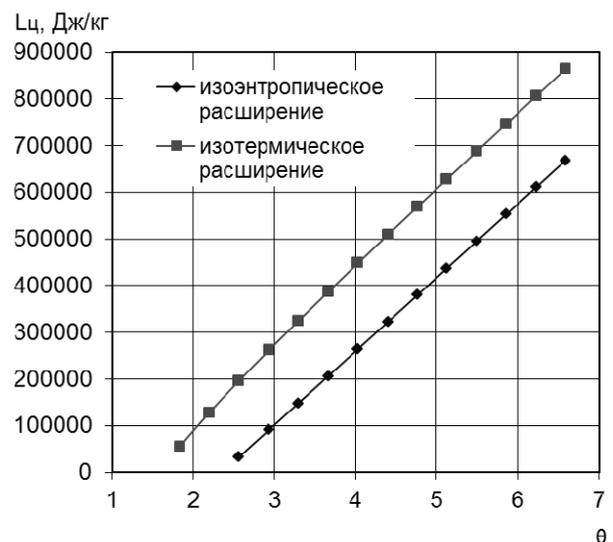


Рис. 4. Сравнение изменения работы циклов с изотропическим и изотермическим расширением от степени подогрева

Работа цикла с изотермическим расширением в турбине выше, чем работа цикла с изотропическим расширением, причем тем выше, чем больше степень подогрева. Цикл с изотермическим подводом тепла может быть осуществлен при меньшей степени подогрева. Например, при степени подогрева, равной двум, работа цикла с изотропическим расширением отрицательна, а работа цикла с изотермическим подводом тепла положительна.

Анализ изменения работы циклов с изоэнтропическим и изотермическим расширением, в зависимости от степени повышения давления в компрессоре, при температуре газа перед турбиной, равной 1500 К (рис. 5) показывает, что работа цикла с изотермическим расширением выше, чем работа цикла с изоэнтропическим расширением, особенно при больших значениях степени повышения давления. Оптимальное значение степени повышения давления в цикле с изотермическим расширением значительно выше, чем в цикле с изоэнтропическим расширением.

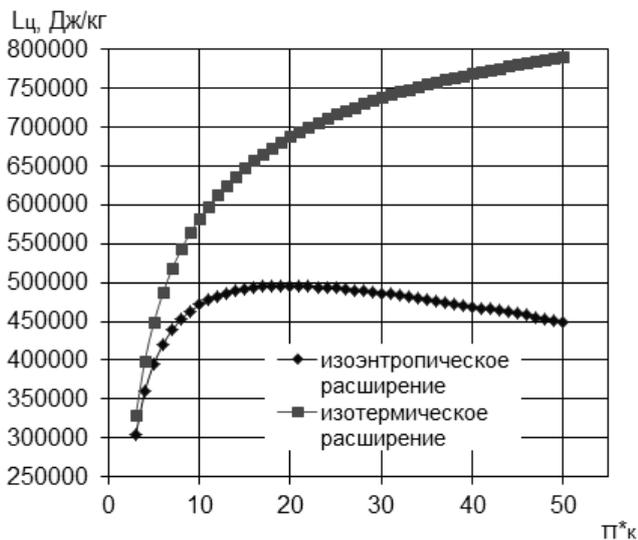


Рис. 5. Сравнение изменения работы циклов с изоэнтропическим и изотермическим расширением от степени повышения давления в компрессоре

Сравнение изменения КПД циклов в зависимости от степени подогрева при степени повышения давления в компрессоре, равной 20 (рис. 6), показывает, что КПД цикла с изотермическим расширением всегда меньше, чем КПД цикла с изоэнтропическим расширением, и разница тем больше, чем меньше степень подогрева.

При изменении степени повышения давления в компрессоре (температура газа перед турбиной равна 1500 К) КПД цикла с изотермическим расширением также меньше, чем КПД цикла с изоэнтропическим расширением, причем тем меньше, чем больше степень повышения давления в компрессоре (рис. 7).

Изотермическое расширение в турбине, при прочих равных условиях, приводит к увеличению работы цикла и уменьшению КПД. Однако работа цикла увеличивается в большей степени, чем уменьшается термический КПД.

Например, при степени повышения давления в компрессоре, равной 20, и температуре газа перед турбиной, равной 1500 К, работа цикла с изотермическим расширением больше работы цикла с изоэнтропическим расширением на 39%, а КПД меньше на 3 %. Оптимальная степень повышения давления в цикле с изотермическим расширением в турбине значительно выше, чем в цикле с изоэнтропическим. Анализ выполненных исследований позволяет предположить, что достоинства цикла с изотермическим расширением проявятся яснее при различных для рассматриваемых циклов параметрах рабочего процесса.

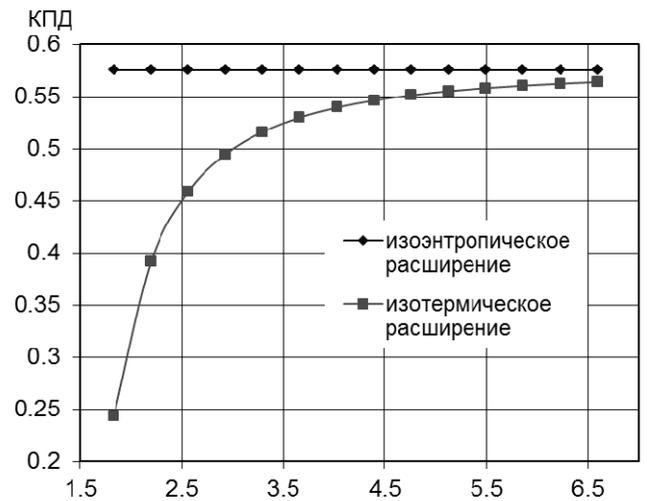


Рис. 6. Сравнение изменения КПД циклов с изоэнтропическим и изотермическим расширением от подогрева

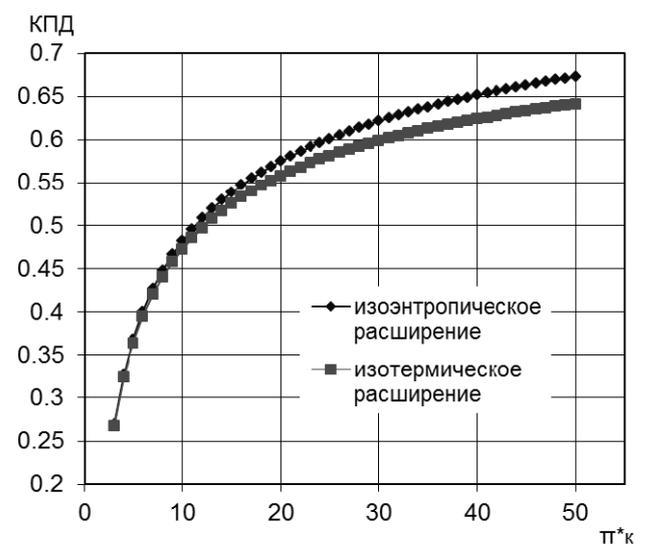


Рис. 7. Сравнение изменения КПД циклов с изоэнтропическим и изотермическим расширением от степени повышения давления в компрессоре

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИДЕАЛЬНОГО
ЦИКЛА ГТД С ИЗОЭНТРОПИЧЕСКИМ
И ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ РАСШИРЕНИЕМ
ПРИ ОДИНАКОВОЙ СТЕПЕНИ ПОВЫШЕНИЯ
ДАВЛЕНИЯ В КОМПРЕССОРЕ И РАЗЛИЧНЫХ
СОЧЕТАНИЯХ СТЕПЕНИ ПониЖЕНИЯ
ДАВЛЕНИЯ В ТУРБИНЕ И ПОДОГРЕВА**

Анализ выполнен для следующих вариантов (табл. 1):

1) снижение температуры газа перед турбиной при неизменной степени понижения давления в турбине;

2) уменьшение степени понижения давления в турбине при неизменной температуре газа перед турбиной;

3) постоянство суммарного относительного расхода топлива;

4) постоянство работы цикла (удельной тяги).

При одинаковой степени повышения давления в компрессоре цикл с изотермическим расширением имеет преимущество по сравнению с циклом с изоэнтропическим расширением, если требуется уменьшить температуру газа в турбине, степень понижения давления в турбине или увеличить работу цикла при неизменной температуре газа. Однако в каждом из случаев снижается эффективность цикла.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИДЕАЛЬНЫХ
ЦИКЛОВ ГТД С ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ
И ИЗОЭНТРОПИЧЕСКИМ РАСШИРЕНИЕМ
ПРИ УСЛОВИИ РАВЕНСТВА РАБОТ ЦИКЛОВ**

Требуемую работу цикла можно получить при различных сочетаниях параметров цикла. К увеличению работы цикла приводит увеличение температуры газа перед турбиной и степени

повышения давления вплоть до оптимальной величины. В табл. 1 (вар. 4) приведено одно из множества возможных сочетаний параметров, при котором обеспечивается равенство работы циклов с изоэнтропическим и изотермическим расширением. Оптимальное значение степени повышения давления в компрессоре для цикла с изотермическим расширением в турбине имеет большее значение, чем для цикла с изоэнтропическим расширением. По этой причине, одновременно увеличивая степень повышения давления (выше оптимальной для цикла с изоэнтропическим расширением) и уменьшая температуру газа перед турбиной, можно получать цикл с неизменной работой и большей эффективностью.

На рис. 8, а) представлен график изменения степени повышения давления и температуры газа перед турбиной, при которых работа сохраняется неизменной; на рис. 8, б) показано, как при этом изменяется КПД цикла.

Из рисунков видно, что увеличение степени повышения давления в компрессоре до 29,5 позволяет получить цикл с термическим КПД 0,575, что соответствует термическому КПД рассматриваемого цикла с изоэнтропическим расширением. Температуру газа перед турбиной при этом необходимо принять равной 1130 К. Еще большее увеличение степени повышения давления позволяет получить более эффективный цикл. В табл. 2 приведены основные параметры циклов с изотермическим расширением при различных степенях повышения давления в компрессоре, а также их отличие от параметров исходного цикла с изоэнтропическим расширением.

Т а б л и ц а 1

Сравнение циклов с изоэнтропическим и изотермическим расширением при неизменной степени повышения давления в компрессоре и различных сочетаниях температуры газа перед турбиной и степени понижения давления в турбине

Параметр	Значения параметров цикла с изоэнтропическим расширением	Вариант							
		1		2		3		4	
		Значение	$\delta, \%$						
$T_{г}^*, \text{К}$	1500	1374	-8,38%	1500	0,00%	1131	-24,63%	1197	-20,20%
$\pi_{г}^*$	2,69	2,69	0,00%	2,37	-11,95%	3,14	16,73%	3,12	15,78%
$L_{ц}, \text{Дж/кг}$	495611	602472	21,56%	687952	38,81%	466659	-5,84%	495611	0,00%
$\eta_{г}$	0,575	0,544	-5,35%	0,558	-2,99%	0,542	-5,84%	0,534	-7,17%
$q_{т \Sigma}$	0,020	0,026	28,43%	0,029	43,09%	0,020	0,00%	0,022	7,76%
$P_{уд}, \text{м/с}$	996	1098	10,25%	1173	17,82%	966	-2,96%	996	0,00%

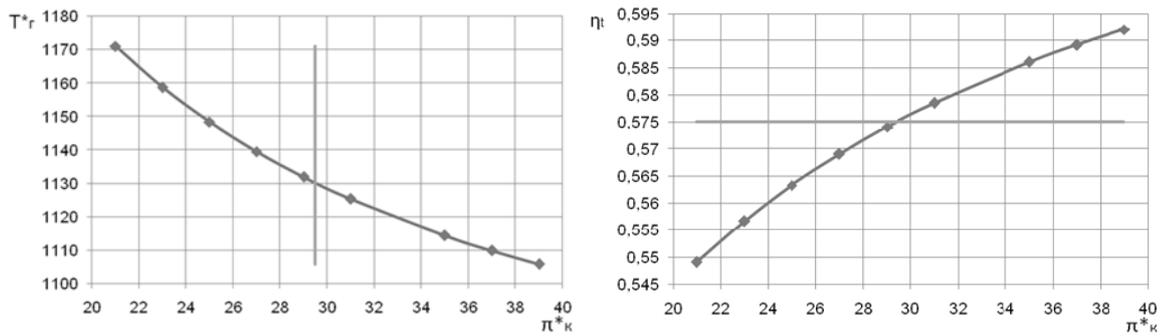


Рис. 8. Зависимости параметров цикла с изотермическим расширением при условии неизменности работы цикла от степени повышения давления в компрессоре: а) температура газа перед турбиной б) КПД цикла

Таблица 2

Сравнение циклов с изэнтропическим и изотермическим расширением при условии равенства их работ

случай	$\pi_k^* = 20$		$\pi_k^* = 29,5$		$\pi_k^* = 37$	
	Значение	$\delta, \%$	Значение	$\delta, \%$	Значение	$\delta, \%$
T_g^*, K	1197	-20,20%	1130	-24,67%	1110	-26,00%
π_t^*	3,12	15,78%	3,97	47,58%	4,73	75,84%
η_l	0,534	-7,17%	0,575	0,00%	0,589	2,46%
$q_{т\sigma}$	0,022	7,76%	0,020	0,00%	0,019	-2,39%

Следует также отметить, что в соответствии с формулами (17), (18), при температуре газа в турбине 1130 К и степени повышения давления в компрессоре 29,5 работа цикла с изэнтропическим расширением составляет 256633 Дж/кг, что на 48% меньше работы цикла с изотермическим расширением при таких же параметрах цикла. Термический КПД цикла с изэнтропическим расширением при этом составляет 0,620, что на 9% больше КПД цикла с изотермическим расширением.

На рис. 9 приведено сравнение $T-s$ диаграмм циклов с изэнтропическим и изотермическим расширением с параметрами, представленными в табл. 2.

Рис. 9 показывает, что термический КПД цикла с изотермическим расширением увеличивается в результате сокращения роста энтропии в термодинамическом цикле из-за уменьшения суммарного количества подводимого тепла. В случае равенства термического КПД цикла с

изэнтропическим и изотермическим расширением изменение энтропии в обоих циклах совпадает.

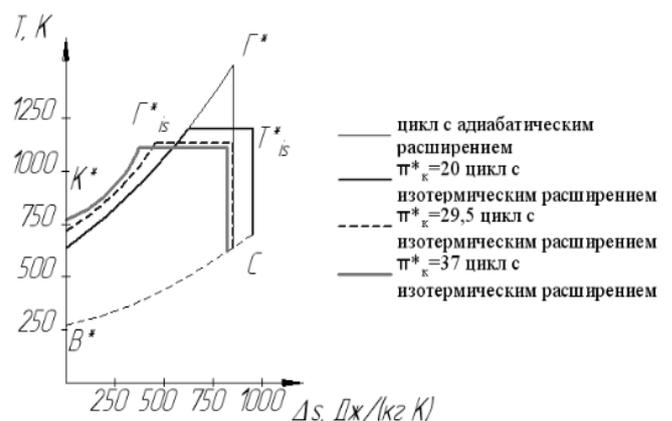


Рис. 9. Сравнение $T-s$ диаграмм цикла с изэнтропическим расширением и циклов с изотермическим расширением при различных степенях повышения давления при условии равенства работ циклов

ВЫВОДЫ

Проанализирован цикл ГТД с изотермическим расширением в турбине: выведены формулы работы и КПД цикла, проведено аналитическое исследование влияния основных параметров на работу и КПД цикла. Увеличение степени повышения давления и температуры газа перед турбиной приводит к увеличению работы и КПД цикла ГТД с изотермическим расширением. Степень повышения давления в рассматриваемом цикле имеет оптимальное значение, недостижимое в статистическом диапазоне.

Выполнено сравнение циклов с изоэнтальпическим и изотермическим расширением в турбине. При одинаковых параметрах цикл с изотермическим расширением имеет большую работу и меньший КПД. При организации изотермического расширения работа цикла увеличивается в большей степени, чем уменьшается КПД. Цикл с изоэнтальпическим расширением имеет значительно меньшее оптимальное значение степени повышения давления в компрессоре, чем цикл с изотермическим расширением. Увеличением степени повышения давления в цикле с изотермическим расширением можно получить требуемую работу цикла при большем КПД цикла, чем у исходного цикла с изоэнтальпическим расширением, и меньшей температуре газа перед турбиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сосунов В. А., Чепкин В. М.** Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. М.: МАИ, 2003. 688с. [V.A. Sosunov, V. M. Chepkin. *Theory, calculation and projecting of aircraft engines and power plants: Textbook* (in Russian). Moscow: MAI, 2003.]

ОБ АВТОРАХ

МУРАЕВА Мария Алексеевна, асп. каф. авиац. двиг. Дипл. инж. (УГАТУ, 2013). Готовит дис. об изотерм. подводе тепла в турбине авиац. ГТД.

ГОРЮНОВ Иван Михайлович, проф. каф. авиац. двиг., зав. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1974). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. автоматиз. проектир., доводки, изгот. и экспл. ГТД и ЭУ.

ХАРИТОНОВ Валерий Федорович, доц. каф. авиац. двиг., вед. науч. сотр. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1971). Канд. тех. наук по тепл. двиг. ЛА

(МАТИ им. К. Э. Циолковского, 1978). Иссл. в обл. моделир. и проектир. камер сгорания ДЛА.

METADATA

Title: GTE (gas turbine engine) cycle with isothermal expansion in turbine

Authors: M. A. Muraeva, V. F. Kharitonov, I. M. Gorjunov.

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: vkhariton@yandex.ru, gorjunov@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 2 (68), pp. 111-118, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The present article shows the results of theoretical analysis of GTE cycle with isothermal expansion in turbine. The influence of cycle parameters on its efficiency is analyzed, the ideal cycle with isentropic expansion is compared that of isothermal expansion in turbine.

Key words: GTE cycle; isothermal expansion; turbine.

About authors:

MURAEVA, Marija Alekseevna, Postgrad. Student, Dept. of Aircraft Engines. Dipl. Engineer (UGATU, 2013).

GORJUNOV, Ivan Mikhailovich, Prof., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. Mechanic Engineer (UGATU, 1974), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2007).

KHARITONOV, Valeriy Fedorovich, Ass. Prof., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. Mechanic Engineer (UGATU, 1971), Cand. of Tech. Sci. (MATI, 1978).