

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РСФСР
ПО ДЕЛАМ НАУКИ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

САМАРСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

ИДЕАЛЬНЫЙ ЦИКЛ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Расчет параметров
состояния рабочего тела
и энергетических характеристик двигателя

Методические указания

САМАРА 1991

Составители: А. П. Меркулов, А. П. Толстоногов

УДК 536.24(075.8)

Идеальный цикл газотурбинного двигателя. Расчет параметров состояния рабочего тела и энергетических характеристик двигателя: Метод. указания. Самарский авиационный ин-т. Сост. А. П. Меркулов, А. П. Толстоногов. Самара, 1991. 12 с.

В методических указаниях к курсовой работе по технической термодинамике приводится последовательность расчета параметров состояния рабочего тела в характерных и промежуточных точках цикла ГТД и условия построения его графиков. Разработан текст программ на языке Фортран-Б, реализующий алгоритм расчета цикла по части I и II курсовой работы на ЭВМ.

Содержание указаний соответствует учебным планам подготовки по специальностям 13.02, 13.04. Составлены преподавателями кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского ордена Трудового Красного Знамени авиационного института имени академика С. П. Королёва.

Рецензент С. В. Лукачев

У с л о в н ы е о б о з н а ч е н и я

- C - скорость истечения газа, м/с;
 C_p - изобарная теплоемкость, Дж/кг·К;
 C_v - изохорная теплоемкость, Дж/кг·К;
 G - массовый секундный расход, кг/с;
 k - показатель адиабаты изоэнтропии;
 e - удельная работа, Дж/кг;
 M - число Маха;
 p - давление, Н/м²;
 q - удельное тепло, Дж/кг;
 R - тяга, Н;
 S - энтропия, Дж/кг·К;
 T - температура, К;
 u - удельная внутренняя энергия, Дж/кг;
 α - коэффициент избытка воздуха;
 μ_x - масштаб параметра по оси ординат, Н/м²·мм,
 м³/кг·мм, К/мм, Дж/кг·К·мм

И н д е к с ы

- | | |
|--|---|
| opt - оптимальный;
T - топливо;
i - номер компонента,
процесса;
ζ - цикл | K - компрессор;
O - точка O процесса;
$'$ - воздух;
$''$ - продукты сгорания |
|--|---|

Общие принципы построения циклов тепловых двигателей и некоторые сведения об основных характеристиках идеального цикла газового турбинного двигателя изложены в первой части методических указаний [1]. В настоящих указаниях приводится последовательность расчета параметров состояния в характерных и нескольких промежуточных точках идеализированного цикла ГТД, определения calorических величин, а также ряда энергетических характеристик двигателя. Даны рекомендации к построению цикла в p - v и T - S координатах и оформлению пояснительной записки курсовой работы.

1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ В ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧКАХ ЦИКЛА ГТД

Расчет проводится с учетом схем в работе [1] и графиков, представленных на рис. 1 и 2 настоящих методических указаний. Параметры в точке 0 цикла принимаются по исходным данным.

Точка 1. Для процесса 0-1 - адиабатного сжатия в диффузоре:

$$T_1 = T_0 \left(1 + \frac{\kappa' - 1}{2} M^2\right); \quad p_1 = p_0 \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{\frac{\kappa'}{\kappa' - 1}}; \quad v_1 = v_0 \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa'}}$$

Точка 2. Для процесса 1-2 - адиабатного сжатия в компрессоре:

$$T_2 = T_1 (\pi_{\kappa})_{opt}^{\frac{\kappa' - 1}{\kappa'}}; \quad p_2 = p_1 (\pi_{\kappa})_{opt}; \quad v_2 = \frac{R' T_2}{p_2}$$

Точка 3. Для процесса 2-3 - изобарного подвода тепла в камере сгорания ГТД: T_3 - задано. Давление $p_3 = p_2$. Объем $v_3 = R'' T_3 / p_3$.

Точка 4. Для процесса 3-4 - адиабатного расширения продуктов сгорания в турбине. Из условия равенства работ турбины и компрессора получаем

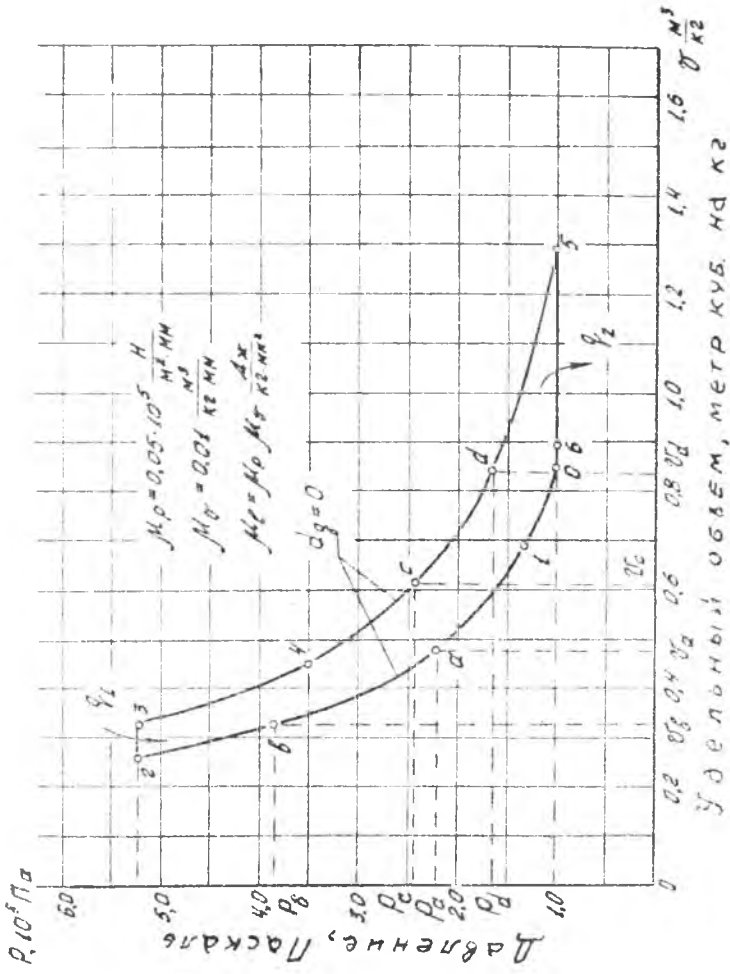
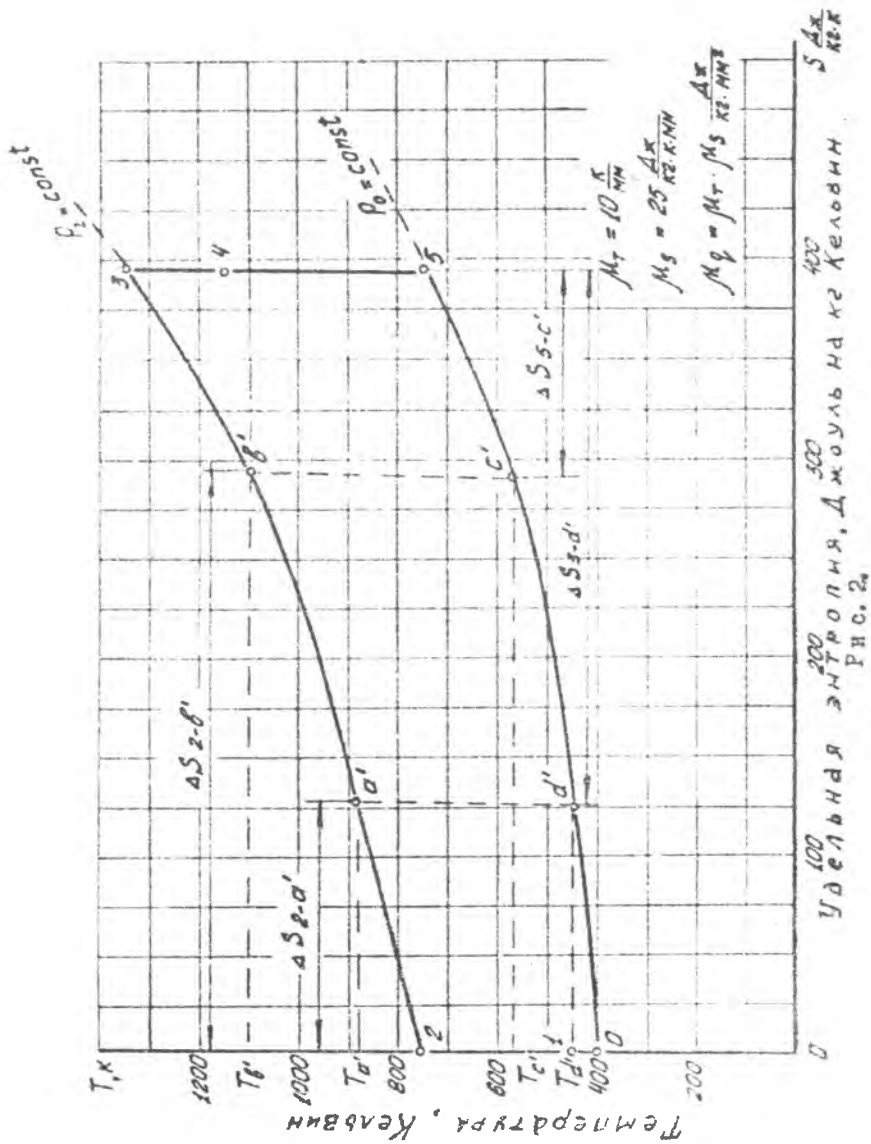


Рис. 1.



$$T_4 = T_3 - \frac{c_p' c_p'}{c_p'' c_p''} (T_2 - T_1); P_4 = P_3 \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{k''}{k''-1}}; v_4 = \frac{R'' T_4}{P_4}$$

Точка 5. Для процесса 4-5 - адиабатного расширения продуктов сгорания в реактивном сопле ГТД до давления окружающей среды

$$P_5 = P_0; T_5 = T_4 \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{1-k''}{k''}}; v_5 = \frac{R'' T_5}{P_5}$$

2. РАСЧЕТ КАЛОРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ЦИКЛА ГТД

2.1. Изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в процессах цикла

Изменение внутренней энергии в i процессе

$$\Delta u_i = c_v (T_{i+1} - T_i);$$

энтальпии в i процессе

$$\Delta h_i = c_p (T_{i+1} - T_i);$$

энтропии в i процессе

$$\Delta s_i = c_p \ln T_{i+1} / T_i = R \ln p_{i+1} / p_i.$$

2.2. Расчет теплоты процессов и тепла за цикл

Используются следующие зависимости:

$$q_{0-1} = q_{0-2} = 0; q_{2-3} = q_1 = c_p (T_3 - T_2);$$

$$q_{3-4} = q_{4-5} = 0; q_{5-0} = q_2 = c_p (T_5 - T_0).$$

Преобразованное тепло в цикле

$$q_4 = q_1 - q_2.$$

2.3. Расчет удельной работы процессов и за цикл

Производится на основе равенства [2, 3]:

работа сжатия воздуха в диффузоре $l_{0-1} = \Delta i_{0-1}$;

работа сжатия воздуха в компрессоре $l_{1-2} = \Delta i_{1-2}$;

работа газа на турбине $l_{3-4} = \Delta i_{3-4}$;

работа реактивного сопла $l_{4-5} = \Delta i_{4-5}$.

Работа цикла определяется суммой $l_{\Sigma} = \sum l_i$ с учетом знака процессов сжатия в процессах 0-1, 1-2 цикла.

Результаты расчетов по пп. 1 и 2 сводятся в табл. I.

Т а б л и ц а I

Основные параметры рабочего тела в характерных точках цикла ГТД и изменения их в процессах

	Значение	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-0	Для цикла
В точке	P_i , Па							—
	v_i , м ³ /кг							—
	T_i , К							—
За процесс	Δu , Дж/кг							
	Δi , Дж/кг							
	Δs , Дж/кг·К							
	q_i , Дж/кг							
	l_i , Дж/кг							

3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ТОЧКАХ ПРОЦЕССОВ СЖАТИЯ И РАСШИРЕНИЯ

3.1. Расчет параметров промежуточных точек при построении цикла ГТД в $p-v$ координатах

Определение значений параметров p и v в промежуточных точках процессов 1-2 и 3-4, 4-5 позволяет построить достаточно точные графики. Рассмотрим цикл в $p-v$ координатах на рис. I.

Поскольку процессы 1-2 и 3-4-5 адиабатные, то для любой пары точек на них справедливы соотношения

$$\frac{p_a}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_a}\right)^{k'}; \quad \frac{p_b}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_b}\right)^{k'}; \quad \frac{p_c}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_c}\right)^{k''}; \quad \frac{p_d}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_d}\right)^{k''}.$$

Задавая значения параметров p_a, p_b, p_c, p_d либо значениями v_a, v_b, v_c, v_d и используя известные величины p_1, p_4, p_5 или v_1, v_4, v_5 , можем определить неизвестные, например,

$$v_a = v_1 \sqrt[k'/\rho_a]{\frac{p_1}{p_a}} \quad \text{или} \quad p_a = p_1 \left(\frac{v_1}{v_a}\right)^{k'} \quad \text{и т.п.}$$

Подбор значений $v_a, v_b \dots$ или $p_a, p_b \dots$ производится в пределах полученных значений $v_1, v_2 \dots$ или $p_1, p_2 \dots$.

Расчетные значения промежуточных точек процессов, как и характерных, откладывают на графике $p-v$ и через них проводится по лекалу плавная кривая процесса (см. рис. 1). Значения точек сводятся в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Значения основных параметров рабочего тела
в промежуточных точках цикла ГТД

Точка Параметры	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
p_i , Па v_i , м ³ /кг T_i , К				
Проз. Знач.	2- <i>a'</i>	2- <i>b'</i>	5- <i>c'</i>	5- <i>d'</i>
ΔS_i , Дж/кг·К				

3.2. Процесс, изображаемые в $T-S$ координатах

Для построения цикла ГТД в $T-S$ координатах, необходимо значение изменения энтропии ΔS_{2-3} или ΔS_{5-0} разбить на два участка $\Delta S_{2-a'}, \Delta S_{2-b'}$ так, чтобы точки a', b' делили процесс 2-3 на три примерно равные части. На ординатах точек a' и b' проставляем на кривой процесса 5-0 точки c', d' , т.е. получим промежуточные адиабатные процессы $a'-d'$ и $b'-c'$ (см. рис. 2). Определив по графику значения $\Delta S_{2-a'}$ и $\Delta S_{2-b'}$, вычисляем соответствующие температуры рабочего тела в точках a', b', c', d' по соотноше-

$$T_{a'} = \frac{T_2}{e^{-\frac{\Delta S_2 - a'}{c_p}}}; \quad T_{b'} = \frac{T_2}{e^{-\frac{\Delta S_2 - b'}{c_p}}};$$

$$T_{c'} = \frac{T_5}{e^{-\frac{\Delta S_5 - c'}{c_p}}}; \quad T_{d'} = \frac{T_5}{e^{-\frac{\Delta S_5 - d'}{c_p}}}.$$

Полученные отрезки откладывают в принятом масштабе на $T-S$ диаграмме и по принятым значениям $\Delta S_i'$ находят координаты промежуточных точек процесса, через которые по лекалу проводят плавную кривую (рис. 2). Значения точек сводят в табл. 2.

4. ПОСТРОЕНИЕ ИДЕАЛЬНОГО ЦИКЛА В $p-v$ И $T-S$ КООРДИНАТАХ

На миллиметровой бумаге по результатам расчетов параметров рабочего тела в характерных и промежуточных точках процессов цикла строят $p-v$ и $T-S$ диаграммы цикла ГТД. Масштабы параметров по осям координат $\mu_p, \mu_v, \mu_T, \mu_S$ подбираются так, чтобы каждый график размещался на формате А4 (210x297). Графики могут быть использованы для сравнительной оценки работы за цикл и теплоты за цикл графическим путем (планиметрированием). Сравнение проводится по указанию консультанта.

5. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГТД

Характеристики вычисляются согласно [2, 3]:

Скорость набегающего потока

$$C_0 = M \sqrt{k' R' T_0'};$$

скорость истечения газа из сопла

$$C_5 = \sqrt{2 c_p'' (T_4 - T_5)};$$

удельная тяга двигателя

$$R_{y\bar{a}} = \frac{B''}{G'} (C_5 - C_0);$$

секундный расход воздуха

$$G_{\text{возд}} = R / R_{\text{уд}} ;$$

масса двигателя

$$G_{\text{двиг}} = 20 G_{\text{возд}} \sqrt{(\pi \kappa)_{\text{opt}}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1} ;$$

суммарная масса топлива

$$G_{\Sigma} = \frac{G_{\text{возд}}}{C} G_{\tau} 3600 \tau ;$$

термический коэффициент полезного действия

$$\eta_t = \frac{C_4}{C_1} 100\% .$$

Результаты расчетов вносим в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Энергетические характеристики ГТД

$(\pi \kappa)_{\text{opt}}$	$C_4, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	α	$C_3, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$C_5, \frac{\text{м}}{\text{с}}$
$R_{\text{уд}}, \text{Н}$	$G_{\text{возд}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$G_{\text{двиг}}, \text{кг}$	$G_{\Sigma}^{\text{сум}}, \text{кг}$	$\eta_t, \%$

6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

При оформлении пояснительной записки следует руководствоваться методическими указаниями [4, 5]. Текст записки выполняется на бумаге формата А4. Нумерация страниц сквозная. Графики выполняются на миллиметровой бумаге формата А4.

П р и м е ч а н и е. На кафедре имеется программа расчета идеального цикла ГТД "SIGLE", которая может работать в двух режимах, обеспечивающих вывод результатов расчета на дисплей и вывод их на печать. На первом режиме, после загрузки машины

набирается текст "TYPES COM," на втором режиме - "PRINTS COM".
Программа может быть использована для проверки полученных результатов расчета при выполнении курсовой работы.

Библиографический список

1. Идеальный цикл газотурбинного двигателя. Расчет состава рабочего тела цикла: Метод. указания /Сост. Меркулов А.П., Толстоногов А.П. Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1991. 16 с.
2. Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1991. С. 495.
3. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1983. 416 с.
4. Требования к оформлению учебных текстовых документов: Метод. указания /Сост. Каченко А.А. и др.; Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1988. 29 с.
5. Методические указания по оформлению пояснительной записки к курсовой работе / Белозерцев В.Н., Бирюк В.В., Толстоногов А.П. Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1987. 16 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения. Индексы	I
1. Расчет основных параметров состояния в характерных точках цикла ГТД	2
2. Расчет calorических величин цикла ГТД	5
3. Расчет параметров состояния рабочего тела в промежуточных точках процессов сжатия и расширения	6
4. Построение идеального цикла в $p-v$ и $T-S$ координатах	8
5. Расчет энергетических характеристик ГТД ...	8
6. Рекомендации по оформлению пояснительной записки	9
Библиографический список	10

Составители: М е р к у л о в Александр Петрович,
Т о л с т о н о г о в Арлен Петрович

ИДЕАЛЬНЫЙ ЦИКЛ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Расчет параметров состояния рабочего тела
и энергетических характеристик двигателя

Редактор Л.И. Ч е г о д а е в а
Техн. редактор Н.М. К а л е н ю к
Корректор Н.С. К у п р и н о в а

Подписано в печать 30.10.91. Формат 60x84¹/₁₆
Бумага оберточная. Печать оперативная.
Усл.п.л. 0,7. Усл.кр.-отт. 0,8. Уч.-изд.л. 0,65.
Тираж 100 экз. Заказ № 225. Бесплатно.

Самарский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Участок оперативной полиграфии Самарского
авиационного института. 443001, Самара, ул. Ульяновская, 18.