

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

---

**Кафедра двигателей летательных аппаратов  
В.Н. Котовский**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННЫХ  
СИЛОВЫХ УСТАНОВОК**

**ПОСОБИЕ**

**по проведению практических занятий**

*для студентов  
направления 162300 (25.04.01)  
очной формы обучения*

**Москва - 2014**

ББК 055

К73

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В.В. Воробьёв  
канд. техн. наук, доц. В.В. Ефимов

Котовский В.Н.

К73 Математическое моделирование характеристик авиационных силовых установок: пособие по проведению практических занятий. - М.: МГТУ ГА, 2014. – 64 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Математическое моделирование характеристик авиационных силовых установок» по Учебному плану направления 162300 (25.04.01) для студентов очной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 14.11.13 г.  
и методического совета 19.11.13 г.

---

Подписано в печать 15.10.14 г.

Печать офсетная  
3,72 усл.печ.л.

Формат 60x84/16  
Заказ № 1882/

3,28 уч.-изд. л.  
Тираж 60 экз.

---

Московский государственный технический университет ГА  
*125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20*  
Редакционно-издательский отдел  
*125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а*

© Московский государственный  
технический университет ГА, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основные параметры и эксплуатационные характеристики авиационных ГТД определяются, в основном, путем их расчета по характеристикам основных элементов силовой установки с учетом принятой программы регулирования и эксплуатационных ограничений двигателя. В данном руководстве изложена методика определения параметров и эксплуатационных характеристик двухконтурных авиационных ТРДД со смешением потоков.

### Практическое занятие № 1

#### Термодинамический расчет двухконтурных двигателей со смешением потоков (ТРДДсм)

##### 1.1. Основные условия и допущения

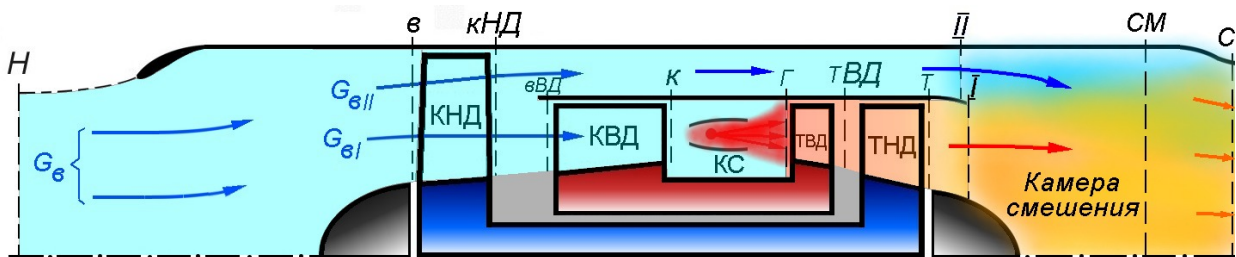


Рис.1.1. Схема ТРДД со смешением потоков

#### *Термодинамический расчет двигателя ведется при следующих условиях и допущениях.*

1. Все рассматриваемые режимы работы двигателя – установившиеся, а параметры потока в каждом сечении проточной части – осредненные.
2. Расчетным режимом работы двигателя является максимальный режим в расчетных условиях полета.

3. Показатели адиабаты и значения газовой постоянной для воздуха и продуктов сгорания не зависят от условий полета и режима работы двигателя.

В программе заложены следующие их значения, которые следует принимать при расчете:

- для воздуха  $k = 1,4$ ;  $R = 287,05$  Дж/(кг·К);
- для турбин высокого давления (рис. 1.1)  $k_{Г.В} = 1,3$ ;  $R_{Г.В} = 287,6$  Дж/(кг·К);
- для турбины низкого давления ТРДДсм и сопла  $k_{Г.Н} = 1,33$ ;  $R_{Г.Н} = 287,4$  Дж/(кг·К).

4. Весь охлаждающий турбину воздух отбирается за компрессором высокого давления и возвращается в проточную часть за турбиной высокого давления. При этом снижение температуры газов за турбиной, вызванное подмешиванием охлаждающего воздуха, не учитывается.

5. В ТРДДсм за турбиной происходит полное смешение потоков еще до входа в сопло. При этом, поскольку потери на смешение обычно невелики, принимается, что  $\sigma_{см}=1$ .

6. Перепад в сопле двигателя на всех рассматриваемых режимах близок к критическому или превышает его, так что значение  $q(\lambda)$  в минимальном сечении сопла практически не отличается от единицы (и принимается равным ей); расширение газа в сопле полное.

7. Характеристика входного устройства задается в виде типовой зависимости  $\sigma_{вх} = f(M_H)$ , (рис. 1.2).

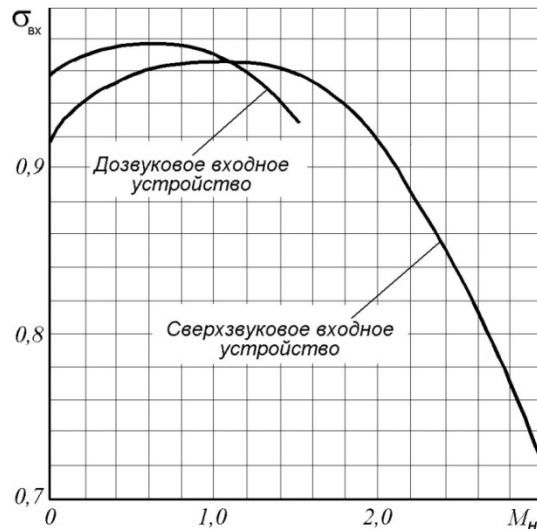


Рис. 1.2. Зависимость коэффициента потерь полного давления во входном устройстве от  $M_H$

8. В двигателе применены только осевые компрессоры, причем характеристики каскадов компрессора рассчитываются по методике, изложенной в работах [3 и 6].

9. Турбина высокого давления считается работающей на всех рассматриваемых режимах с неизменными значениями  $\pi^*_T$ ,  $\eta^*_T$  и параметра расхода  $G_T \sqrt{T^*_T} / p^*_T$ .

10. Для камеры сгорания принимается, что значения  $\eta_{г}$  и  $\sigma_{кс}$  остаются неизменными на всех режимах её работы.

## 1.2. Выбор исходных данных

Исходными данными для проведения термодинамического расчета ТРДДсм (на максимальном режиме) и определения размеров его основных элементов являются следующие:

1. Высота  $H$  и число Маха полета самолета  $M_H$  на расчетном режиме работы двигателя;

2. Тяга двигателя на этом режиме, т.е. тяга на максимальном режиме;
3. Температура газа перед турбиной  $T_{г}^*$ , степень двухконтурности  $m$  и суммарная степень повышения давления в компрессоре  $\pi_{к\sum}^* = \pi_{кнд}^* \pi_{квд}^*$ ;
4. Тип входного устройства (до- или сверхзвуковое)

*Для проведения расчета задаются следующие параметры*

1. Коэффициент восстановления полного давления в основной камере сгорания  $\sigma_{кс} = p_{г}^* / p_{к}^*$ , который находится в пределах 0,94...0,96.
2. Коэффициент сохранения полного давления в канале наружного контура. В двигателях с камерой смешения он может иметь значения  $\sigma_{п} = 0,96...0,98$ .
3. Коэффициент полноты сгорания (выделения тепла) в камере сгорания. Обычно  $\eta_{г} = 0,98...0,99$ .
4. КПД каскадов компрессора, т.е. компрессора низкого давления (вентилятора)  $\eta_{кнд}^*$ , компрессора высокого давления  $\eta_{квд}^*$ . КПД трансзвуковых КНД в двигателях с малой и средней степенью двухконтурности на расчетном режиме обычно лежит в пределах 0,83...0,86, а каскада высокого давления – в пределах 0,86...0,88. В одноступенчатых вентиляторах  $\eta_{кнд}^*$  может также достигать значения 0,86...0,88.
5. КПД каскадов турбины, т.е. турбины высокого давления  $\eta_{твд}^*$  и турбины низкого давления  $\eta_{тнд}^*$ . Обычно  $\eta_{твд}^* = 0,88...0,9$ , а  $\eta_{тнд}^* = 0,89...0,92$ .
6. Механический КПД, равный отношению мощности, потребляемой компрессором, к мощности, вырабатываемой расположенной с ним на одном валу турбиной. В расчетах он принимается одинаковым для всех каскадов турбины, обычно равным  $\eta_{м} = 0,99...0,995$ .
7. Коэффициент скорости реактивного сопла  $\varphi_{с} = 0,985...0,995$ .
8. Относительный расход воздуха на охлаждение турбины  $g_{охл} = G_{охл} / G_{вп}$ . Обычно  $g_{охл} = 0,03...0,06$ .
9. Относительный расход воздуха, отбираемого на нужды самолета  $g_{отб} = G_{отб} / G_{вп}$ . Его величина обычно равна 0,03...0,05.
10. Приведенная скорость (число  $\lambda$ ) на входе в камеру смешения в потоке, выходящем из внутреннего контура. Обычно в ТРДДсм значение  $\lambda_1$  на расчетном режиме лежит в пределах 0,5...0,7.
11. Теплотворная способность  $H_u$  топлива. Для авиационных керосинов можно принять  $H_u = 43000$  кДж/кг.
12. Коэффициент сохранения полного давления во входном устройстве  $\sigma_{вх}$ , который определяется по рис. 1.2 на расчетном режиме двигателя.

### 1.3. Термодинамический расчет ТРДДсм

Термодинамический расчет и расчет характеристик каскадов компрессора производится на максимальном режиме его работы в расчетных условиях полета с расчетными параметрами двигателя.

### 1.3.1. Определение оптимального значения $\pi_{\text{кнд,опт}}^*$

Оптимальное значение степени повышения давления в КНД  $\pi_{\text{кнд,опт}}^*$  соответствует оптимальному распределению работы цикла  $L_{\text{ц}}$  между контурами, при котором обеспечивается максимальная удельная тяга  $P_{\text{уд}}$  (и, соответственно, минимальный удельный расход топлива). Для ТРДД со смешением потоков (ТРДДсм) оптимальному распределению работы цикла между контурами соответствует условие:

$$p_{\text{т}}^* = p_{\text{п}}^*,$$

где  $p_{\text{т}}^*$  – полное давление газа за турбиной низкого давления (ТНД), а  $p_{\text{п}}^*$  – полное давление воздуха в наружном контуре на входе в камеру смешения.

Перед началом определения  $\pi_{\text{кнд,опт}}^*$  необходимо определить температуру  $T_{\text{в}}^*$  и давление  $p_{\text{в}}^*$  заторможенного потока воздуха на входе в двигатель (КНД). Для этого по заданному значению высоты полета  $H$  на расчетном режиме работы двигателя определяются значения  $T_H$  и  $p_H$  по таблице стандартной атмосферы (см. Приложение 1). Далее в зависимости от значения заданного числа  $M_H$  полета самолета на расчетном режиме работы двигателя следует определить  $T_{\text{в}}^*$

и  $p_{\text{в}}^*$  по следующим формулам:  $T_{\text{в}}^* = T_H \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_H^2 \right)$ ;  $p_{\text{в}}^* = p_H \sigma_{\text{вх}} \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_H^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$ .

Для определения  $\pi_{\text{кнд,опт}}^*$  необходимо задаться несколькими (4-мя...5-ю) значениями  $\pi_{\text{кнд}}^*$  и произвести с этими значениями термодинамический расчет двигателя в последовательности, которая изложена в табл. 1.1.

При этом в зависимости от значения степени двухконтурности рекомендуется задаваться значениями  $\pi_{\text{кнд}}^*$  примерно в следующих пределах:

- при  $m \approx 0,5$  – начиная с  $\pi_{\text{кнд}}^* \approx 2,4$  с шагом  $\approx 0,4$ ;
- при  $m \approx 1,0$  – начиная с  $\pi_{\text{кнд}}^* \approx 2,0$  с шагом  $\approx 0,3$ ;
- при  $m \approx 1,5$  – начиная с  $\pi_{\text{кнд}}^* \approx 2,0$  с шагом  $\approx 0,2$ ;
- при  $m \approx 2,0$  – начиная с  $\pi_{\text{кнд}}^* \approx 1,8$  с шагом  $\approx 0,2$ ;
- при  $m > 2,0$  – начиная с  $\pi_{\text{кнд}}^* \approx 1,7$  с шагом  $\approx 0,15$ .

Таблица 1.1

1	$\pi_{\text{кнд}}^*$ – Выбранные значения степени повышения давления в КНД с заданным шагом					
2	$e_{\text{кнд}}^* = \pi_{\text{кнд}}^* \frac{k-1}{k}$ , $k=1,4$					
3	$p_{\text{ввд}}^* = p_{\text{в}}^* \pi_{\text{кнд}}^*$ , Па – Полное давление воздуха на входе в КВД					
4	$\tau_{\text{кнд}}^* = 1 + \frac{e_{\text{кнд}}^* - 1}{\eta_{\text{кнд}}^*}$ Степень подогрева воздуха в КНД					
5	$T_{\text{ввд}}^* = T_{\text{в}}^* \tau_{\text{кнд}}^*$ , К – Полная температура воздуха на входе в КВД					

6	$L_{\text{КНД}} = c_p(T_{\text{ВВД}}^* - T_{\text{В}}^*)$ , Дж/кг, $c_p=1004,7$ Дж/кг/К, Работа, затрачиваемая на вращение КНД				
7	$p_{\text{II}}^* = p_{\text{В}}^* \pi_{\text{КНД}}^* \sigma_{\text{II}}$ , Па – Полное давление воздуха в наружном контуре на входе в камеру смешения				
8	$\pi_{\text{КВД}}^* = \pi_{\text{КС}}^* / \pi_{\text{КНД}}^*$ – Степень повышения давления воздуха в КВД				
9	$e_{\text{КВД}}^* = \pi_{\text{КВД}}^{* \frac{k-1}{k}}$ , $k=1,4$				
10	$\tau_{\text{КВД}}^* = 1 + \frac{e_{\text{КВД}}^* - 1}{\eta_{\text{КВД}}^*}$ – Степень подогрева воздуха в КВД				
11	$T_{\text{К}}^* = T_{\text{КВД}}^* = T_{\text{ВВД}}^* \tau_{\text{КВД}}^*$ , К – Полная температура воздуха за КВД				
12	$L_{\text{КВД}} = c_p(T_{\text{К}}^* - T_{\text{ВВД}}^*)$ , Дж/кг, $c_p=1004,7$ Дж/кг/К – Работа, затрачиваемая на вращение КВД				
13	$c_{\text{П}} = 0,883 + 0,000209 \cdot (T_{\text{Г}}^* + 0,48 T_{\text{К}}^*)$ , кДж/(кг·К) – Условная теплоемкость процесса горения топлива в камере сгорания				
14	$g_{\text{T}} = \frac{c_{\text{П}}(T_{\text{Г}}^* - T_{\text{К}}^*)}{\eta_{\text{T}} H_{\text{u}}}$ , $H_{\text{u}} = 43000$ кДж/кг – Относительный расход топлива в камере сгорания				
15	$\bar{G}_{\text{Г.В}} = \frac{G_{\text{Г.ТВД}}}{G_{\text{ВI}}} = (1 - g_{\text{отб}} - g_{\text{охл}})(1 + g_{\text{T}})$ – Относительный расход газа через ТВД				
16	$L_{\text{ТВД}} = L_{\text{КВД}} / \bar{G}_{\text{Г.В}} / \eta_{\text{М}}$ , Дж/кг – Работа, создаваемая при расширении газа в ТВД, $\eta_{\text{М}}$ – механический КПД				
17	$e_{\text{ТВД}}^* = 1 / (1 - \frac{L_{\text{ТВД}}}{c_{\text{рГ.В}} \eta_{\text{ТВД}}^* T_{\text{Г}}^*})$ , $c_{\text{рГ.В}} = 1246,3$ Дж/кг/К				
18	$\pi_{\text{ТВД}}^* = e_{\text{ТВД}}^{* \frac{k_{\text{Г.В}}}{k_{\text{Г.В}} - 1}}$ , $k_{\text{Г.В}} = 1,3$ – Степень понижения давления газа в ТВД				
19	$p_{\text{ТВД}}^* = p_{\text{В}}^* \pi_{\text{КС}}^* \sigma_{\text{КС}} / \pi_{\text{ТВД}}^*$ , Па – Полное давление газа за ТВД				
20	$T_{\text{ТВД}}^* = T_{\text{Г}}^* - L_{\text{ТВД}} / c_{\text{рГ.В}}$ , К, $c_{\text{рГ.В}} = 1246,3$ Дж/кг/К – Полная температура газа за ТВД				
21	$\bar{G}_{\text{Г.Н}} = \frac{G_{\text{Г.ТНД}}}{G_{\text{ВI}}} = \bar{G}_{\text{Г.В}} + g_{\text{охл}}$ – Относительный расход газа через ТНД				
22	$L_{\text{ТНД}} = L_{\text{КНД}}(1 + m) / \bar{G}_{\text{Г.Н}} / \eta_{\text{М}}$ , Дж/кг – Работа, создаваемая при расширении газа в ТНД, $\eta_{\text{М}}$ – механический КПД, $m$ – степень двухконтурности двигателя				
23	$e_{\text{ТНД}}^* = 1 / (1 - \frac{L_{\text{ТНД}}}{c_{\text{рГ.Н}} \eta_{\text{ТНД}}^* T_{\text{ТВД}}^*})$ , $c_{\text{рГ.Н}} = 1158,3$ Дж/кг/К				
24	$\pi_{\text{ТНД}}^* = e_{\text{ТНД}}^{* \frac{k_{\text{Г.Н}}}{k_{\text{Г.Н}} - 1}}$ , $k_{\text{Г.Н}} = 1,33$ – Степень понижения давления газа в ТНД				

25	$p_T^* = p_{ТВД}^* / \pi_{ТНД}^*$ - Полное давление газа за турбиной (за ТНД)				
26	$T_T^* = T_{ТВД}^* - L_{ТНД} / c_{pГН}$ , К; $c_{pГН} = 1158,3$ Дж/кг – Полная температура газа за турбиной (за ТНД)				
27	$T_{см}^* = (T_T^* + mT_{В.ВД}^*) / (1 + m)$ , К – Полная температура смеси воздуха и газа за камерой смешения				
28	$\Pi(\lambda_I) = \left(1 - \frac{k_{г.н} - 1}{k_{г.н} + 1} \lambda_I^2\right)^{\frac{k_{г.н}}{k_{г.н} - 1}}$ , $k_{г.н} = 1,33$ – Газодинамическая функция (относительное давление) за турбиной (за ТНД)				
29	$p_I = p_T^* \Pi(\lambda_I)$ , Па – Статическое давление за турбиной (за ТНД)				
30	$q(\lambda_I) = \lambda_I \left[ \left(1 - \frac{k_{г.н} - 1}{k_{г.н} + 1} \lambda_I^2\right)^{\frac{k_{г.н} + 1}{k_{г.н} - 1}} \right]^{\frac{1}{2}}$ , $k_{г.н} = 1,33$ – Относительная плотность тока за турбиной (за ТНД)				
31	$\Pi(\lambda_{II}) = p_I / p_{II}^*$ – Газодинамическая функция (относительное давление) в наружном контуре на входе в камеру смешения				
32	$\lambda_{II} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left(1 - \Pi(\lambda_{II})^{\frac{k-1}{k}}\right)}$ , $k = 1,4$ – Приведенная скорость в наружном контуре на входе в камеру смешения				
33	$q(\lambda_{II}) = \lambda_{II} \left[ \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_{II}^2\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]^{\frac{1}{2}}$ , $k = 1,4$ – Относительная плотность тока в наружном контуре на входе в камеру смешения				
34	$\frac{\overline{F_{II}}}{F_I} = \frac{F_{II}}{F_I} = 0,983 \frac{p_T^* q(\lambda_I)}{G_{г.н} p_{II}^* q(\lambda_{II})} m \sqrt{\frac{T_{ВВД}^*}{T_T^*}}$ – Отношение площади проточной части наружного контура к площади проточной части внутреннего контура на входе в камеру смешения				
35	$p_{см}^* = \frac{p_T^* + \overline{F_{II}} p_{II}^*}{1 + \overline{F_{II}}}$ , Па – Полное давление смеси воздуха и газа за камерой смешения				
36	$\pi_{с.р} = \frac{p_{см}^*}{p_H}$ – Располагаемая степень понижения давления в сопле				
37	$e_c = \pi_{с.р}^{\frac{k_{г.н} - 1}{k_{г.н}}}$ , $k_{г.н} = 1,33$				
38	$c_c = \varphi_c \sqrt{2 c_{pГ.н} T_{см}^* \left(1 - \frac{1}{e_c}\right)}$ , м/с, $c_{pГ.н} = 1158,3$ Дж/кг/К – Скорость истечения газа из сопла				



39	$P_{уд} = \left[ \left( \bar{G}_{Г.Н} + m \right) / (1 + m) \right] c_c - V$ , м/с – Удельная тяга				
40	$C_{уд} = \frac{3600 g_T (1 - g_{охл} - g_{отб})}{P_{уд} (1 + m)}$ , кг/(ч·Н) – Удельный расход топлива				
В пунктах 41 ... 52 рассчитываются параметры, необходимые для расчета характеристик турбокомпрессорного модуля					
41	$G_B = P / P_{уд}$ , кг/с – Расход воздуха через двигатель				
42	$G_{Т.ч} = P C_{уд}$ , кг/ч – Часовой расход топлива				
43	$q(\lambda)_{см} = \frac{m_{г} \frac{p_{г}^*}{\sqrt{T_{г}^*}} q(\lambda_{г}) + m_{в} \frac{p_{II}^*}{\sqrt{T_{в.вд}^*}} q(\lambda_{II}) \bar{F}_{II}}{m_{г} \frac{p_{см}^*}{\sqrt{T_{см}^*}} (1 + \bar{F}_{II})}$ – Относительная плотность тока на выходе из камеры смешения, $m_{г}=0,0397$ , а $m_{в}=0,0404$				
44	$\pi_{гг}^* = \frac{p_{ТВД}^*}{p_{ВВД}^*}$ – Степень повышения давления в газогенераторе				
45	$\tau_{гг}^* = \frac{T_{ТВД}^*}{T_{ВВД}^*}$ – Степень повышения температуры в газогенераторе				
46	$\Delta_{гг}^* = \frac{T_{г}^*}{T_{ВВД}^*}$ – Степень подогрева газа в газогенераторе				
47	$p_{см}^* / p_{ВВД}^*$				
48	$T_{ВВД}^* / T_{см}^*$				
49	$\left( \frac{\Delta T^*}{T_0^*} \right)_{нд} = \frac{T_{ТВД}^* - T_{г}^*}{T_{ТВД}^*}$ – Относительное понижение температуры в ТНД				
50	$G_{в.пр} = G_B \frac{101300}{p_B^*} \sqrt{\frac{T_B^*}{288}}$ – Приведенный расход воздуха				
51	$G_{т.ч.пр} = G_{т.ч} \frac{101300}{p_B^*} \sqrt{\frac{288}{T_B^*}}$ – Приведенный часовой расход топлива				
52	$\tau_{ТКМ}^* = \frac{T_{см}^*}{T_B^*}$ – Степень повышения температуры в турбокомпрессорном модуле				

По результатам расчетов (табл. 1.1) необходимо построить графики зависимостей  $p_{г}^*$ ,  $p_{II}^*$ ,  $P_{уд}$  и  $C_{уд}$  от  $\pi_{кнд}^*$ . Из рис. 1.3 определяется значение  $\pi_{кнд.опт}^*$ , которое соответствует точке пересечения кривых  $p_{г}^* = f(\pi_{кнд}^*)$  и  $p_{II}^* = f(\pi_{кнд}^*)$ .

Как видно из рис. 1.4 и рис. 1.5, определенное таким образом значение  $\pi_{кнд.опт}^*$  не обеспечивает максимальное значение  $P_{уд}$  и минимум  $C_{уд}$ . Поэтому полученное значение  $\pi_{кнд.опт}^*$  можно скорректировать, определив его в точке максимального значения  $P_{уд}$  и минимального значения  $C_{уд}$ .

Далее следует повторить расчеты по табл. 1.1 при окончательно выбранном  $\pi_{\text{кнд}}^* = \pi_{\text{кнд.опт}}^*$  для определения всех параметров двигателя на расчетном режиме.

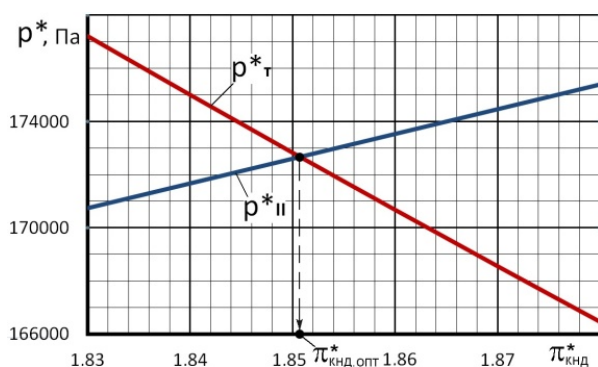


Рис. 1.3. Порядок определения  $\pi_{\text{кнд.опт}}^*$  на расчетном режиме работы двигателя

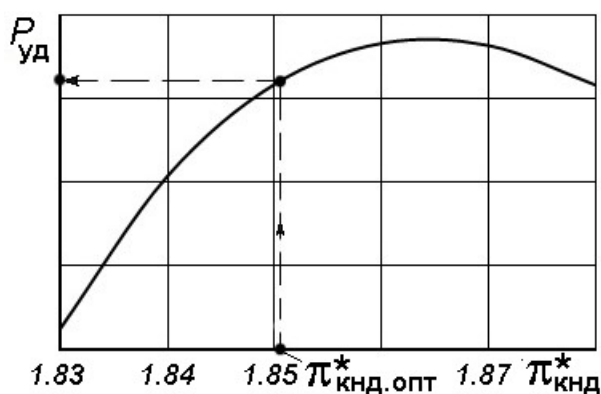


Рис. 1.4. Зависимость  $P_{\text{уд}}$  от  $\pi_{\text{кнд}}^*$

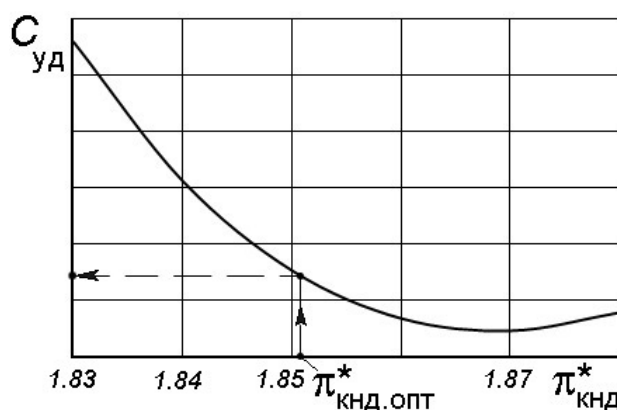


Рис. 1.5. Зависимость  $C_{\text{уд}}$  от  $\pi_{\text{кнд}}^*$

### 1.3.2. Определение параметров двигателя на расчетном режиме его работы

Для последующих расчетов параметров газогенератора, турбокомпрессорного модуля и характеристик двигателя при любых  $\bar{n}_{\text{нд.пр}}$  необходимо определить на расчетном режиме его работы (т.е. при  $\bar{n}_{\text{нд.пр}} = 1$  и  $\pi_{\text{кнд}}^* = \pi_{\text{кнд.опт}}^*$ ) следующие параметры:

- степень повышения давления в газогенераторе  $\pi_{\text{гг.р}}^* = p_{\text{твд}}^* / p_{\text{ввд}}^*$ ;
- степень повышения температуры в газогенераторе  $\tau_{\text{гг.р}}^* = T_{\text{твд}}^* / T_{\text{ввд}}^*$ ;
- степень подогрева рабочего тела в газогенераторе  $\Delta_{\text{гг.р}}^* = T_{\text{г}}^* / T_{\text{ввд}}^*$ ;
- газодинамическую функцию  $\Pi(\lambda_{\text{II}})_{\text{р}}$  в сечении II-II;
- относительную плотность тока  $q(\lambda_{\text{II}})_{\text{р}}$  в сечении II-II;
- относительную плотность тока  $q(\lambda)_{\text{см.р}}$  в сечении (см-см);
- отношение давлений  $(p_{\text{см}}^* / p_{\text{ввд}}^*)_{\text{р}}$ ;

- отношение температур  $(T_{\text{ВВД}}^*/T_{\text{СМ}}^*)_{\text{р}}$ ;
- степень подогрева воздуха в КНД  $\tau_{\text{КНД,р}}^*$ ;
- относительное понижение температуры в ТНД  $\left(\frac{\Delta T^*}{T_0^*}\right)_{\text{НД,р}} = \frac{T_{\text{ТВД}}^* - T_{\text{Т}}^*}{T_{\text{ТВД}}^*}$ ;
- приведенный расход воздуха  $G_{\text{в.пр.р}} = G_{\text{в}} \frac{101300}{p_{\text{в}}^*} \sqrt{\frac{T_{\text{в}}^*}{288}}$ ;
- приведенный часовой расход топлива  $G_{\text{т.ч.пр.р}} = G_{\text{т.ч}} \frac{101300}{p_{\text{в}}^*} \sqrt{\frac{288}{T_{\text{в}}^*}}$ ;
- степень повышения температуры в турбокомпрессорном модуле

$$\tau_{\text{ТКМ.р}}^* = \frac{T_{\text{СМ}}^*}{T_{\text{в}}^*}.$$

Для их определения на расчетном режиме работы двигателя необходимо построить графики зависимостей этих параметров от  $\pi_{\text{КНД}}^*$ , используя данные, представленные в табл. 1.1, и определить их расчетные значения при  $\pi_{\text{КНД}}^* = \pi_{\text{КНД,опт}}^*$ . Пример такого способа определения, например  $q(\lambda)_{\text{СМ,р}}$ , представлен на рис. 1.6.

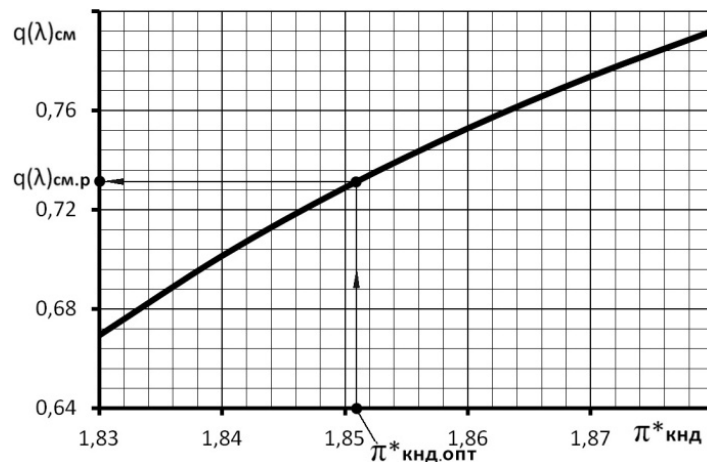


Рис. 1.6. Порядок определения расчетного значения  $q(\lambda)_{\text{СМ,р}}$

### Расчет характеристик осевого компрессора

Расчет характеристик компрессора производится в следующей последовательности [3 и 6].

1. Для расчета характеристик компрессора необходимо задать следующие его параметры *на расчетном режиме* (т.е. в точке «P» при  $\bar{n}_{пр} = 1$ , рис. 2.1):

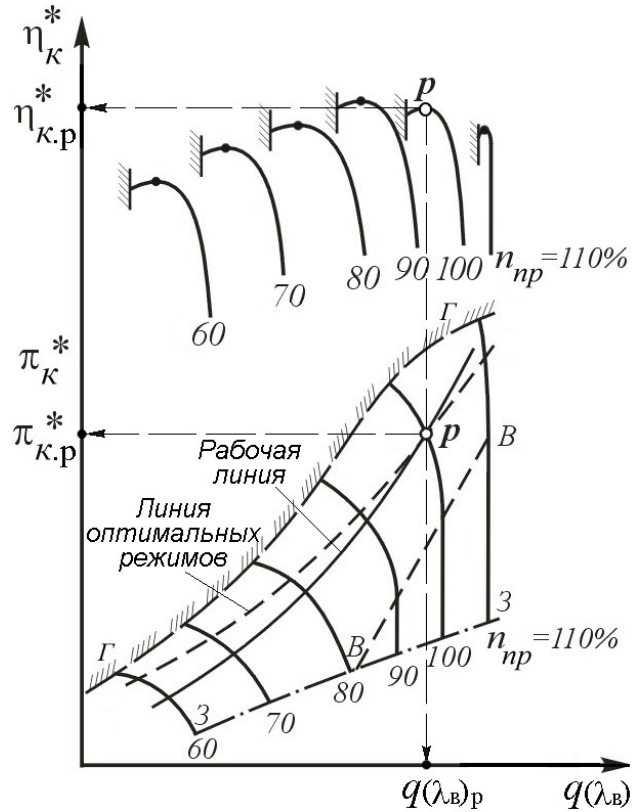


Рис. 2.1. Характеристика компрессора

- степень повышения давления  $\pi_{к,р}^*$ ;
- коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta_{к,р}^*$ ;
- относительную плотность тока на входе в компрессор  $q(\lambda_{в})_р$ ;
- приведенную окружную скорость первой ступени

$$u_{к,пр,р} = u_{к,р} \sqrt{288/T_{в}^*};$$

- коэффициент нагрузки компрессора  $\mu_к$ ;
- запас устойчивости компрессора  $\Delta K_{у,р}$ ;
- соотношение площадей проходных сечений проточной части компрессора на входе и на выходе из него  $F_{в}/F_{к}$ ;

По этим данным могут быть вычислены расчетные значения степени повышения температуры воздуха в компрессоре и плотности тока на выходе из

него: 
$$\tau_{к,р}^* = 1 + (\pi_{к,р}^* \frac{k-1}{k} - 1) / \eta_{к,р}^*; \quad q(\lambda_{к})_р = q(\lambda_{в})_р \frac{F_{в}}{F_{к}} \frac{\sqrt{\tau_{к,р}^*}}{\pi_{к,р}^*}$$

и определены, соответственно, значения  $\lambda_{в,р}$  и  $\lambda_{к,р}$  по рис. 2.12.

2. В этой методике считается, что на расчетном режиме работы компрессора (в точке «P», рис. 2.1) все ступени работают согласовано и, следовательно, расчетный режим совпадает с режимом максимума КПД при  $\bar{n}_{пр} = 1$ . Тогда, задавшись рядом значений  $\bar{n}_{пр}$  в диапазоне, в котором выполняется расчет характеристик, можно для каждого значения  $\bar{n}_{пр}$  определить параметры компрессора на **оптимальном режиме** (т.е. на линии оптимальных режимов, в каждой точке которой при каждом значении  $\bar{n}_{пр}$  кпд  $\eta_{к}^* = \eta_{к \max}^*$ ). Для этого необходимо, используя данные рис. 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 и 2.6, определить по ним значения

$$\bar{\eta}_{к \max}^* = \eta_{к \max}^* / \eta_{к,р}^*, \quad \delta_0 = \text{tg}(\Phi)_0, \quad \bar{c}_a \text{ опт} = \tilde{c}_a \text{ опт} / (\tilde{c}_a \text{ опт})_{\bar{n}_{пр}=1}, \quad \text{где}$$

$\tilde{c}_a = G_{в} / (F_{ср} \rho_{ср} u_{к})$ , и  $\Delta \bar{L}_{к, \text{опт}}$  и с их помощью вычислить на **оптимальном режиме** работы компрессора следующие параметры:

- максимальное значение КПД  $\eta_{к \max}^* = \eta_{к,р}^* \bar{\eta}_{к \max}^*$ ;
- относительное значение коэффициента затраченной работы

$$\bar{L}_{к, \text{опт}} = \bar{L}_{к, \text{опт}} / (\bar{L}_{к, \text{опт}})_{\bar{n}_{пр}} = 1 + \delta_0 \Delta \bar{L}_{к, \text{опт}};$$

- степень повышения температуры  $\tau_{к, \text{опт}}^* = 1 + (\tau_{к,р}^* - 1) \bar{n}_{пр}^2 \bar{L}_{к, \text{опт}}$ .

3. Для построения напорной кривой и расчета изменения КПД компрессора при фиксированном значении  $\bar{n}_{пр}$  следует, вычислив  $u_{к, пр} = u_{к, пр, р} \bar{n}_{пр}$ , определить из рис. 2.3 и 2.4 крутизну изменения  $\bar{L}_{к}$  по  $\bar{c}_a$ :

$$\delta = \text{tg} \Phi = \delta_0 + \Delta \text{tg} \Phi.$$

Затем, задавшись рядом значений  $\bar{c}_a$ , для каждого из них необходимо вычислить относительную величину затраченной работы

$$\bar{L}_{к} = \frac{\bar{L}_{к}}{\bar{L}_{к, \text{опт}}} = 1 - \delta (\bar{c}_a - 1)$$

и степень повышения температуры воздуха  $\tau_{к}^* = 1 + (\tau_{к, \text{опт}}^* - 1) \bar{L}_{к}$ , а по рис. 2.7 определить соответствующее значение относительного коэффициента гидравлических потерь в компрессоре  $\bar{\xi}_{к} = \xi_{к} / (\xi_{к})_{\text{опт}}$ , где  $\xi_{к} = L_r / \bar{c}_a^2$ .

Отсюда для каждого из рассматриваемых значений  $\bar{c}_a$  можно вычислить КПД компрессора

$$\eta_{к}^* = 1 - \bar{\xi}_{к} (1 - \eta_{к \max}^*) \frac{\bar{c}_a^2}{\bar{L}_{к}}$$

и найти  $\pi_{к}^*$  в данной точке напорной кривой

$$\pi_{к}^* = [1 + (\tau_{к}^* - 1) \eta_{к}^*]^{\frac{k}{k-1}}.$$

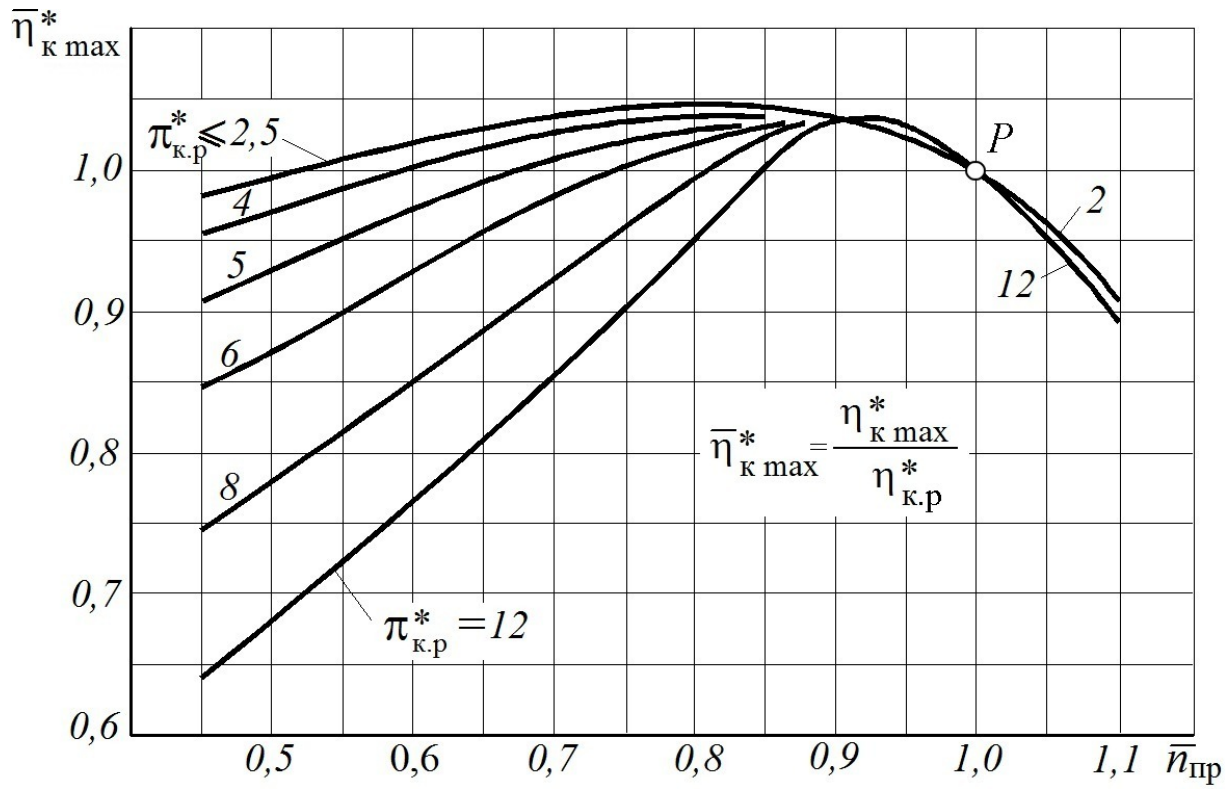


Рис. 2.2. Изменение  $\bar{\eta}_{k \max}^* = \eta_{k \max}^* / \eta_{к.р}^*$  по  $\bar{n}_{пр}$  у нерегулируемых компрессоров с различными  $\pi_{к.р}^*$ ;

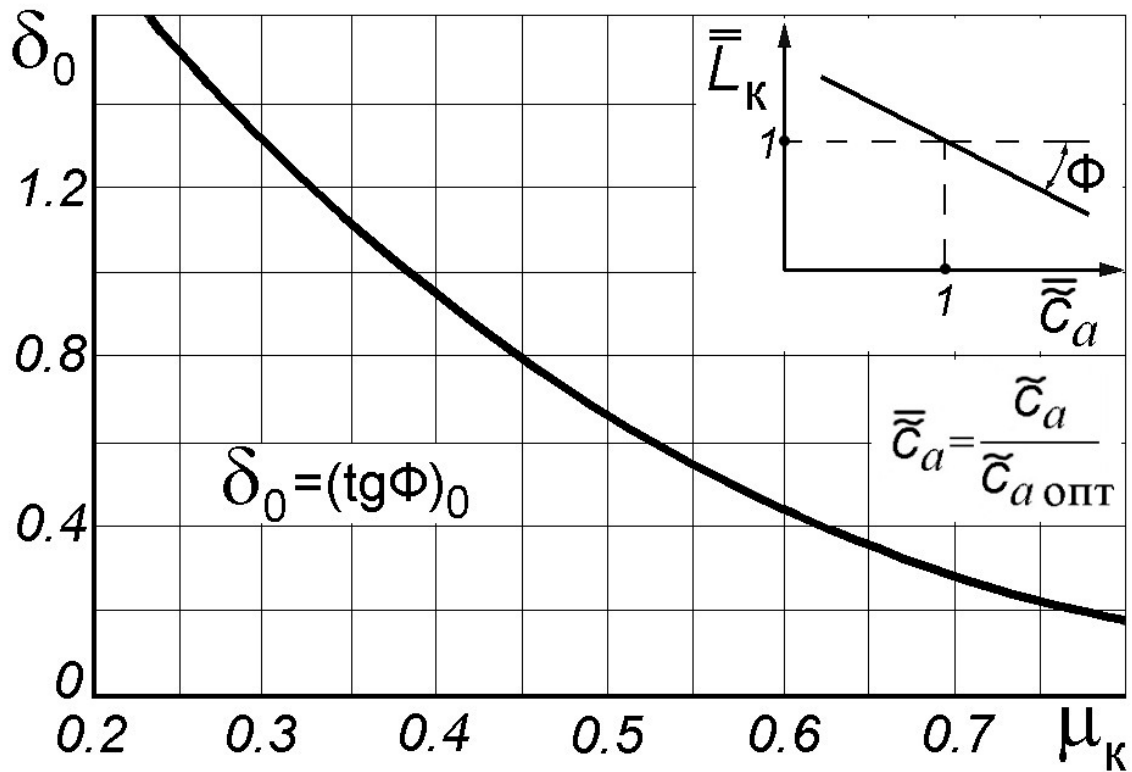


Рис. 2.3. Значения  $\delta_0 = (\text{tg}\Phi)_0$  при малых приведенных окружных скоростях

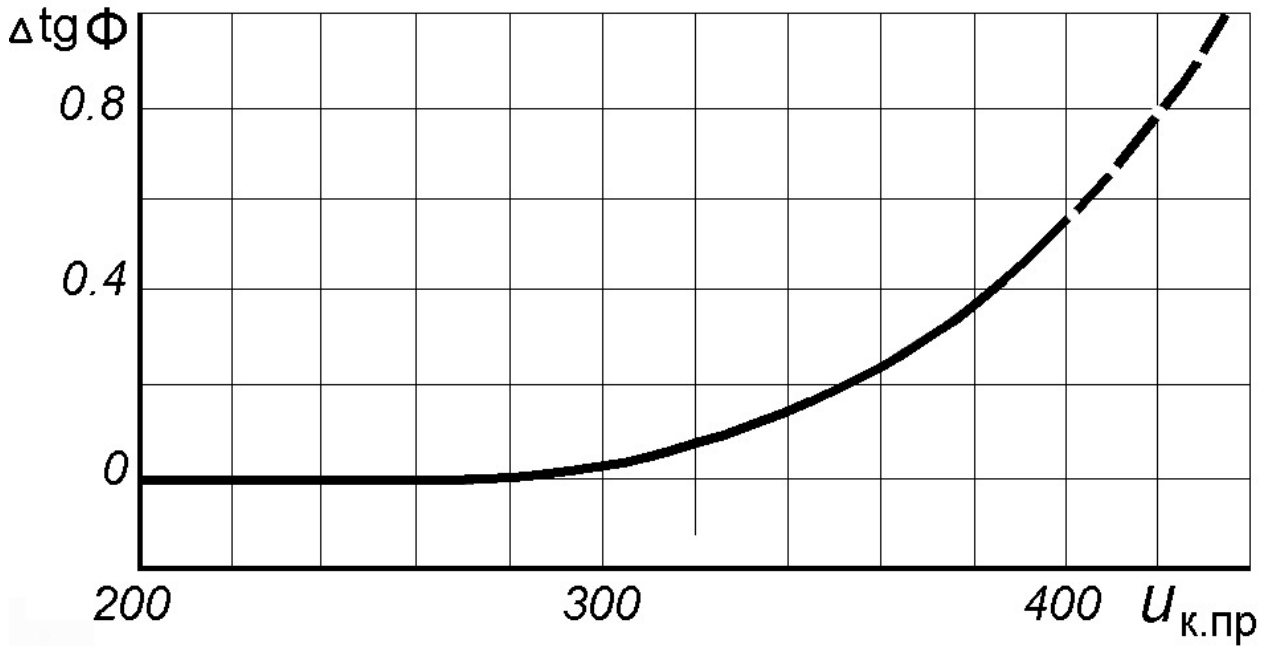


Рис. 2.4. Приращение  $\text{tg}\Phi$  при приведенных скоростях  $u_{к.пр} > 260$  м/с

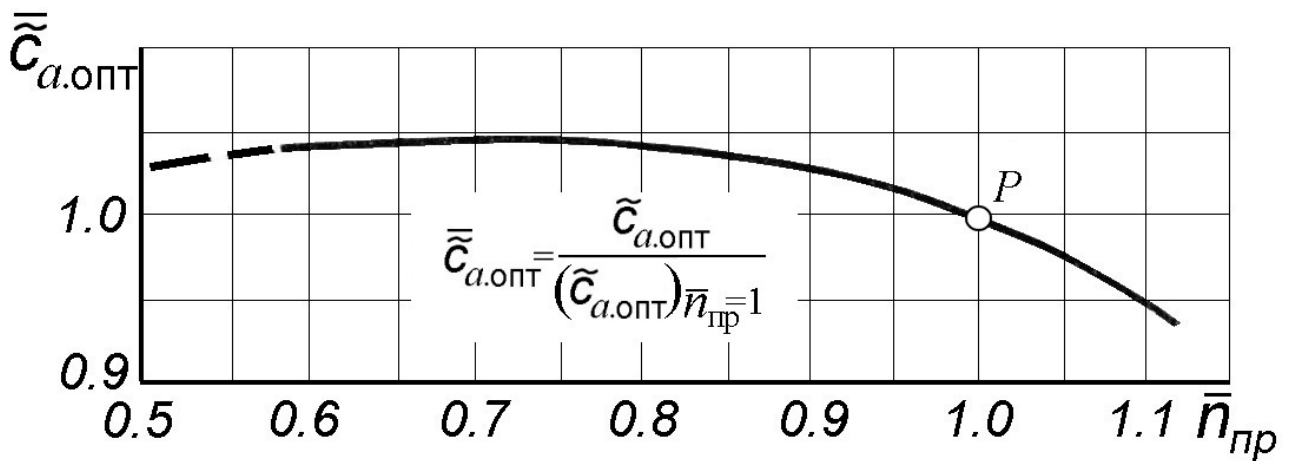


Рис. 2.5. Зависимость оптимального коэффициента расхода от  $\bar{n}_{пр}$

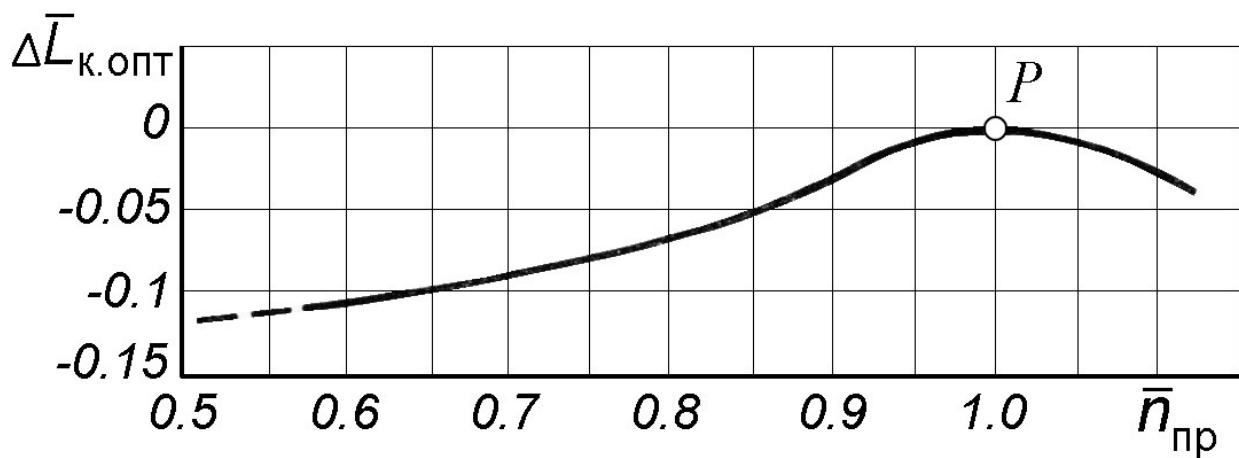


Рис. 2.6. Зависимость коэффициента затраченной работы на оптимальных режимах от  $\bar{n}_{пр}$

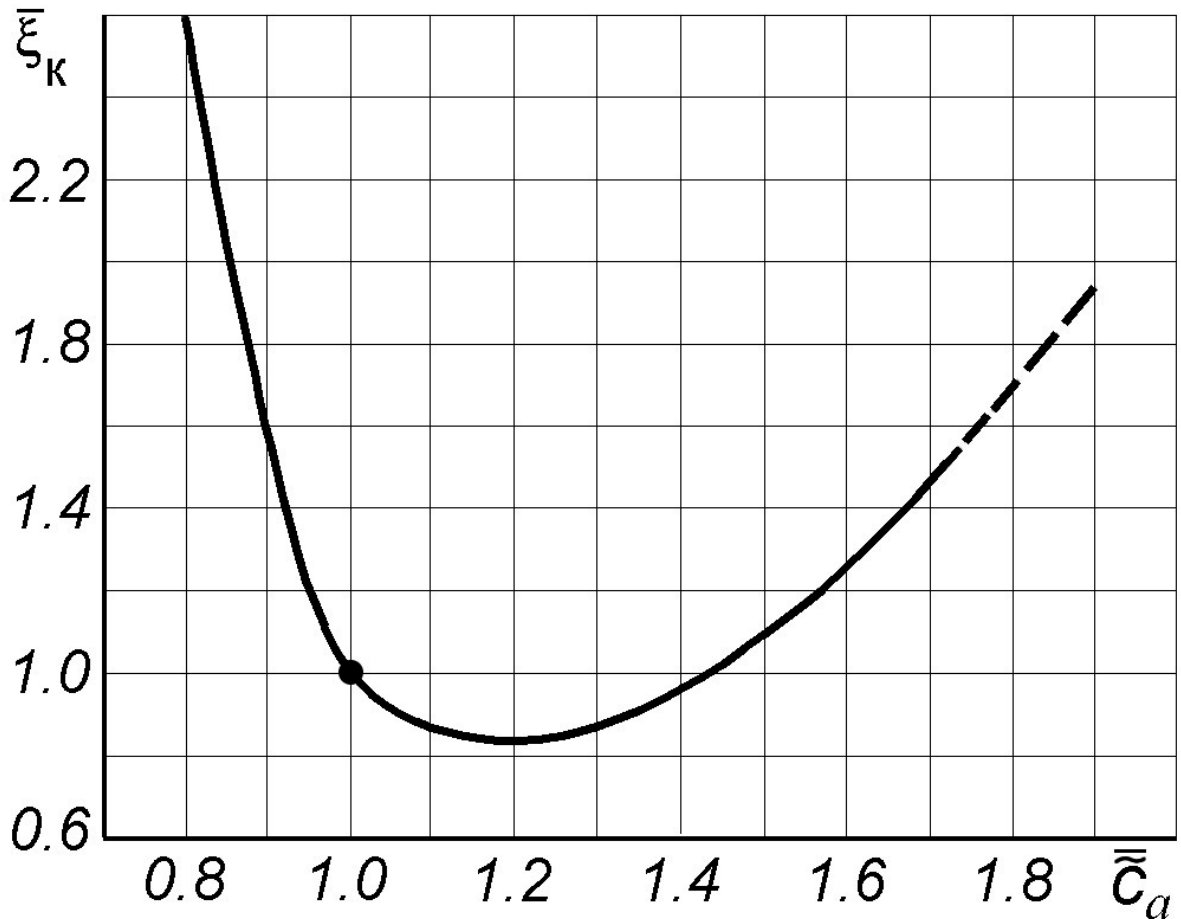


Рис. 2.7. Изменение относительного коэффициента потерь в компрессоре при изменении  $\bar{c}_a$

4. Значение относительной плотности тока  $q(\lambda_B)$ , соответствующее данным значениям  $\bar{n}_{\text{пр}}$  и  $\bar{c}_a$ , определяется из следующей системы двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{q(\lambda_K)}{q(\lambda_B)} &= \frac{F_B \sqrt{\tau_K^*}}{F_K \pi_K^*} \\ \lambda_B \lambda_K &= \lambda_{B,p} \lambda_{K,p} \bar{n}_{\text{пр}}^2 (\bar{c}_a \text{ опт } \bar{c}_a)^2 \sqrt{\frac{\tau_{K,p}^*}{\tau_K^*}} \end{aligned} \right\}$$

Эти уравнения образуют систему уравнений с двумя неизвестными  $\lambda_B$  и  $\lambda_K$ . При этом правые части этих уравнений при заданных  $\bar{n}_{\text{пр}}$  и  $\bar{c}_a$  известны, так как  $\pi_K^*$ ,  $\tau_K^*$  и  $\bar{c}_a \text{ опт}$  были определены выше. Для решения этой системы уравнений следует применить итерационную процедуру (см. ниже).

При больших  $u_{k,\text{пр}}$  в процессе расчета может наблюдаться уменьшение вычисленных значений  $q(\lambda_B)$  на правой ветви характеристики, начиная с некоторого значения  $\bar{c}_a$ . Это является следствием приближенности данной методики. В таких случаях следует считать величину  $q(\lambda_B)$  после достижения ею максимального значения постоянной, что соответствует вертикальному участку характеристики компрессора.



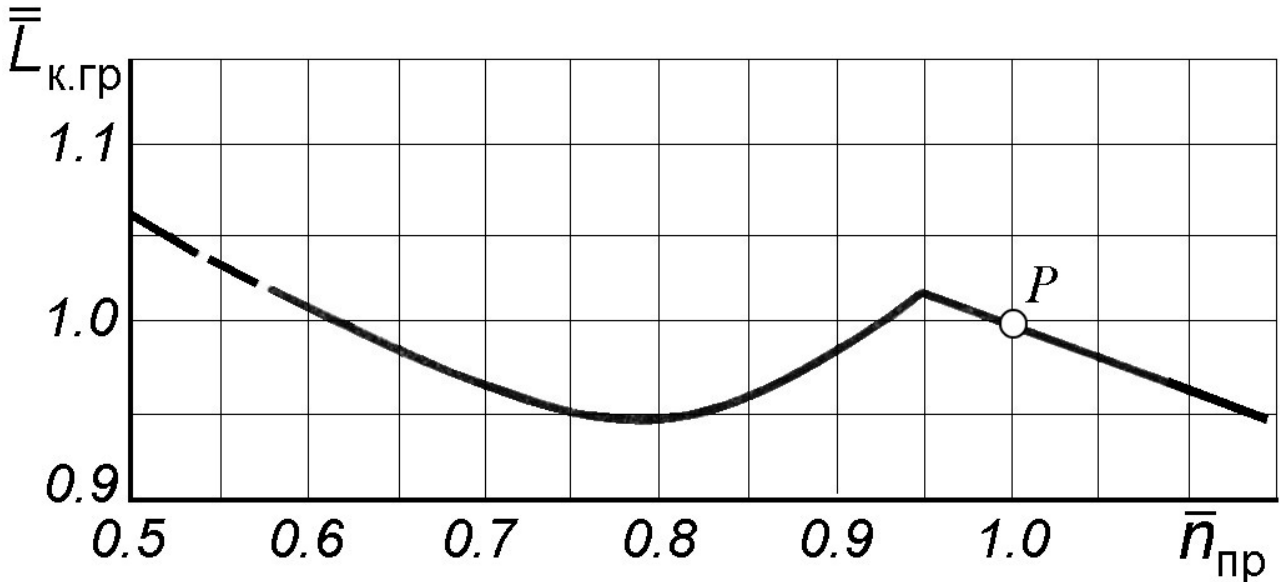


Рис. 2.8. Изменение  $\bar{\eta}_{k, \text{max}}^* = \eta_{k, \text{max}}^*/\eta_{k, \text{р}}^*$  по  $\bar{n}_{\text{пр}}$  у нерегулируемых компрессоров с различными  $\pi_{k, \text{р}}^*$

5. Для построения границы устойчивой работы компрессора необходимо:

а) при  $\bar{n}_{\text{пр}} = 1$  найти на левой ветви напорной кривой (т.е. в области  $\bar{c}_a < 1$ ) точку с заданным значением запаса устойчивости  $\Delta K_{y, \text{р}}$ ;

б) определить в этой точке  $\bar{L}_k = \bar{L}_k \bar{L}_{k, \text{опт}}$ . Здесь значение  $\bar{L}_{k, \text{опт}}$  следует определить из выражения

$$\bar{L}_{k, \text{опт}} = \bar{L}_{k, \text{опт}} / (\bar{L}_{k, \text{опт}})_{\bar{n}_{\text{пр}}=1}.$$

Тогда получим 
$$\bar{L}_k = \bar{L}_k \bar{L}_{k, \text{опт}} (\bar{L}_{k, \text{опт}})_{\bar{n}_{\text{пр}}=1}.$$

Как было принято выше, расчетный режим работы компрессора, т.е. режим при  $\bar{n}_{\text{пр}} = 1$ , совпадает с оптимальным режимом (режимом максимума КПД). Тогда  $(\bar{L}_{k, \text{опт}})_{\bar{n}_{\text{пр}}=1} = L_{k, \text{р}} / u_{k, \text{р}, \text{р}}^2$ , где  $L_{k, \text{р}} = c_p T_v^* \left( \pi_{k, \text{р}}^{* \frac{k-1}{k}} - 1 \right) / \eta_{k, \text{р}}^*$ .

Если обозначить полученное значение  $\bar{L}_k$  на границе устойчивой работы при  $\bar{n}_{\text{пр}} = 1$  через  $(\bar{L}_{k, \text{гр}})_{\bar{n}_{\text{пр}}=1}$ , то далее, используя данные рис 2.8, необходимо

рассчитать  $\bar{L}_{k, \text{гр}} = \bar{L}_{k, \text{гр}} (\bar{L}_{k, \text{гр}})_{\bar{n}_{\text{пр}}=1}$

при других  $\bar{n}_{\text{пр}}$  и соответственно найти на напорных кривых при этих  $\bar{n}_{\text{пр}}$  точки со значением  $\bar{L}_k = \bar{L}_{k, \text{гр}}$ .

Расчеты для построения напорной кривой удобно вести по алгоритму, приведенному в табл. 2.1.

Для определения относительной плотности тока на входе в компрессор  $q(\lambda_v)$  в данной точке напорной кривой (т.е. при данном значении  $\bar{c}_a$ ) необходимо задаться тремя или четырьмя значениями приведенной скорости на входе в компрессор  $\lambda_v$  в диапазоне значений примерно 0,3...0,6. Затем необходимо вычислить для каждого из этих значений приведенную скорость на выходе из



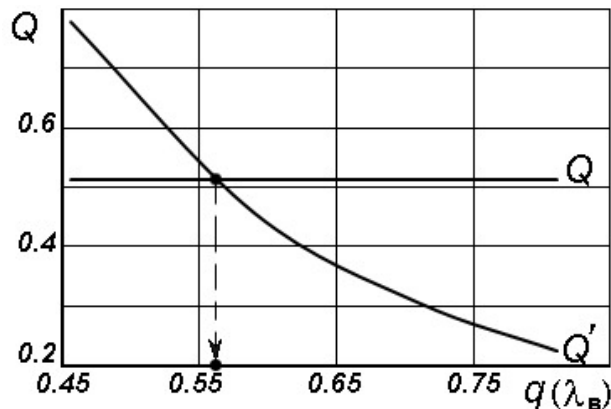
По значениям  $\lambda_B$  и  $\lambda_K$  необходимо определить новые значения  $q(\lambda_B)$  и  $q(\lambda_K)$  и соответственно  $Q' = \frac{q(\lambda_K)}{q(\lambda_B)}$ .

Порядок подготовки данных для графического определения относительной плотности тока на входе в компрессор  $q(\lambda_B)$  изложен в табл. 2.2.

Таблица 2.2

1	$Q$ - взять из табл. 2.1 для выбранного номера точки на напорной ветке				
2	$(\lambda_B \lambda_K)$ - взять из табл. 2.1 для выбранного номера точки на напорной ветке				
3	$\lambda_B$	0,3	0,4	0,5	0,6
4	$\lambda_K = (\lambda_B \lambda_K) / \lambda_B$				
5	$q(\lambda_B) = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_B \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_B^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$				
6	$q(\lambda_K) = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_K \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_K^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$				
7	$Q' = \frac{q(\lambda_K)}{q(\lambda_B)}$				

По данным табл. 2.2 необходимо построить график зависимости  $Q'$  от  $q(\lambda_B)$  и нанести на него значение  $Q$  (рис. 2.9). Искомое значение  $q(\lambda_B)$  соответствует точке пересечения кривой  $Q'$  с линией  $Q$ .

Рис. 2.9. Способ определения  $q(\lambda_B)$ 

Завершается данное практическое занятие построением напорной ветки компрессора по значениям  $q(\lambda_B)$ ,  $\pi_K^*$  и  $\eta_{K2}^*$  соответствующей рассмотренному в табл. 2.1 диапазону изменения значений  $\bar{c}_a$  при заданном значении  $\bar{n}_{пр} = \text{const}$  (рис. 2.10 и 2.11).

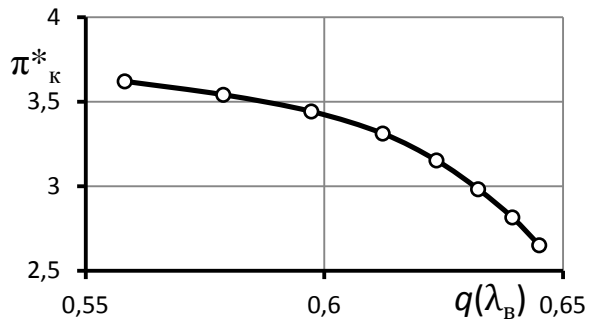


Рис. 2.10. Характеристика компрессора: зависимость  $\pi_k^*$  от  $q(\lambda_B)$

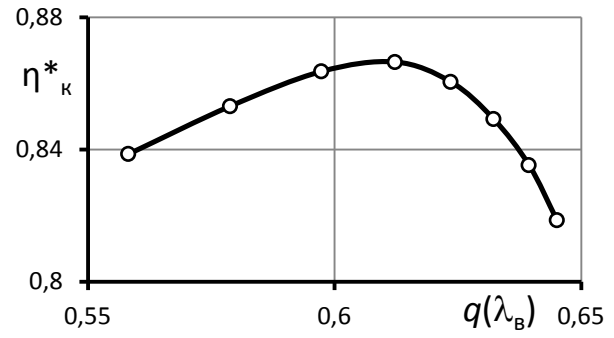


Рис. 2.11. Характеристика компрессора: зависимость  $\eta_k^*$  от  $q(\lambda_B)$

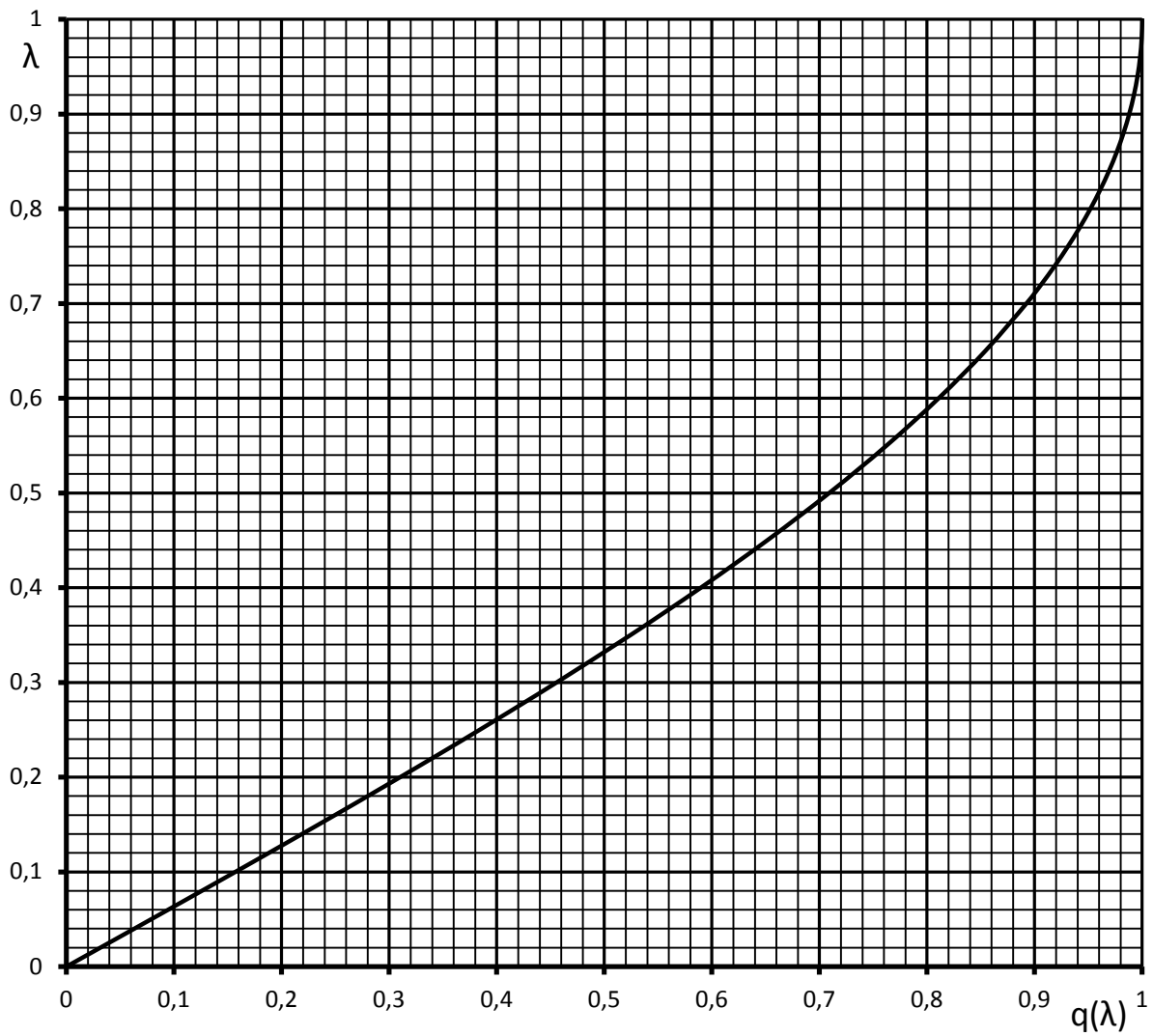


Рис. 2.12. Зависимость  $\lambda$  от  $q(\lambda)$  ( $k=1,4$ )

## Приближенный расчет характеристик газовой турбины

### Введение

Наиболее достоверным способом получения расчетных характеристик турбин является последовательный расчет кинематики потока и всех видов потерь для каждого лопаточного венца, начиная с соплового аппарата первой ступени, с учетом конкретных геометрических параметров решеток сопловых и рабочих лопаток и изменения потока по радиусу (повенечный расчет). Однако такой расчет для многоступенчатой турбины оказывается весьма громоздким, даже в том случае, когда в процессе расчета ведется определение параметров потока только на одном (среднем) радиусе.

Ниже изложена приближенная методика расчета характеристик одно-вальных газовых турбин [3], имеющая меньшую точность, чем может быть получена при повенечном расчете, но отличающаяся значительно большей компактностью и не требующая задания многих геометрических параметров всех лопаточных венцов.

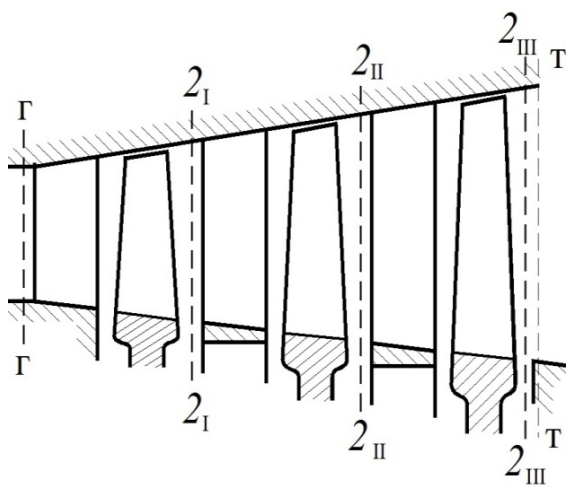


Рис. 3.1. Схема проточной части многоступенчатой турбины

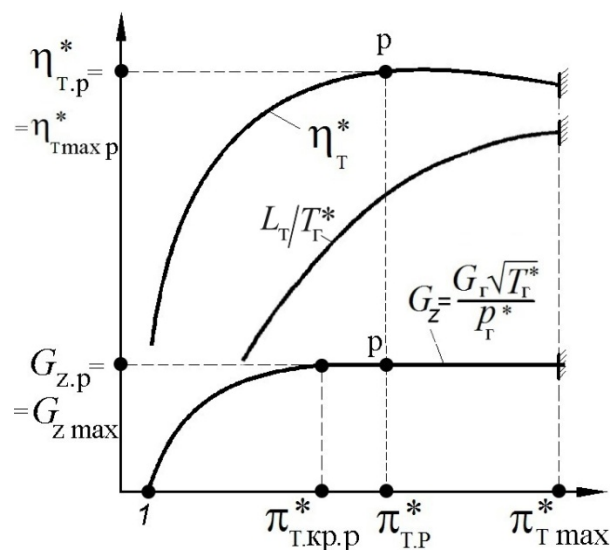


Рис. 3.2. Характеристика турбины

*Характеристикой турбины (ступени турбины) называются зависимости её КПД  $\eta_{Г}^*$ , параметра работы  $L_{Т}/T_{Г}^*$ , параметра расхода  $G_z = G_{Г} \sqrt{T_{Г}^*} / p_{Г}^*$  (где  $T_{Г}^*$  и  $p_{Г}^*$  – температура и давление газа на входе в турбину, рис. 3.1) и направления (угла выхода) потока газа за турбиной от степени понижения дав-*

ления в турбине  $\pi_T^*$  и параметра частоты вращения турбины  $\frac{n}{\sqrt{T_T^*}}$  или пропор-

ционального ему числа  $\lambda_u = \frac{u}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} R T_T^*}}$  (где  $u = \sqrt{\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z u_i^2}$  – среднеквадратич-

ное значение окружных скоростей  $u_i$  рабочих лопаток всех ступеней на их средних радиусах) при данных значениях газовой постоянной  $R$  и показателя адиабаты  $k$ .

Порядок расчет характеристик газовой турбины производится в следующей последовательности.

### 3.1. Задание исходных данных

Исходными данными для расчета характеристик по этой методике, помимо физических констант газа ( $k$ ,  $R$ ), являются следующие значения параметров турбины на расчетном режиме ее работы (который будет отмечаться индексом «р», рис. 3.2):

- степень понижения полного давления  $\pi_{T,p}^*$  ( в диапазоне 1,5...6);
- КПД турбины  $\eta_{T,p}^*$  ( в диапазоне 0,88...0,92);
- параметр расхода  $G_{z,p} = \left( \frac{G_T \sqrt{T_T^*}}{p_T^*} \right)_p$  (в дальнейшем будет рассматриваться

его относительное значение, т.е. будет полагать, что  $G_{z,p}=1$ );

- число ступеней  $z$  ( в диапазоне 1...4);

- число  $\lambda$  по окружной скорости  $\lambda_{up} = u_p / \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R T_T^*}$  (в диапазоне

0,55...0,65), где  $u_p = \sqrt{\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z u_i^2}$  – среднеквадратичное значение окружных скоро-

стей  $u_i$  рабочих колес всех ступеней на их средних радиусах на расчетном режиме работы турбины;

- число  $\lambda$  за турбиной  $\lambda_{T,p}$  (в диапазоне 0,5...0,7);

– угол выхода потока на среднем радиусе  $\alpha_{T,p}$  (в диапазоне 80...90 градусов, если значение  $\alpha_{T,p}$  неизвестно, то можно принять  $\alpha_{T,p} = 90^\circ$ );

– показатель адиабаты  $k$  (в зависимости от значения температуры газа перед турбиной);

Результатами расчетов являются значения  $\eta_T^*$ ,  $L_T/T_T^*$ ,  $G_z$  и  $\alpha_T$  на нерасчетных режимах, т.е. при различных значениях  $\pi_T^*$  и  $\bar{\lambda}_u = \lambda_u/\lambda_{up}$ .

*Методика основана на анализе ряда характеристик одно- и многоступенчатых газовых турбин, позволившем установить закономерности*

**относительного изменения основных параметров на нерасчетных режимах в области автомодельности по числу Рейнольдса.**

### 3.2. Подготовки данных для расчета $\eta_T^*$ , $L_T/T_{г}^*$ , $G_z$ и $\alpha_T$ при различных $\pi_T^*$ и заданном $\lambda_u$

Предварительно, перед расчетом характеристик турбины, следует определить для **расчетного режима** её работы следующие параметры:

$$- L_{T,p}/T_{г,p}^* = c_p (1 - 1/e_{T,p}^*) \eta_{T,p}^*, \text{ где } c_p = 1246,3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)};$$

$$- y_p^* = \lambda_{u,p} \sqrt{z} \sqrt{\frac{k-1}{k+1} \frac{e_{T,p}^*}{e_{T,p}^* - 1}} \quad (\text{рис. 3.3}), \text{ где } e_{T,p}^* = (\pi_{T,p}^*)^{\frac{k-1}{k}};$$

$$- y_{\text{опт},p}^* = a \cdot y_p^*, \text{ где } a = 1,1;$$

- максимальное значение КПД турбины при  $\lambda_u = \lambda_{u,p}$

$$\eta_{T \text{ max } p}^* = \eta_{T,p}^* \left[ 1 + 0,833(a-1)^2 \right] = 1,0083 \eta_{T,p}^*;$$

$$- \text{критическое значение } \pi_{T, \text{кр}, p}^* = 6 - 5,75 e^{-0,34 \sqrt{z}}.$$

Это значение  $\pi_T^*$ , при превышении которого  $G_z$  уже не изменяется (рис. 3.5), т.к. в критическом сечении соплового аппарата первой ступени турбины скорость газа достигает значения местной скорости звука при  $\lambda_u = \lambda_{u,p}$ ;

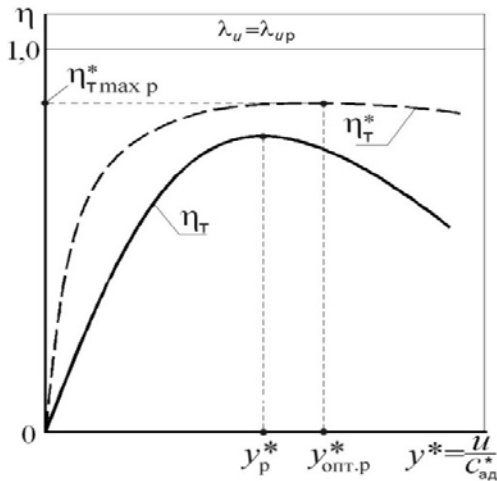


Рис. 3.3. Зависимость КПД ступени от  $y^* = u/c_{ад}^*$  при  $\lambda_u = \lambda_{u,p}$

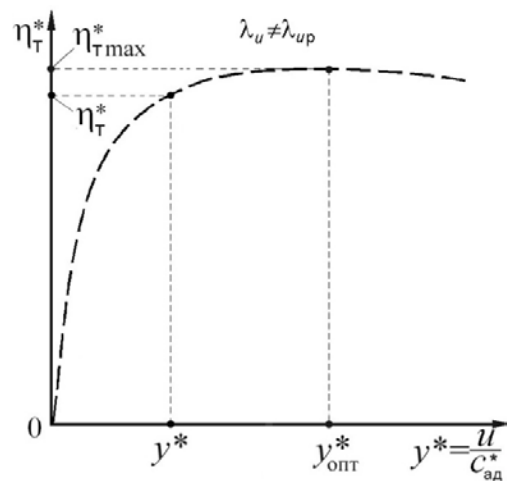


Рис. 3.4. Зависимость КПД ступени от  $y^* = u/c_{ад}^*$  при  $\lambda_u \neq \lambda_{u,p}$

$$- \text{значение параметра } x_p = (\pi_{T,p}^* - 1) / (\pi_{T, \text{кр}, p}^* - 1);$$

$$- \text{значение } \bar{G}_{z,p} = G_{z,p} / G_{z, \text{max}} = \sqrt[4]{1 - (1 - x_p)^2} \quad (\text{а при } x_p > 1 \bar{G}_{z,p} = 1).$$

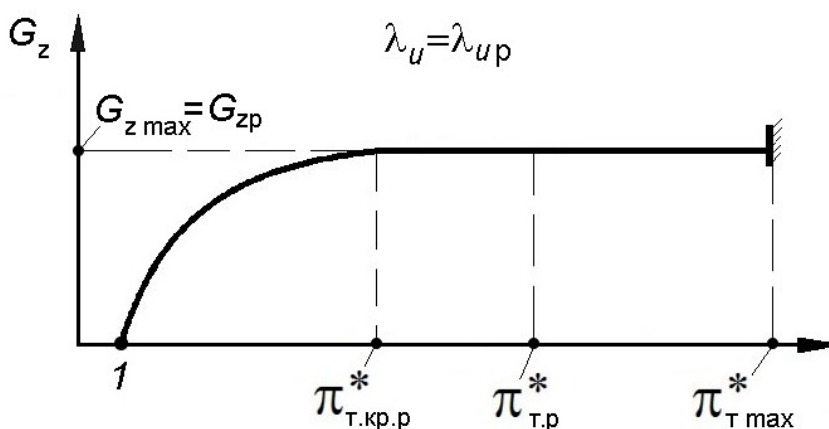


Рис. 3.5. Зависимость параметра расхода турбины от  $\pi_T^*$  при  $\lambda_u = \lambda_{ур}$

Затем необходимо определить максимальное значение степени понижения давления в турбине

$$\pi_{T \max}^* \approx \left[ \pi_{T.p}^* \frac{0,9}{q(\lambda_{T.p})} \right]^{1,1}, \text{ где } q(\lambda_{T.p}) = \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_{T.p} \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_{T.p}^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

Значение  $\pi_{T \max}^*$  соответствует такому значению  $\pi_T^*$ , при котором осевая скорость газа на выходе из турбины достигает значения местной скорости звука.

Далее следует задать значение  $\lambda_u$  по окружной скорости, принятое для расчетов, и определить относительное значение  $\bar{\lambda}_u = \lambda_u / \lambda_{ур}$  на данном нерасчетном режиме. После этого вычислить текущее значение  $\pi_{T.кр}^*$  на этом режиме

$$\pi_{T.кр}^* = \pi_{T.кр.p}^* \frac{1 + 0,45 \bar{\lambda}_u}{1,45}.$$

Дальнейший расчет может быть проведен в следующем порядке.

### 3.3. Определение $y_{\text{опт}}^*$ и максимального КПД турбины на заданном нерасчетном режиме (т.е. при $\lambda_u \neq \lambda_{ур}$ )

При относительном значении  $\bar{\lambda}_u = \lambda_u / \lambda_{ур}$  на данном нерасчетном (т.е. при  $\lambda_u \neq \lambda_{ур}$ ) режиме вычисляется оптимальное значение  $y^*$ , т.е.  $y_{\text{опт}}^*$  (рис. 3.4):

- если  $\bar{\lambda}_u \geq 0,5$ , то  $y_{\text{опт}}^* = y_{\text{опт.p}}^* [0,91 + 0,72(\bar{\lambda}_u - 0,5)^3]$ ;
- если  $\bar{\lambda}_u < 0,5$ , то  $y_{\text{опт}}^* = 0,91 y_{\text{опт.p}}^*$ .



Затем определяется максимальное (т.е. соответствующее этому  $y_{\text{опт}}^*$ ) значение КПД турбины  $\eta_{\text{Тmax}}^*$  при данном  $\bar{\lambda}_u \neq \bar{\lambda}_{u\text{р}}$ . Относительное изменение

КПД турбины на оптимальных режимах  $\bar{\eta}_{\text{Тmax}}^* = \frac{\eta_{\text{Тmax}}^*}{\eta_{\text{Тmax p}}^*}$  при изменении  $\bar{\lambda}_u$

приблизительно выражается следующими формулами:

$$- \bar{\eta}_{\text{Тmax}}^* = \frac{\eta_{\text{Тmax}}^*}{\eta_{\text{Тmax p}}^*} = 1 + 0,03(\bar{\lambda}_u - 1), \text{ если } \bar{\lambda}_u \geq 1;$$

$$- \bar{\eta}_{\text{Тmax}}^* = 1 - \left[ 0,1 + 0,18 \left( \pi_{\text{Т.р}}^{*0,4} - 1,44 \right) \right] (1 - \bar{\lambda}_u), \text{ если } 0,5 < \bar{\lambda}_u < 1;$$

$$- \bar{\eta}_{\text{Тmax}}^* = \left( \bar{\eta}_{\text{Тmax}}^* \right)_{\bar{\lambda}=0,5}, \text{ если } \bar{\lambda}_u < 0,5.$$

Тогда 
$$\eta_{\text{Тmax}}^* = \bar{\eta}_{\text{Тmax}}^* \cdot \eta_{\text{Тmax p}}^*$$

### 3.4. Определение КПД турбины на заданном (нерасчетном) режиме

(т.е. при  $\lambda_u \neq \lambda_{u\text{р}}$  и  $\pi_{\text{Т}} \neq \pi_{\text{Т.р}}$ )

Сначала при данных  $\lambda_u \neq \lambda_{u\text{р}}$  и  $\pi_{\text{Т}} \neq \pi_{\text{Т.р}}$  вычисляется значение

$$y^* = \lambda_u \sqrt{z} \sqrt{\frac{k-1}{k+1} \frac{e_{\text{Т}}^*}{e_{\text{Т}}^* - 1}} \quad (\text{рис. 3.4}), \text{ где } e_{\text{Т}}^* = \left( \pi_{\text{Т}}^* \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Затем определяется  $\bar{y}^* = \frac{y^*}{y_{\text{опт}}^*}$ .

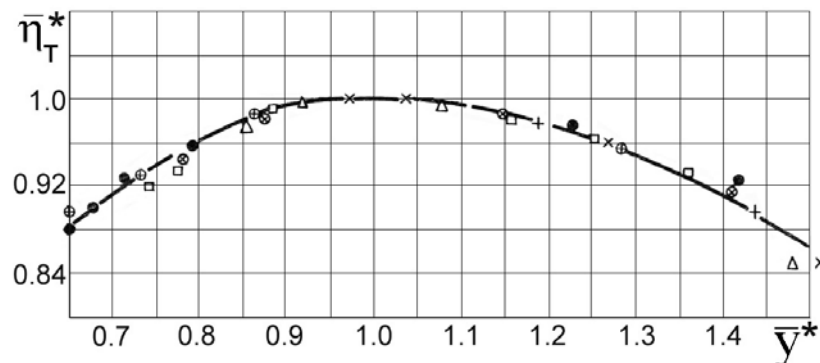


Рис. 3.6. Относительное изменение  $\eta_{\text{Т}}^*$  при отклонении от оптимального режима работы турбины (точки относятся к различным турбинам при  $\lambda_u = 0,5 \dots 1,0$ )

Степень снижения  $\eta_T^*$  на данном режиме по сравнению с  $\eta_{T \max}^*$  зависит от степени отклонения этого режима от оптимального. Относительное изменение КПД турбины при отклонении от режима максимума КПД практически одинаково при различных значениях  $\lambda_u$ . Рис. 3.6, где по вертикали отложены значения  $\bar{\eta}_T^* = \eta_T^* / \eta_{T \max}^*$ , а по горизонтали  $\bar{y}^* = y^* / y_{\text{опт}}^*$ . Этот рисунок иллюстрирует относительное изменение  $\eta_T^*$  при изменении  $y^*$  (при  $\lambda_u = \text{const}$ ) и показывает, что это изменение в таких координатах практически одинаково не только при различных  $\lambda_u$ , но и для различных турбин.

Кривая на рис. 3.6 аппроксимируется следующими формулами:

$$- \text{ при } \bar{y}^* \leq 1 \bar{\eta}_T^* = 1 - (\bar{y}^* - 1)^2;$$

$$- \text{ при } \bar{y}^* > 1 \bar{\eta}_T^* = 1 - 0,55(\bar{y}^* - 1)^2,$$

позволяющими найти значения  $\eta_T^* = \eta_{T \max}^* \bar{\eta}_T^*$  при  $\bar{y}^* \neq y_{\text{опт}}^*$ .

### 3.5. Определение параметра расхода газа через турбину на заданном (нерасчетном) режиме ( т.е. при $\lambda_u \neq \lambda_{up}$ и $\pi_T^* \neq \pi_{T,p}^*$ )

Определяющее влияние на параметр расхода  $G_z$  оказывает  $\pi_T^*$ . Влияние изменения  $\lambda_u$  на этот параметр невелико и в первом приближении может не учитываться. В этом случае зависимость  $G_z$  от режима работы для различных турбин можно представить в виде двух частных зависимостей:

– зависимости критической степени понижения давления  $\pi_{T,кр}^*$  от расчетных параметров турбины;

– зависимости относительного значения параметра расхода  $\bar{G}_z = G_z / G_{z,кр}$  от перепада давлений при  $\pi_T^* < \pi_{T,кр}^*$ .

Анализ имеющихся экспериментальных и расчетных характеристик турбин показал, что значение  $\pi_{T,кр}^*$  определяется, в основном, числом ступеней, причем эта зависимость приближенно может быть выражена формулой

$$\pi_{T,кр}^* = 6 - 5,75e^{-0,34\sqrt{z}},$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов.

Зависимость  $\bar{G}_z$  от  $\pi_T^*$  при  $\pi_T^* < \pi_{T,кр}^*$  для различных турбин хорошо обобщается в координатах, представленных на рис 3.7, где по горизонтали отложен параметр  $x = \frac{\pi_T^* - 1}{\pi_{T,кр}^* - 1}$ .

Значение параметра расхода  $G_z$  при данных  $\lambda_u \neq \lambda_{up}$  и  $\pi_T^* \neq \pi_{T,p}^*$  определяется следующим образом.

– вычисляется величина  $\pi_{T,кр}^*$  и  $x$  ;

– по рис. 3.7 определяется относительное значение параметра расхода

$$\bar{G}_z = \frac{G_z}{G_{z \max}}$$

Далее вычисляется искомый параметр расхода  $G_z = G_{z \text{ p}} \frac{\bar{G}_z}{\bar{G}_{z \text{ p}}}$ ,

где  $\bar{G}_{z \text{ p}} = \frac{G_{z \text{ p}}}{G_{z \max}}$  – значение  $\bar{G}_z$  при  $\pi_T^* = \pi_{T, \text{ p}}^*$ .

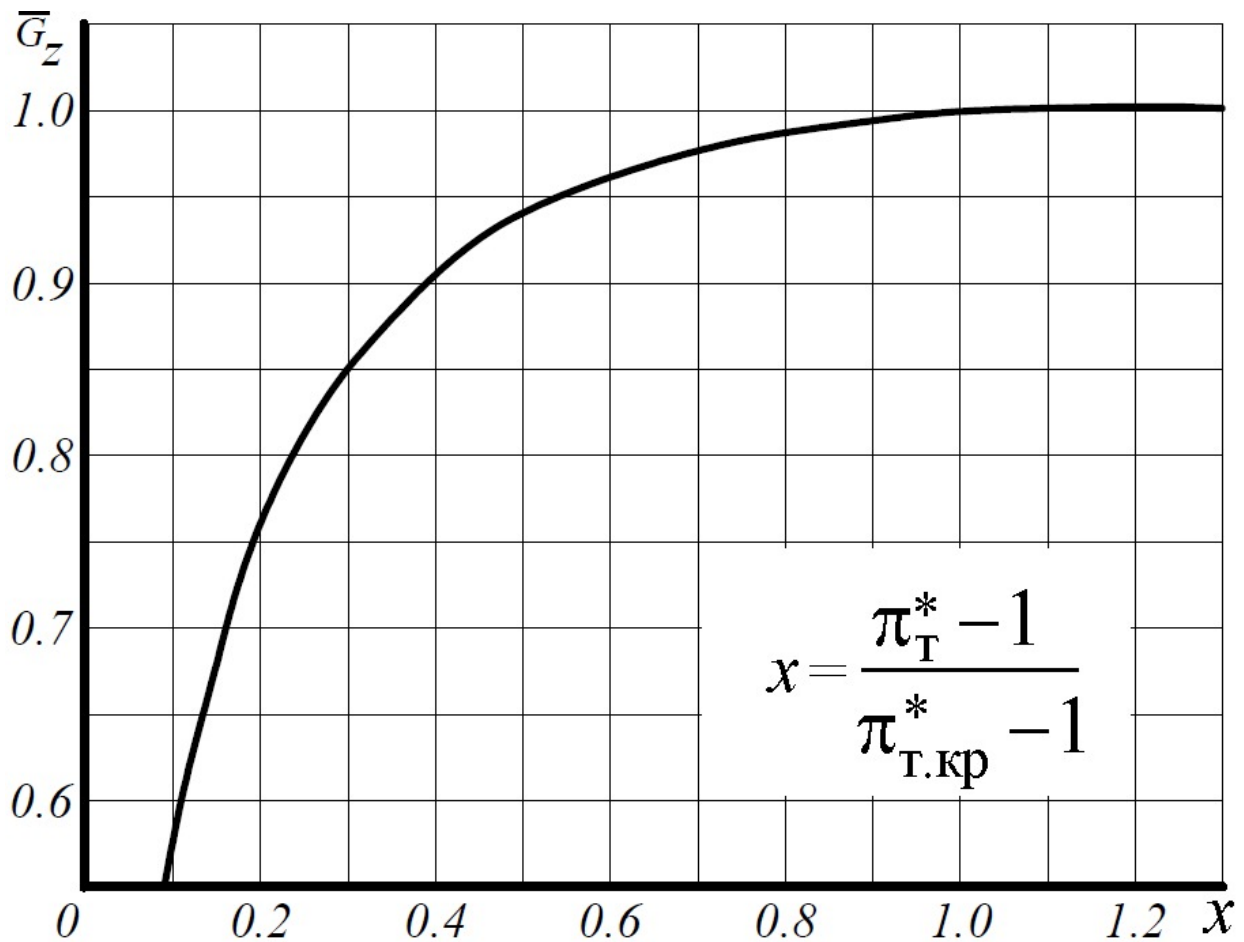


Рис. 3.7. Экспериментальная зависимость относительного параметра расхода для различных турбин от  $\pi_T^*$  при  $\pi_T^* < \pi_{T, \text{kr}}^*$

### 3.6. Определение параметра работы на заданном (нерасчетном) режиме ( т.е. при $\lambda_u \neq \lambda_{u \text{ p}}$ и $\pi_T^* \neq \pi_{T, \text{p}}^*$ )

По заданным значениям  $\pi_T^*$  и уже определенному значению  $\eta_T^*$  можно определить значение параметра работы

$$\frac{L_T}{T_T^*} = c_p \left( 1 - \frac{1}{e_T^*} \right) \eta_T^*, \quad \text{где} \quad c_p = 1246,3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

и относительного параметра работы  $\left(\frac{L_T}{T_T^*}\right) / \left(\frac{L_{T,p}}{T_{T,p}^*}\right)$ .

### 3.7. Определение направления потока за турбиной на заданном (нерасчетном) режиме ( т.е. при $\lambda_u \neq \lambda_{u,p}$ и $\pi_T^* \neq \pi_{T,p}^*$ )

В этом пункте коэффициенты в формулах – это результат обработки опытных данных.

Для определения значения угла выхода потока газа из турбины  $\alpha_T$  (на среднем радиусе) при данных  $\lambda_u \neq \lambda_{u,p}$  и  $\pi_T^* \neq \pi_{T,p}^*$  необходимо:

– определить значение параметра  $y^*$ , при котором (при  $\lambda_u = \lambda_{u,p}$ ) значение угла  $\alpha_T$  было бы равно  $90^\circ$ ,

$$y_{90p}^* = 70 \cdot y_p^* / (\alpha_{T,p} - 20^\circ);$$

– при данном  $\bar{\lambda} = \lambda_u / \lambda_{u,p}$  определить значение  $\bar{y}_{90}^* = y_{90}^* / y_{90p}^*$ , равное:

- $\bar{y}_{90}^* = 0,95 + 0,2(\bar{\lambda}_u - 0,5)^2$ , если  $\bar{\lambda}_u > 0,5$ ;
- $\bar{y}_{90}^* = 0,95$ , если  $\bar{\lambda}_u \leq 0,5$ ;

– определить при данном  $\bar{\lambda}_u$  значение

$$y_{90}^* = \bar{y}_{90}^* \cdot y_{90p}^*;$$

– при данных  $\lambda_u \neq \lambda_{u,p}$  и  $\pi_T^* \neq \pi_{T,p}^*$  найти текущее значение параметра

$$y^* = \lambda_u \sqrt{z} \sqrt{\frac{k-1}{k+1} \frac{e_T^*}{e_T^* - 1}}, \text{ где } e_T^* = \left(\pi_T^*\right)^{\frac{k-1}{k}};$$

– вычислить значение  $\frac{y^*}{y_{90}^*}$  и соответственно значение  $\alpha_T$ :

- если  $\frac{y^*}{y_{90}^*} \leq 1,6$ , то  $\alpha_T = 90^\circ + 70^\circ \left(\frac{y^*}{y_{90}^*} - 1\right)$ ;
- если  $\frac{y^*}{y_{90}^*} > 1,6$ , то  $\alpha_T = 138^\circ + 76,8^\circ \left(0,625 - \frac{y_{90}^*}{y^*}\right)$ .

Порядок расчета характеристики турбины изложен в табл. 3.1.

Таблица 3.1

1	Исходные данные $\pi_{т.р}^* =$ ; $\eta_{т.р}^* =$ ; $G_{zp} = 1$ ; $\lambda_{up} =$ ; $\lambda_{т.р} =$ ; $\alpha_{т.р} =$ ; $k =$ ; $z =$ ; $\lambda_u =$ ;
2	$\bar{\lambda}_u = \lambda_u / \lambda_{up} =$
3	$e_{т.р}^* = (\pi_{т.р}^*)^{\frac{k-1}{k}} =$
4	$L_{т.р} / T_{г.р}^* = c_p (1 - 1/e_{т.р}^*) \eta_{т.р}^* =$ , где $c_p = 1246,3$ Дж/(кг·К)
5	$y_p^* = \lambda_{up} \sqrt{z} \sqrt{\frac{k-1}{k+1} \frac{e_{т.р}^*}{e_{т.р}^* - 1}} =$
6	$y_{опт.р}^* = 1,1 \cdot y_p^* =$
7	$\eta_{т.макс}^* = 1,0083 \eta_{т.р}^* =$
8	$\pi_{т.кр.р}^* = 6 - 5,75 e^{-0,34\sqrt{z}}$
9	$x_p = (\pi_{т.р}^* - 1) / (\pi_{т.кр.р}^* - 1) =$
10	$\bar{G}_{zp} = \sqrt[4]{1 - (1 - x_p)^2} =$ , если $x_p < 1$ , $\bar{G}_{zp} = 1$ , если $x_p > 1$
11	$\pi_{т.кр}^* = \pi_{т.кр.р}^* \frac{1 + 0,45 \bar{\lambda}_u}{1,45} =$
12	$q(\lambda_{т.р}) = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda_{т.р} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_{т.р}^2\right)^{\frac{1}{k-1}} =$
13	$\pi_{т.макс}^* = \left[\pi_{т.р}^* \frac{0,9}{q(\lambda_{т.р})}\right]^{1,1} =$
14	– если $\bar{\lambda}_u \geq 0,5$ , то $y_{опт}^* = y_{опт.р}^* [0,91 + 0,72(\bar{\lambda}_u - 0,5)^3] =$ – если $\bar{\lambda}_u < 0,5$ , то $y_{опт}^* = 0,91 y_{опт.р}^* =$
15	– если $\bar{\lambda}_u \geq 1$ , то $\bar{\eta}_{т.макс}^* = 1 + 0,03(\bar{\lambda}_u - 1) =$ ; – если $\bar{\lambda}_u < 1$ , то $\bar{\eta}_{т.макс}^* = 1 - \left[0,1 + 0,18(\pi_{т.р}^{*0,4} - 1,44)\right](1 - \bar{\lambda}_u) =$ ; – если $\bar{\lambda}_u < 0,5$ , то $\bar{\eta}_{т.макс}^* = 1 - \left[0,1 + 0,18(\pi_{т.р}^{*0,4} - 1,44)\right]0,5 =$
16	$\eta_{т.макс}^* = \bar{\eta}_{т.макс}^* \cdot \eta_{т.макс.р}^* =$

17	$\pi_T^*$								
18	$e_T^* = (\pi_T^*)^{\frac{k-1}{k}}$								
19	$y^* = \lambda_u \sqrt{z} \sqrt{\frac{k-1}{k+1} \frac{e_T^*}{e_T^* - 1}}$								
20	$\bar{y}^* = \frac{y^*}{y_{\text{опт}}^*}$								
21	$\bar{\eta}_T^*$ (Определить по значению $\bar{y}^*$ , рис. 3.6)								
22	$\eta_T^* = \eta_{T \max}^* \bar{\eta}_T^*$								
23	$x = \frac{\pi_T^* - 1}{\pi_{T, \text{кр}}^* - 1}$								
24	$\bar{G}_z$ (Определить по значению $x$ , рис. 3.7)								
25	$G_z = G_{z \text{ p}} \frac{\bar{G}_z}{\bar{G}_{z \text{ p}}}$								
26	$\frac{L_T}{T_T^*} = c_p \left(1 - \frac{1}{e_T^*}\right) \eta_T^*$ где $c_p = 1246,3$ Дж/кг·К)								
27	$\left(\frac{L_T}{T_T^*}\right) / \left(\frac{L_{T, \text{p}}}{T_{T, \text{p}}^*}\right)$								
28	$y_{90 \text{ p}}^* = 70 \cdot y_p^* / (\alpha_{T, \text{p}} - 20^\circ)$								
29	если $\bar{\lambda}_u > 0,5$ , то $\bar{y}_{90}^* = 0,95 + 0,2(\bar{\lambda}_u - 0,5)^2 =$ если $\bar{\lambda}_u \leq 0,5$ , то $\bar{y}_{90}^* = 0,95$								
30	$y_{90}^* = \bar{y}_{90}^* \cdot y_{90 \text{ p}}^* =$								
31	$y = y^* / y_{90}^*$								
32	$\alpha_T = 90^\circ + 70^\circ \left(\frac{y^*}{y_{90}^*} - 1\right) =,$ если $y \leq 1,6$ $\alpha_T = 138^\circ + 76,8^\circ \left(0,625 - \frac{y_{90}^*}{y^*}\right)$ если $y > 1,6$								

Заключительным этапом этого практического занятия является построение следующих характеристик турбины (по типу рис. 3.8):

- $\eta_T^* = f(\pi_T^*)$ ;
- $\left(\frac{L_T}{T_T^*}\right) / \left(\frac{L_{T,p}}{T_{T,p}^*}\right) = f(\pi_T^*)$ ;
- $G_Z = f(\pi_T^*)$ ;
- $\alpha_T = f(\pi_T^*)$ ;

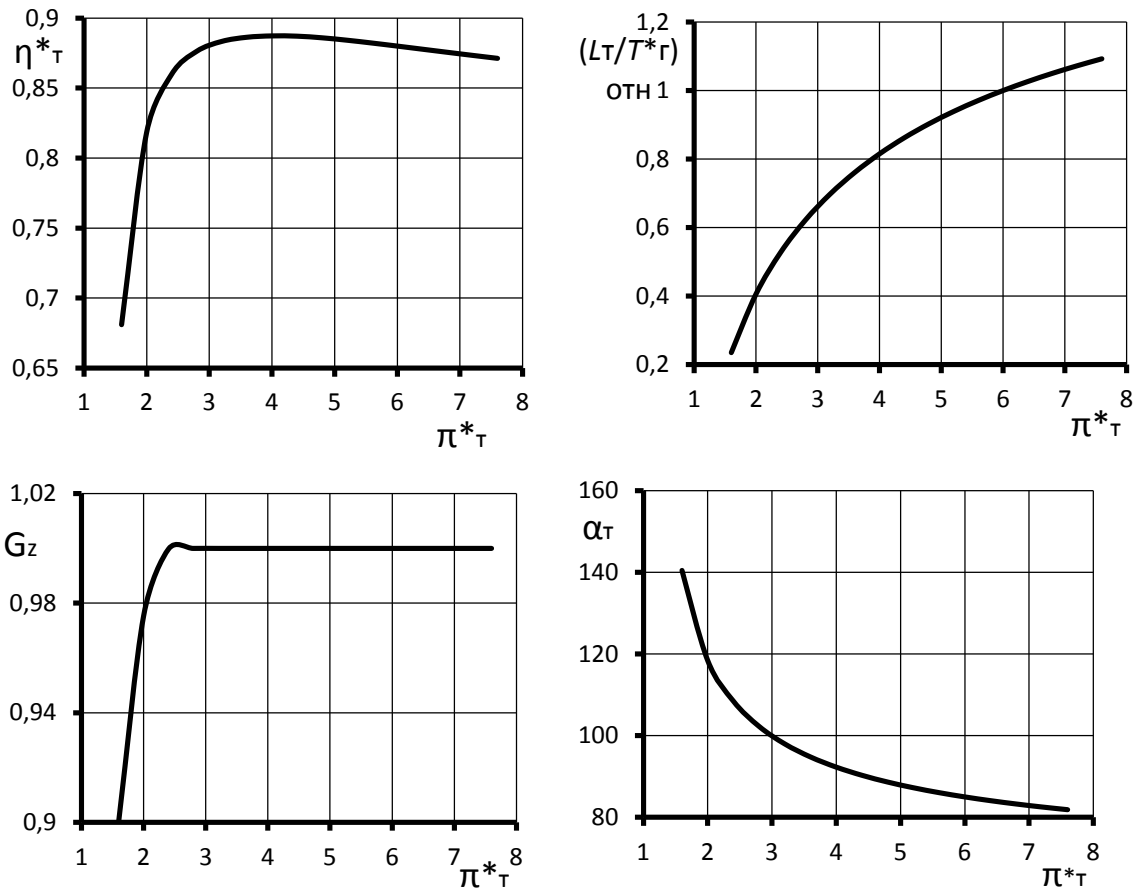


Рис. 3.8. Характеристика турбины

### Расчет положения рабочей линии на характеристике КВД ТРДДсм

Для расчета характеристик ГГ необходимо определить положение рабочей линии на характеристике КВД, т.е. геометрическое место точек, удовлетворяющих условию совместной работы элементов ГГ (КВД, камеры сгорания и турбины высокого давления) во всем диапазоне изменения  $\bar{n}_{ВД.пр}$ .

Условия совместной работы КВД, камеры сгорания и турбины высокого давления (ТВД) в системе газогенератора выражаются следующими уравнениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi_{кВД}^*}{q(\lambda_{вВД})} = A \sqrt{\frac{T_{Г}^*}{T_{вВД}^*}}; \\ \frac{\pi_{кВД}^*}{q(\lambda_{вВД})} = C \sqrt{\frac{\pi_{кВД}^{* \frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{кВД}^*}}. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi_{кВД}^*}{q(\lambda_{вВД})} = A \sqrt{\frac{T_{Г}^*}{T_{вВД}^*}}; \\ \frac{\pi_{кВД}^*}{q(\lambda_{вВД})} = C \sqrt{\frac{\pi_{кВД}^{* \frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{кВД}^*}}. \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Первое из этих уравнений (4.1) следует из баланса расходов воздуха и газа через КВД, камеру сгорания и ТВД, а второе – из условия совместного решения уравнения баланса расходов и баланса работ КВД и ТВД.

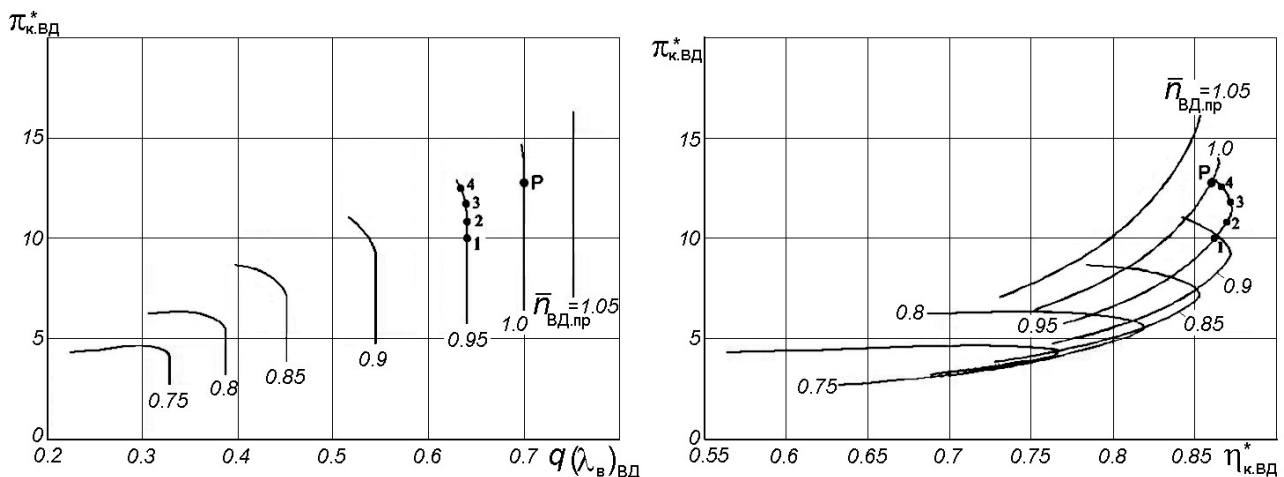


Рис. 4.1. Выбор точек на характеристике КВД для  $\bar{n}_{ВД.пр} = 0.95$

Расчет положения рабочей точки на характеристике КВД выполняется в следующей последовательности.

1. На расчетном режиме КВД определяется значение константы  $C$  в формуле (4.2), обозначим её символом  $C_0$ . Из формулы (4.2) следует, что



$$C_0 = \frac{\pi_{\text{квд,р}}^*}{q(\lambda_{\text{ввд,р}})} / \sqrt{\frac{\pi_{\text{квд,р}}^* \frac{k-1}{k} - 1}{\eta_{\text{квд,р}}^*}} \quad (4.3)$$

Расчетные параметры КВД, входящие в формулу 4.3, следует определить из характеристики КВД (рис. 4.1) на расчетном режиме его работы (т.е. при  $\bar{n}_{\text{вд,р}} = 1,0$ ). Расчетный режим КВД на этом рисунке обозначен точкой «Р».

Однако точнее эти же параметры можно определить из характеристики КВД, представленной в табличной форме (см. табл.4.1). Ниже приведен пример такой характеристики, в котором данные КВД на расчетном режиме (т.е. при  $\bar{n}_{\text{вд,р}} = 1,0$ ) подчеркнуты (см. верхнюю часть этой характеристики).

Таблица 4.1

## Характеристика КВД в табличном виде

<b><u>Пи*=13.539 Q(L)B=0.700 КПД*=0.860 Дельта КУ=15.0%</u></b>								
Uк,м/с=400.0 Uкпр,м/с=361.0 Q(LK)=0.406 Fв/Fк=5.192								
N пр =0.75	Q(LB)	0.222	0.248	0.294	0.319	0.323	0.323	0.323
Пи*		4.410	4.513	4.778	4.551	4.030	3.403	2.776
КПД*		0.557	0.608	0.714	0.761	0.750	0.705	0.632
N пр =0.80	Q(LB)	0.304	0.339	0.367	0.383	0.384	0.384	0.384
Пи*		6.482	6.584	6.345	5.788	5.018	4.189	3.359
КПД*		0.683	0.746	0.795	0.816	0.796	0.757	0.689
N пр =0.85	Q(LB)	0.397	0.422	0.441	0.449	0.449	0.449	0.449
Пи*		9.084	8.773	8.112	7.175	6.162	5.087	4.011
КПД*		0.784	0.820	0.845	0.849	0.828	0.792	0.730
N пр =0.90	Q(LB)	0.516	0.531	0.542	0.543	0.543	0.543	0.543
Пи*		11.642	10.917	9.896	8.665	7.488	6.237	4.986
КПД*		0.842	0.860	0.871	0.863	0.845	0.815	0.764
<b><u>N пр =0.95 Q(LB) 0.629 0.638 0.639 0.639 0.639 0.639 0.639 0.639</u></b>								
<b><u>Пи* 13.652 12.651 11.343 9.998 8.732 7.387 6.042</u></b>								
<b><u>КПД* 0.863 0.871 0.869 0.857 0.840 0.813 0.771</u></b>								
N пр =1.00	Q(LB)	0.698	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700
Пи*		15.523	14.235	12.723	11.210	9.787	8.275	6.762
КПД*		0.862	0.864	0.854	0.840	0.822	0.794	0.753
N пр =1.05	Q(LB)	0.752	0.752	0.752	0.752	0.752	0.752	0.752
Пи*		17.297	15.802	14.108	12.414	10.819	9.125	7.431
КПД*		0.853	0.848	0.837	0.821	0.802	0.773	0.731

2. На напорной кривой характеристики КВД, соответствующей выбранной приведенной частоте вращения, например при  $\bar{n}_{\text{ВД.пр}}=0,95$  (рис. 4.1), необходимо выбрать 3...4 точки, для каждой из которых определить соответствующие значения  $\pi_{\text{КВД}}^*$ ,  $q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}}$ ,  $\eta_{\text{КВД}}^*$  и по ним вычислить константу  $C$  по следующей формуле

$$C = \frac{\pi_{\text{КВД}}^*}{q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}}} \bigg/ \sqrt{\left( \pi_{\text{КВД}}^{* \frac{k-1}{k}} - 1 \right)} \bigg/ \eta_{\text{КВД}}^* \quad (4.4)$$

Однако удобнее для вычисления константы  $C$  необходимые значения  $\pi_{\text{КВД}}^*$ ,  $q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}}$ ,  $\eta_{\text{КВД}}^*$  также определить из приведенной выше характеристики КВД в табличной форме. Необходимые данные внизу этой таблицы, например, при  $\bar{n}_{\text{ВД.пр}}=0,95$  также подчеркнуты.

Результаты расчета значений константы  $C$  сводятся в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Параметры	№ точки на напорной ветке КВД при $\bar{n}_{\text{ВД.пр}}=0,95$						
	1	2	3	4	5	6	7
$\pi_{\text{КВД}}^*$							
$q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}}$							
$\eta_{\text{КВД}}^*$							
$C = \frac{\pi_{\text{КВД}}^*}{q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}}} \bigg/ \sqrt{\left( \pi_{\text{КВД}}^{* \frac{k-1}{k}} - 1 \right)} \bigg/ \eta_{\text{КВД}}^*$							

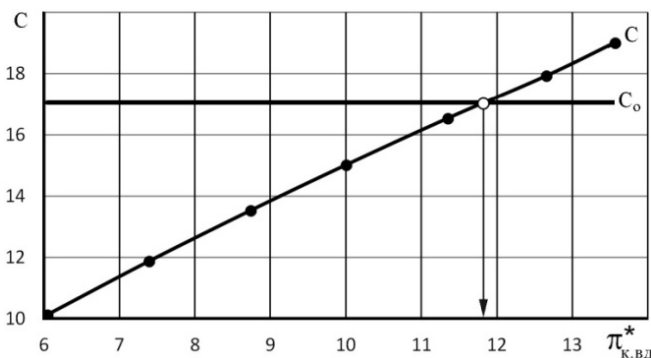


Рис. 4.2. К определению положения рабочей точки на характеристике КВД

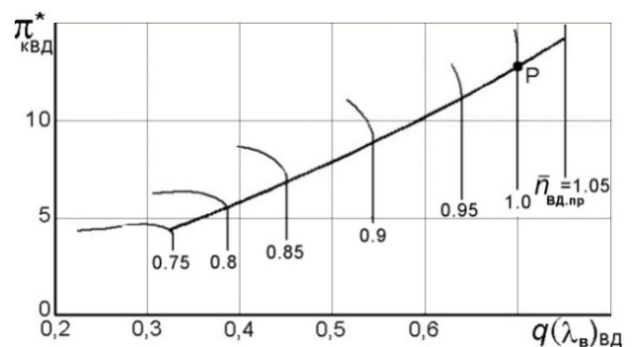


Рис. 4.3. Рабочая линия на характеристике КВД

3. По данным табл. 4.2 строится график зависимости  $C = f(\pi_{\text{КВД}}^*)$ , показанный на рис. 4.2. Пересечение на нем горизонтальной линии, соответствующей значению  $C_0$ , с линией  $C = f(\pi_{\text{КВД}}^*)$  определяет значение  $\pi_{\text{КВД}}^*$ , т.е. положение рабочей точки на напорной ветке КВД при  $\bar{n}_{\text{ВД.пр}}=0,95$ . Затем по характе-

ристике КВД (рис. 4.1) определяется значение  $q(\lambda_v)_{ВД}$  и  $\eta^*_{кВД}$ , соответствующее этой рабочей точке.

Для построения рабочей линии на характеристике КВД (рис. 4.3) указанные выше расчеты следует повторить при других значениях  $\bar{n}_{ВД.пр}$  и соединить полученные рабочие точки.

## Практическое занятие № 5

### Расчет характеристик газогенератора и турбокомпрессорного модуля ТРДДсм

Турбокомпрессорным модулем (ТКМ) ТРДДсм называется совокупность турбовентилятора (т.е. КНД и ТНД) и газогенератора. В ТКМ ТРДДсм также включают (условно) и камеру смешения.

#### 5.1. Расчет параметров газогенератора ТРДДсм

После определения значений  $\pi_{квд}^*$  и  $q(\lambda_v)_{вд}$  на рабочей линии при любых  $\bar{n}_{вд.пр}$  следует определить соответствующие значения  $\pi_{гг}^*$ ,  $\tau_{гг}^*$  и  $\Delta_{гг}^*$  при этих же  $\bar{n}_{вд.пр}$  в следующей последовательности.

1. При принятом допущении о постоянстве  $\pi_{твд}^*$  степень повышения давления в газогенераторе  $\pi_{гг}^* = p_{твд}^* / p_{ввд}^* = \pi_{квд}^* \sigma_{квд} / \pi_{твд}^* = \text{const} \pi_{квд}^*$  оказывается пропорциональной  $\pi_{квд}^*$ . Тогда

$$\pi_{гг}^* = \pi_{гг.р}^* \frac{\pi_{квд}^*}{\pi_{квд.р}^*}. \quad (5.1)$$

Здесь и ниже индекс «р» относится к расчетному режиму работы двигателя. Параметры ГГ ( $\pi_{гг.р}^*$ ,  $\Delta_{гг.р}^*$  и  $\tau_{гг.р}^*$ ), соответствующие этому режиму, были рассчитаны в процессе газодинамического расчета двигателя, а значения  $\pi_{квд.р}^*$  и  $q(\lambda_v)_{вд.р}$  определяются из характеристики КВД в точке «Р» при  $\bar{n}_{вд.пр} = 1,0$  (рис. 4.3).

2. Из уравнения баланса расходов воздуха и газа через КВД, камеру сгорания и ТВД

$$\frac{\pi_{квд}^*}{q(\lambda_v)_{вд}} = \text{const} \sqrt{\frac{T_{г}^*}{T_{ввд}^*}} = \text{const} \sqrt{\Delta_{гг}^*}$$

следует, что степень подогрева рабочего тела в газогенераторе  $\Delta_{гг}^* = T_{г}^* / T_{ввд}^*$  при изменении частоты вращения КВД изменяется пропорционально  $[\pi_{квд}^* / q(\lambda_v)_{вд}]^2$ . Следовательно

$$\Delta_{гг}^* = \Delta_{гг.р}^* \left( \frac{\pi_{квд}^*}{\pi_{квд.р}^*} \right)^2 \left( \frac{q(\lambda_v)_{вд.р}}{q(\lambda_v)_{вд}} \right)^2. \quad (5.2)$$

3. Степень повышения температуры в ГГ

$$\tau_{гг}^* = \frac{T_{твд}^*}{T_{ввд}^*} = \frac{T_{г}^*}{T_{ввд}^* T_{г}^* / T_{твд}^*} = \frac{\Delta_{гг}^*}{\pi_{твд}^* \frac{n-1}{n}} = \text{const} \Delta_{гг}^*,$$

где  $n$  – показатель политропы процесса расширения газа в ТВД, а  $\pi_{твд}^* = \text{const}$ .

Тогда 
$$\tau_{\Gamma\Gamma}^* = \tau_{\Gamma\Gamma.p}^* \Delta_{\Gamma\Gamma}^* / \Delta_{\Gamma\Gamma.p}^* \tag{5.3}$$

Формулы (5.1), (5.2) и (5.3) позволяют рассчитать  $\pi_{\Gamma\Gamma}^*$ ,  $\tau_{\Gamma\Gamma}^*$  и  $\Delta_{\Gamma\Gamma}^*$  во всем диапазоне  $\bar{n}_{ВД.пр}$  (рис. 5.1), используя вычисленные ранее  $\pi_{\Gamma\Gamma.p}^*$ ,  $\tau_{\Gamma\Gamma.p}^*$  и  $\Delta_{\Gamma\Gamma.p}^*$ . Кроме  $\pi_{\Gamma\Gamma}^*$ ,  $\tau_{\Gamma\Gamma}^*$  и  $\Delta_{\Gamma\Gamma}^*$ , к параметрам ГГ относятся приведенный расход воздуха  $G_{в.пр}$  и топлива  $G_{т.пр}$ .

При расчете характеристик ГГ параметры КВД при различных значениях  $\bar{n}_{ВД.пр}$  определяются в точках на рабочей линии КВД (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1

$\bar{n}_{ВД.пр}$	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05
$\pi_{кВД}^*$							
$q(\lambda_{в})_{ВД}$							

Порядок расчета характеристик газогенератора приведен в табл. 5.2

Таблица 5.2

Исходные данные									
$\pi_{\Gamma\Gamma.p}^* =$ ; $\Delta_{\Gamma\Gamma.p}^* =$ ; $\tau_{\Gamma\Gamma.p}^* =$ ; $\pi_{кВД.p}^* =$ ; $q(\lambda_{в})_{ВД.p} =$ ;									
1	$\bar{n}_{ВД.пр}$	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0	1,05	
2	$\pi_{кВД}^*$ – определяется из табл. 5.1								
3	$q(\lambda_{в})_{ВД}$ – определяется из табл. 5.1								
4	$\pi_{\Gamma\Gamma}^* = \pi_{\Gamma\Gamma.p}^* \pi_{кВД}^* / \pi_{кВД.p}^*$								
5	$\Delta_{\Gamma\Gamma}^* = \Delta_{\Gamma\Gamma.p}^* \left( \frac{\pi_{кВД}^*}{\pi_{кВД.p}^*} \right)^2 \left( \frac{q(\lambda_{в})_{ВД.p}}{q(\lambda_{в})_{ВД}} \right)^2$								
6	$\tau_{\Gamma\Gamma}^* = \tau_{\Gamma\Gamma.p}^* \Delta_{\Gamma\Gamma}^* / \Delta_{\Gamma\Gamma.p}^*$								

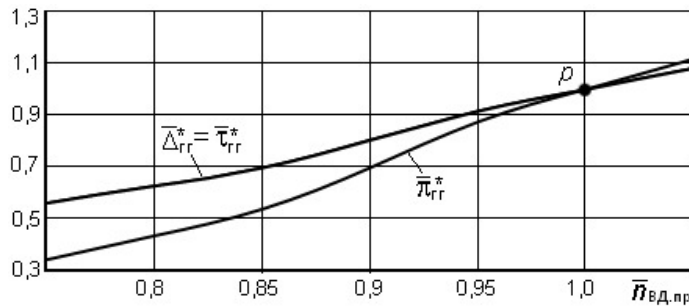


Рис. 5.1. Характеристика газогенератора в относительном виде

## 5.2. Определение режимов совместной работы элементов турбокомпрессорного модуля ТРДДСм

Рассмотрим порядок расчета совместной работы элементов ТКМ ТРДДСм при условии, что его сопло не регулируется, т.е.  $F_{кр} = \text{const}$ , а перепад давления в сопле выше критического. При этих условиях безразмерная скорость (число  $\lambda$ ) на выходе из камеры смешения остается неизменной т.е.

$$\lambda_{см} = \text{const} \quad \text{или} \quad q(\lambda_{см}) = \text{const}.$$

Для определения режимов совместной работы элементов ТКМ вначале необходимо определить степень двухконтурности двигателя  $m$  на различных режимах работы двигателя. Однако непосредственно определить её с помощью математических зависимостей не удастся. Поэтому используется графический метод определения  $m$ . Ниже, в табл. 5.3, приведен алгоритм расчетов для графического определения значения  $m$  двигателя с одновальным газогенератором при одном значении приведенной частоты вращения КВД (например, при  $\bar{n}_{ВД.пр} = 0,95$ ).

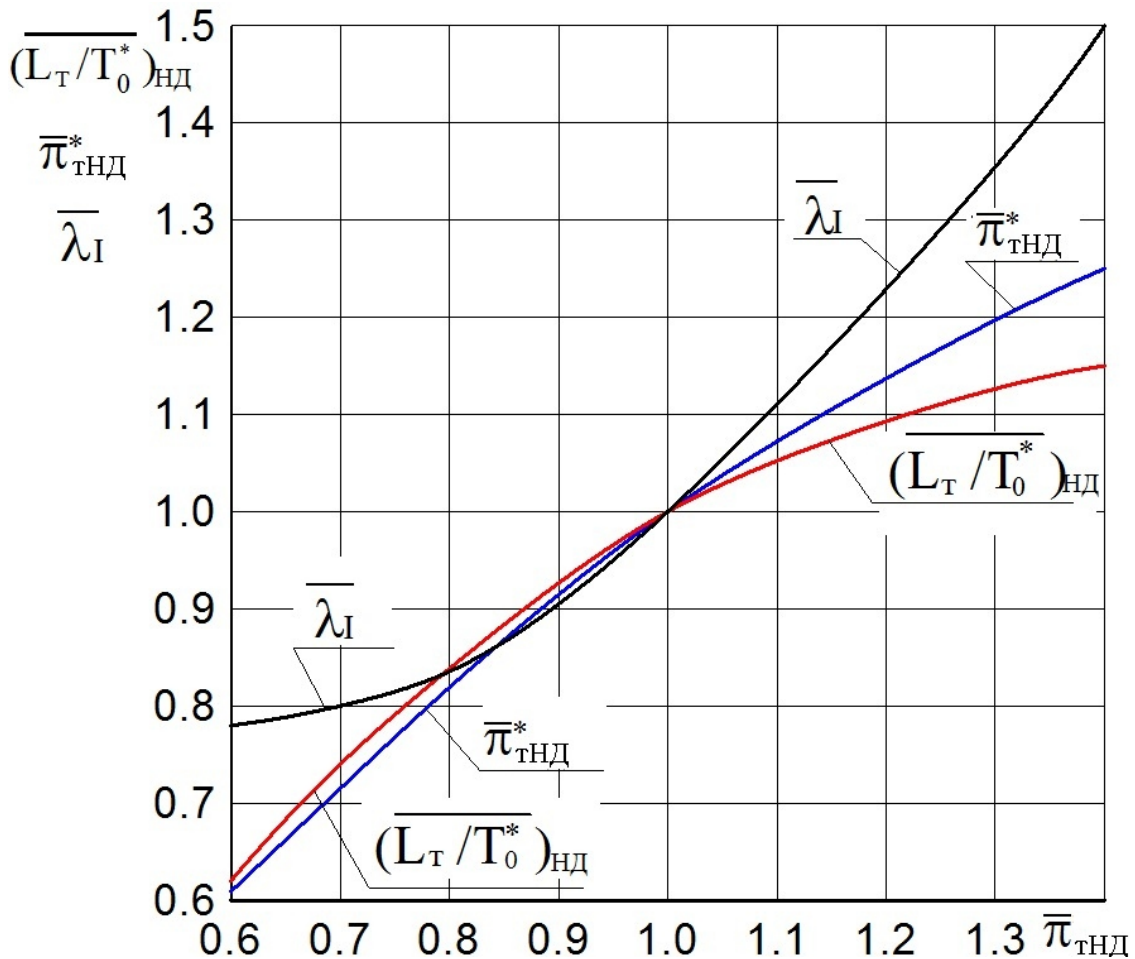


Рис. 5.2. Типовая характеристика ТНД  
(в относительных параметрах)

Таблица 5.3

Исходные данные:		
	$\lambda_{Iр} =$ ; $\left(\frac{\Delta T^*}{T_0^*}\right)_{\text{нд,р}} =$ ; $\sigma_{II} =$ ; $\bar{F}_{II} =$ ;	
	$B_1 =$ ; $B_2 =$ ; $B_3 =$ ;	
1	$\bar{n}_{\text{ВД,пр}}$	0,95
2	$\pi_{\text{ГГ}}^*$ – определить по характеристике ГГ (табл. 5.2) при $\bar{n}_{\text{ВД,пр}}=0,95$	
3	$\tau_{\text{ГГ}}^*$ – определить по характеристике ГГ (табл. 5.2) при $\bar{n}_{\text{ВД,пр}}=0,95$	
4	$q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}}$ – определить по характеристике ГГ (табл. 5.2) при $\bar{n}_{\text{ВД,пр}}=0,95$	
5	$m$	
6	$q(\lambda_{II}) = B_2 m q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}}$ – определяется из баланса расходов через наружный контур и КВД	
7	$\lambda_{II}$ – определить из рис. 5.11 при значении $q(\lambda_{II})$ из пункта 6	
8	$\Pi(\lambda_{II}) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_{II}^2\right)^{\frac{k}{k-1}}$	
9	$\bar{\pi}_{\text{ТНД}} = B_1 \frac{\pi_{\text{ГГ}}^*}{\Pi(\lambda_{II})}$	
10	$\bar{\lambda}_I = f(\bar{\pi}_{\text{ТНД}})$ – определить по характеристике ТНД, рис. 5.2	
11	$\lambda_I = \lambda_{Iр} \bar{\lambda}_I$	
12	$\Pi(\lambda_I) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_I^2\right)^{\frac{k}{k-1}}$	
13	$\frac{p_{\text{Т}}^*}{p_{II}^*} = \frac{\Pi(\lambda_{II})}{\Pi(\lambda_I)}$ – определяется из условия $p_I = p_{II}$	
14	$(L_{\text{Т}}/T_0^*)_{\text{нд}} = f(\bar{\pi}_{\text{ТНД}})$ – определить по характеристике ТНД, рис. 5.2	
15	$\left(\frac{\Delta T^*}{T_0^*}\right)_{\text{нд}} = \left(\frac{\Delta T^*}{T_0^*}\right)_{\text{нд,р}} (L_{\text{Т}}/T_0^*)_{\text{нд}}$	
16	$\tau_{\text{ТНД}}^* = 1 / \left(1 - \left(\frac{\Delta T^*}{T_0^*}\right)_{\text{нд}}\right)$	
17	$\frac{T_{\text{Т}}^*}{T_{\text{ВВД}}^*} = \frac{\tau_{\text{ГГ}}^*}{\tau_{\text{ТНД}}^*}$	
18	$\frac{T_{\text{СМ}}^*}{T_{\text{ВВД}}^*} = \frac{T_{\text{Т}}^* + m}{T_{\text{ВВД}}^* + m}$ – определяется из формулы для $T_{\text{СМ}}^*$	
19	$\frac{p_{\text{СМ}}^*}{p_{\text{ВВД}}^*} = \sigma_{II} \frac{p_{\text{Т}}^* + \bar{F}_{II}}{p_{II}^* + \bar{F}_{II}}$ – определяется из формулы для $p_{\text{СМ}}^*$	
20	$q(\lambda_{\text{СМ}}) = B_3 (1 + m) q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}} \frac{p_{\text{ВВД}}^*}{p_{\text{СМ}}^*} \sqrt{\frac{T_{\text{СМ}}^*}{T_{\text{ВВД}}^*}}$	

После определения степени двухконтурности  $m$  становится возможным определить положение рабочей линии на характеристике КНД и, в конечном итоге, рассчитать характеристики турбокомпрессорного модуля (ТКМ).

Для определения  $m$  вначале следует вычислить константы  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$ , необходимые для дальнейших расчетов. Они вычисляются с использованием параметров двигателя и его модулей на расчетном режиме.

$$B_1 = \frac{p(\lambda_{II})_p}{\pi_{гг.p}^*}; \quad B_2 = \frac{q(\lambda_{II})_p}{m_p q(\lambda_{в})_{ВД,p}}; \quad B_3 = \frac{q(\lambda_{см})_p}{(1+m_p)q(\lambda_{в})_{ВД,p}} \left( \frac{p_{см}^*}{p_{вВД}^*} \right)_p \sqrt{\left( \frac{T_{вВД}^*}{T_{см}^*} \right)_p}$$

Далее из табл. 5.2 необходимо определить по характеристике ГГ значения  $\pi_{гг}^*$ ,  $\tau_{гг}^*$  и  $q(\lambda_{в})_{ВД}$ , соответствующие данному значению  $\bar{n}_{ВД,пр} = 0,95$ . После этого следует задаться несколькими значениями степени двухконтурности  $m$  и для каждой из них определить соответствующее значение  $q(\lambda_{см})$ . Затем, сопоставив его со значением  $\lambda_{см}$  на расчетном режиме работы двигателя, определить истинное значение  $m$  при  $q(\lambda_{см}) = q(\lambda_{см})_p$ .

Порядок расчетов для определения режимов совместной работы элементов турбокомпрессорного модуля ТРДДсм представлен в табл. 5.3.

Если при каком-либо из выбранных значений  $m$  величина  $q(\lambda_{II})$  в 6-ой строке табл. 5.3 окажется больше единицы (что физически невозможно), то дальнейший расчет при таком значении  $m$  следует прекратить.

По результатам расчета строится график  $q(\lambda_{см}) = f(m)$  (рис. 5.3) и по нему находится искомое значение  $m$ , при котором  $q(\lambda_{см}) = q(\lambda_{см})_p$ .

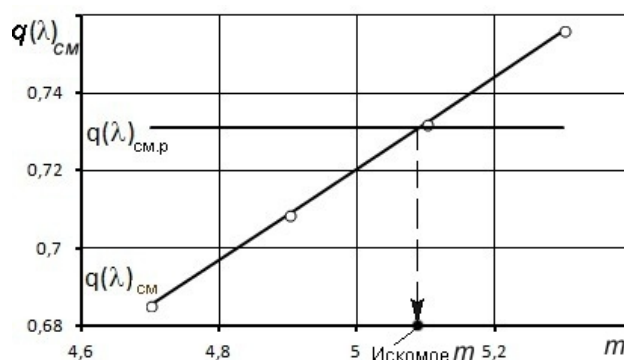


Рис. 5.3. К определению режимов совместной работы элементов ТКМ в ТРДДсм при  $\lambda_{см} = \text{const}$ .

По найденному таким путем значению  $m$  дальнейший расчет ведется следующим образом. Определяется относительная плотность тока на выходе из КНД из условия, что  $G_{кнд} = G_{вI} + G_{вII} = G_{вI}(1 + m)$ . Записав расходы воздуха на выходе из КНД и на входе в КВД через газодинамические параметры и учитывая, что  $p_{кнд}^* = p_{вВД}^*$ , а  $T_{кнд}^* = T_{вВД}^*$ , получим



$$q(\lambda_k)_{\text{КНД}} = \frac{F_{\text{ВВД}}}{F_{\text{КНД}}} (1 + m) q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}} = \text{const}(1 + m) q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}}$$

ИЛИ

$$q(\lambda_k)_{\text{КНД}} = q(\lambda_k)_{\text{КНД,р}} \frac{1+m}{1+m_p} \frac{q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД}}}{q(\lambda_{\text{в}})_{\text{ВД,р}}}.$$

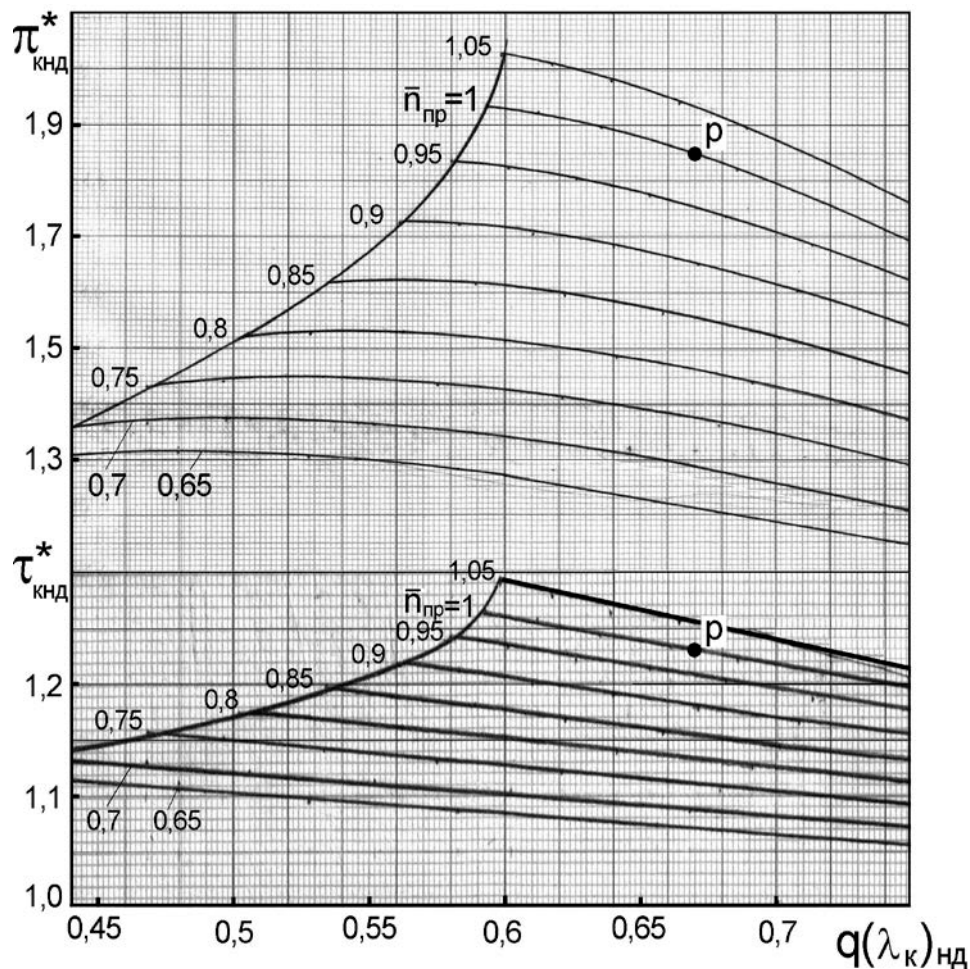


Рис. 5.4. Характеристика КНД в преобразованных координатах

Далее определяется степень повышения температуры в КНД  $\tau_{\text{КНД}}^*$  из условия баланса мощностей ТНД и КНД, который имеет вид

$$N_{\text{КНД}} = N_{\text{ТНД}} \eta_{\text{м}}, \text{ или } G_{\text{в}} c_p T_{\text{в}}^* (\tau_{\text{КНД}}^* - 1) = G_{\text{г.ТНД}} T_{\text{ТВД}}^* \frac{L_{\text{ТНД}}}{T_{\text{ТВД}}^*} \eta_{\text{м}},$$

где  $\eta_{\text{м}}$  – механический КПД.

Учитывая, что  $G_{\text{в}} = G_{\text{вI}}(1 + m)$ ,  $T_{\text{ТВД}}^* = T_{\text{в}}^* \tau_{\text{КНД}}^* \tau_{\text{ГГ}}^*$ , и полагая, что  $\frac{G_{\text{г.ТНД}}}{G_{\text{вI}}} = \text{const}$ , а также обозначив  $L_{\text{ТНД}} = L_{\text{Т}}$  и  $T_{\text{ТВД}}^* = T_0^*$ , где  $T_0^*$  – температура газа на входе в ТНД, получим

$$(1 + m)(\tau_{\text{КНД}}^* - 1) = \text{const} \tau_{\text{КНД}}^* \tau_{\text{ГГ}}^* \left( \frac{L_{\text{Т}}}{T_0^*} \right)_{\text{НД}}.$$

Записав это равенство также и для расчетного режима двигателя и разделив их друг на друга, определим  $\tau_{\text{кнд}}^*$  в следующем виде

$$\tau_{\text{кнд}}^* = 1 / \left[ 1 - \frac{\tau_{\text{гг}}^* (\overline{L_T/T_0^*})_{\text{нд}}}{B_0(1+m)} \right],$$

где  $(\overline{L_T/T_0^*})_{\text{нд}} = (L_T/T_0^*)_{\text{нд}} / (L_T/T_0^*)_{\text{нд,р}}$ , а  $B_0 = \frac{\tau_{\text{кнд,р}}^* \tau_{\text{гг,р}}^*}{(\tau_{\text{кнд,р}}^* - 1)(1+m_p)}$  – константа.

Затем по характеристике КНД, построенной в преобразованных координатах, т.е. в виде зависимости  $\tau_{\text{кнд}}^* = f[\bar{n}_{\text{нд,пр}}, q(\lambda_{\text{к}})_{\text{нд}}]$  (рис. 5.4), находится режим работы КНД, т.е.  $\bar{n}_{\text{нд,пр}}$  и  $\pi_{\text{кнд}}^*$ , а по характеристике в обычных координатах (рис. 5.5) находится  $q(\lambda_{\text{в}})$ .

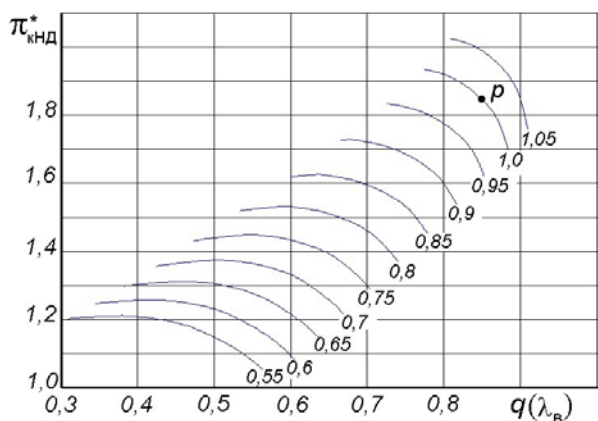


Рис. 5.5. Характеристика КНД в обычных координатах

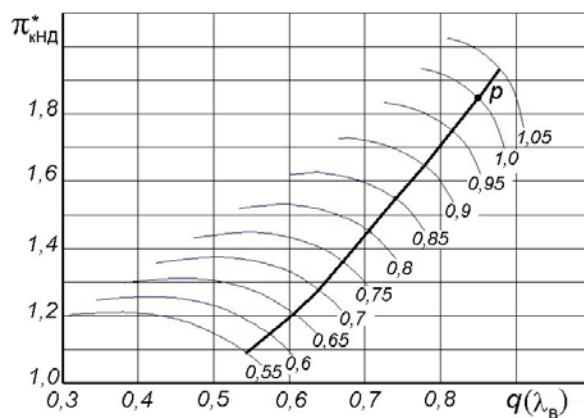


Рис. 5.6. Рабочая линия на характеристике КНД

Повторяя приведенные выше расчеты при различных  $\bar{n}_{\text{вд,пр}}$ , можно построить рабочую линию на характеристике КНД (рис. 5.6) и определить все его параметры при различных  $\bar{n}_{\text{нд,пр}}$  в точках этой линии.

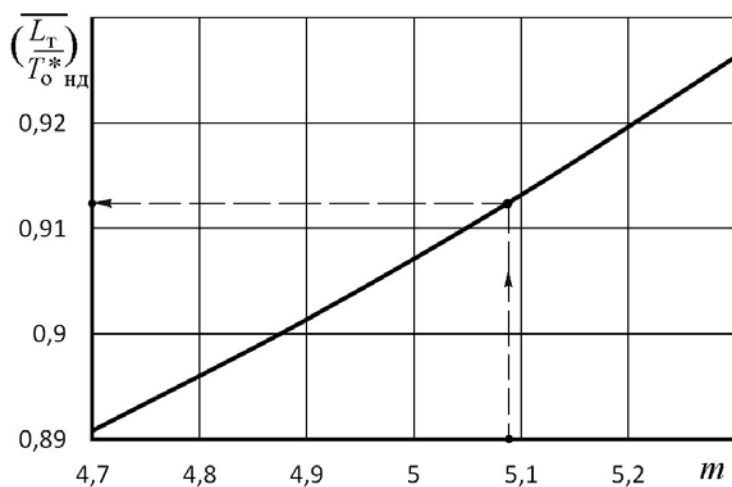


Рис. 5.7. Порядок определения  $(\overline{L_T/T_0^*})_{\text{нд}}$

Порядок расчета положения рабочей точки на характеристике КНД при одном значении  $\bar{n}_{ВД.пр}$ , например при  $\bar{n}_{ВД.пр}=0,95$ , изложен в табл. 5.4. Для проведения этих расчетов вначале следует, используя данные табл. 5.3, построить график зависимости  $(\bar{L}_T/T_0^*)_{НД} = f(m)$  (рис. 5.7) и по определенному ранее с помощью рис. 5.3 искомому значению  $m$  определить параметр  $(\bar{L}_T/T_0^*)_{НД}$ .

Таблица 5.4

## Порядок определения параметров КНД в рабочей точке

Исходные данные:		
	$m_p =$	$q(\lambda_k)_{НД.р} =$
	$q(\lambda_v)_{ВД.р} =$	$\tau_{кНД.р}^* =$
	$\tau_{гг.р}^* =$	
1	$\bar{n}_{ВД.пр}$	0,95
2	$q(\lambda_v)_{ВД}$ – определить из табл. 5.2 при $\bar{n}_{ВД.пр}=0,95$	
3	$m$ – определить из рис. 5.3	
4	$q(\lambda_k)_{НД} = q(\lambda_k)_{НД.р} \frac{1+m}{1+m_p} \frac{q(\lambda_v)_{ВД}}{q(\lambda_v)_{ВД.р}}$	
5	$(\bar{L}_T/T_0^*)_{НД}$ – определить из рис. 5.7 по значению $m$ из пункта 3	
6	$B_0 = \frac{\tau_{кНД.р}^* \tau_{гг.р}^*}{(\tau_{кНД.р}^* - 1)(1 + m_p)}$	
7	$\tau_{гг}^*$ – определить из табл. 5.2 при $\bar{n}_{ВД.пр}=0,95$	
8	$\tau_{кНД}^* = 1 / \left[ 1 - \frac{\tau_{гг}^* (\bar{L}_T/T_0^*)_{НД}}{B_0 (1 + m)} \right]$	
9	$\bar{n}_{НД.пр}$ – определяется по характеристике КНД (рис. 5.4) по значениям $\tau_{кНД}^*$ и $q(\lambda_k)_{НД}$	
10	$\pi_{кНД}^*$ – определяется по характеристике КНД (рис. 5.4) по значениям $\tau_{кНД}^*$ и $q(\lambda_k)_{НД}$	
11	$q(\lambda_v)$ – определяется по характеристике КНД (рис. 5.5) по значениям $\pi_{кНД}^*$ и $\bar{n}_{НД.пр}$	

## 5.3. Расчет характеристик турбокомпрессорного модуля ТРДДсм

По результатам определения режимов совместной работы элементов турбокомпрессорного модуля ТРДДсм проводится расчет его характеристик, т.е. зависимостей его параметров (степени повышения давления  $\pi_{ТКМ}^*$  и температуры  $\tau_{ТКМ}^*$ , а также приведенных к входу в ТКМ расхода воздуха, топлива и др.) от режима его работы. При оговоренных выше допущениях режим работы ТКМ определяется только приведенной частотой вращения любого из его роторов, причем для последующего расчета эксплуатационных характеристик ТРДД целесообразно представлять характеристики ТКМ в виде зависимостей указанных

параметров ТКМ от приведенной частоты вращения компрессора (ротора) низкого давления  $\bar{n}_{\text{НД,пр}}$ .

**Характеристика ТКМ ТРДДсм** может быть определена с помощью следующих расчетных соотношений.

1. Степень повышения давления в ТКМ

$$\pi_{\text{ТКМ}}^* = p_{\text{см}}^* / p_{\text{в}}^*.$$

Осредненная по площади величина давления на выходе из камеры смешения равна (при  $\sigma_{\text{см}}=1$ )

$$p_{\text{см}}^* = \frac{(p_I^* + p_{II}^* \bar{F}_{II})}{(1 + \bar{F}_{II})},$$

где  $\bar{F}_{II} = F_{II}/F_I$ . Разделив обе части данного уравнения на  $p_{\text{в}}^*$ , получим

$$\pi_{\text{ТКМ}}^* = \pi_{\text{КНД}}^* \frac{\pi_{\text{ГГ}}^* / \pi_{\text{ТНД}}^* + \sigma_{II} \bar{F}_{II}}{(1 + \bar{F}_{II})}.$$

Значение  $\bar{F}_{II}$  было определено в ходе термодинамического расчета двигателя.

2. Степень повышения температуры в ТКМ

$$\tau_{\text{ТКМ}}^* = T_{\text{см}}^* / T_{\text{в}}^*.$$

Температура газа на выходе из камеры смешения равна

$$T_{\text{см}}^* = \frac{T_I^* + m T_{II}^*}{1 + m},$$

Разделив обе части данного уравнения на  $T_{\text{в}}^*$ , получим

$$\tau_{\text{ТКМ}}^* = \tau_{\text{КНД}}^* \frac{\tau_{\text{ГГ}}^* / \tau_{\text{ТНД}}^* + m}{1 + m}.$$

3. Приведенный расход воздуха

Так как приведенный расход воздуха через компрессор пропорционален  $q(\lambda_{\text{в}})$ , то

$$G_{\text{в,пр}} = G_{\text{в,пр,р}} \frac{q(\lambda_{\text{в}})}{q(\lambda_{\text{в}})_{\text{р}}}.$$

4. Приведенный часовой расход топлива

Для упрощения будем считать, что расход газа через сечение «см-см» (рис. 1.1) равен расходу воздуха через двигатель, т. е.  $G_{\text{см}} = G_{\text{в}}$ .

Тогда из уравнения сохранения энергии для сечений «в-в» и «см-см», пренебрегая затратами энергии на сжатие воздуха, отбираемого на самолетные нужды, имеем

$$Q = G_{\text{в}} c_{\text{п}} (T_{\text{см}}^* - T_{\text{в}}^*) = G_{\text{в}} c_{\text{п}} T_{\text{в}}^* (\tau_{\text{ТКМ}}^* - 1). \quad (5.4)$$

Здесь  $Q = G_{\text{т,ч}} H_u \eta_{\text{Г}} / 3600$  – количество теплоты, подведенной к воздуху в камере сгорания. Учитывая, что  $G_{\text{в}} = m_{\text{в}} \frac{p_{\text{в}}^*}{\sqrt{T_{\text{в}}^*}} F_{\text{в}} q(\lambda_{\text{в}})$ , из уравнения (5.4)

получим

$$G_{\text{т.ч}} = \frac{3600 m_{\text{в}} F_{\text{в}} c_{\text{п}}}{H_{\text{и}} \eta_{\text{г}}} p_{\text{в}}^* q(\lambda_{\text{в}}) \sqrt{T_{\text{в}}^*} (\tau_{\text{ТКМ}}^* - 1) = \text{const } p_{\text{в}}^* q(\lambda_{\text{в}}) \sqrt{T_{\text{в}}^*} (\tau_{\text{ТКМ}}^* - 1).$$

Тогда приведенный часовой расход топлива

$$G_{\text{т.ч.пр}} = G_{\text{т.ч}} \frac{101300}{p_{\text{в}}^*} \sqrt{\frac{288}{T_{\text{в}}^*}} = \text{const } q(\lambda_{\text{в}}) (\tau_{\text{ТКМ}}^* - 1). \quad (5.5)$$

Запишем выражение (5.5) для расчетного режима работы двигателя

$$G_{\text{т.ч.пр.р}} = \text{const } q(\lambda_{\text{в}})_{\text{р}} (\tau_{\text{ТКМ.р}}^* - 1). \quad (5.6)$$

Разделив (5.5) на (5.6), получим

$$G_{\text{т.ч.пр}} = G_{\text{т.ч.пр.р}} \frac{q(\lambda_{\text{в}}) (\tau_{\text{ТКМ}}^* - 1)}{q(\lambda_{\text{в}})_{\text{р}} (\tau_{\text{ТКМ.р}}^* - 1)},$$

где величины  $G_{\text{т.ч.пр.р}}$  и  $\tau_{\text{ТКМ.р}}^*$  были определены в ходе термодинамического расчета двигателя.

К характеристикам ТКМ относятся также зависимости от  $\bar{n}_{\text{ТНД.пр}}$  следующих величин, знание которых необходимо для определения эксплуатационных ограничений и программы регулирования двигателя.

5. Степень подогрева газа в ТКМ  $\Delta_{\text{ТКМ}}^* = T_{\text{г}}^* / T_{\text{в}}^*$ .

Ее можно определить, зная степень подогрева в газогенераторе и КНД,

т.е.

$$\Delta_{\text{ТКМ}}^* = \Delta_{\text{ГГ}}^* \tau_{\text{КНД}}^*.$$

6. Приведенная частота вращения КВД (для двухвального ТРДДсм):

абсолютная

$$n'_{\text{ВД.пр}} = n_{\text{ВД}} \sqrt{288 / T_{\text{в}}^*}$$

или относительная

$$\bar{n}'_{\text{ВД.пр}} = \bar{n}_{\text{ВД.пр}} \sqrt{\tau_{\text{КНД}}^* / \tau_{\text{КНД.р}}^*}.$$

Перед расчетом характеристик ТКМ с помощью табл. 5.5 необходимо по данным табл. 5.3 построить графики зависимостей  $\bar{\pi}_{\text{ТНД}} = f(m)$  и  $\tau_{\text{ТНД}}^* = f(m)$  (рис. 5.8 и 5.9). Далее по этим графикам следует определить значения  $\bar{\pi}_{\text{ТНД}}$  и  $\tau_{\text{ТНД}}^*$ , используя определенное из рис. 5.3 значение  $m$ , и записать их в табл. 5.5.

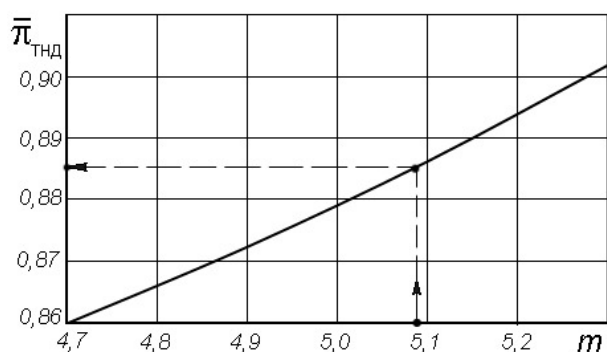


Рис. 5.8. Зависимость  $\bar{\pi}_{\text{ТНД}}$  от  $m$

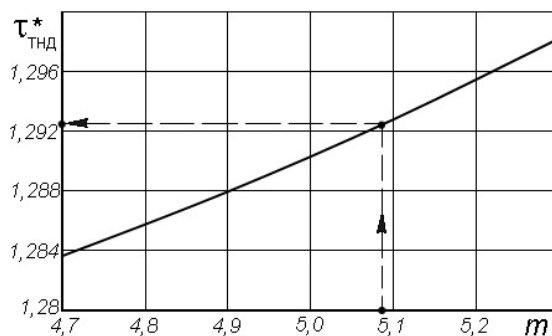


Рис. 5.9. Зависимость  $\tau_{\text{ТНД}}^*$  от  $m$

По результатам расчета строятся характеристики ТКМ. На рис. 5.10 они представлены в относительном виде. Здесь, например,  $\bar{\pi}_{\text{ТКМ}}^* = \pi_{\text{ТКМ}}^* / \pi_{\text{ТКМ.р}}^*$  и т.д.

С помощью этих характеристик определяются предельные режимы работы двигателя (строится линия предельных режимов работы), формируется программа регулирования двигателя и рассчитываются его характеристики.

Таблица 5.5

## Расчет параметров турбокомпрессорного модуля

Исходные данные:		
$\pi_{\text{тнд,р}}^* =$ ; $\sigma_{\text{II}} =$ ; $\bar{F}_{\text{II}} =$ ; $G_{\text{в.пр.р}} =$ ; $q(\lambda_{\text{в}})_{\text{р}} =$ ; $G_{\text{т.ч.пр.р}} =$ ; $\tau_{\text{ТКМ,р}}^* =$		
1	$\bar{n}_{\text{ВД,пр}}$	0,95
2	$\bar{n}_{\text{НД,пр}}$ – определить из табл. 5.4	
3	$\pi_{\text{кнд}}^*$ – определить из табл. 5.4	
4	$\pi_{\text{ГГ}}^*$ – определить из табл. 5.2 при значении $\bar{n}_{\text{ВД,пр}} = 0,95$	
5	$m$ – определить из рис. 5.3	
6	$\bar{\pi}_{\text{тнд}}$ – определить из рис. 5.8 при значении $m$ из пункта 5	
7	$\bar{\pi}_{\text{тнд}}^*$ – определить из рис. 5.2 при значении $\bar{\pi}_{\text{тнд}}$ из пункта 6	
8	$\pi_{\text{тнд}}^* = \bar{\pi}_{\text{тнд}}^* \pi_{\text{тнд,р}}^*$	
9	$\pi_{\text{ТКМ}}^* = \pi_{\text{кнд}}^* \frac{\pi_{\text{ГГ}}^* / \pi_{\text{тнд}}^* + \sigma_{\text{II}} \bar{F}_{\text{II}}}{(1 + \bar{F}_{\text{II}})}$	
10	$\tau_{\text{кнд}}^*$ – определить из табл. 5.4	
11	$\tau_{\text{ГГ}}^*$ – определить из табл. 5.2 при значении $\bar{n}_{\text{ВД,пр}} = 0,95$	
12	$\tau_{\text{тнд}}^*$ – определить из рис. 5.9 при значении $m$ из пункта 5	
13	$\tau_{\text{ТКМ}}^* = \tau_{\text{кнд}}^* \frac{\tau_{\text{ГГ}}^* / \tau_{\text{тнд}}^* + m}{1 + m}$	
14	$q(\lambda_{\text{в}})$ – определить из табл. 5.4	
15	$G_{\text{в.пр}} = G_{\text{в.пр.р}} \frac{q(\lambda_{\text{в}})}{q(\lambda_{\text{в}})_{\text{р}}}$	
16	$G_{\text{т.ч.пр}} = G_{\text{т.ч.пр.р}} \frac{q(\lambda_{\text{в}}) (\tau_{\text{ТКМ}}^* - 1)}{q(\lambda_{\text{в}})_{\text{р}} (\tau_{\text{ТКМ,р}}^* - 1)}$	
17	$\Delta_{\text{ГГ}}^*$ – определить из табл. 5.2 при значении $\bar{n}_{\text{ВД,пр}} = 0,95$	
18	$\Delta_{\text{ТКМ}}^* = \Delta_{\text{ГГ}}^* \tau_{\text{кнд}}^*$	

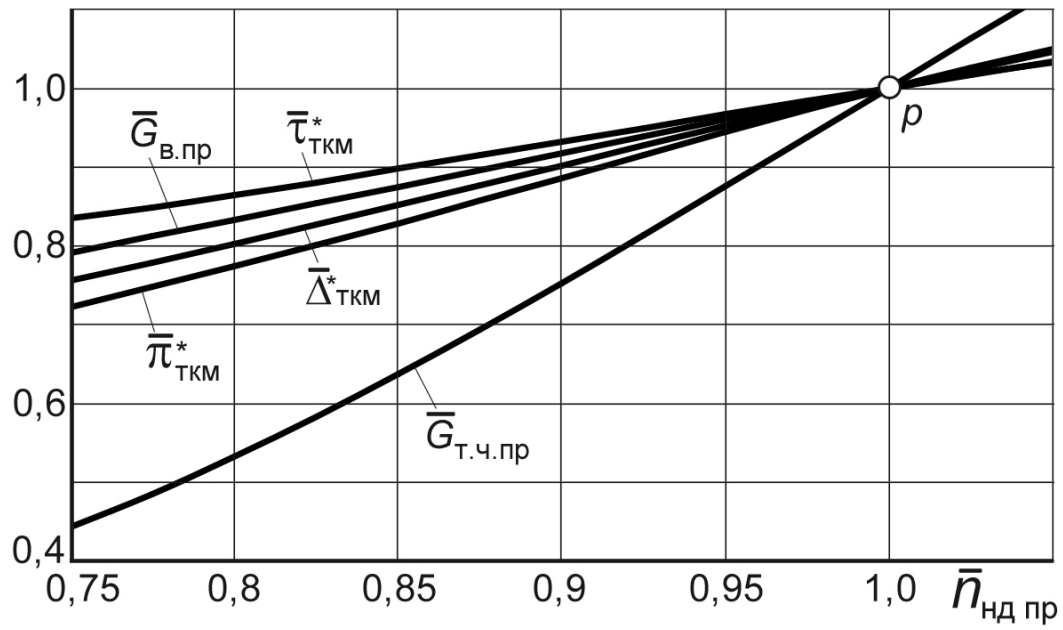
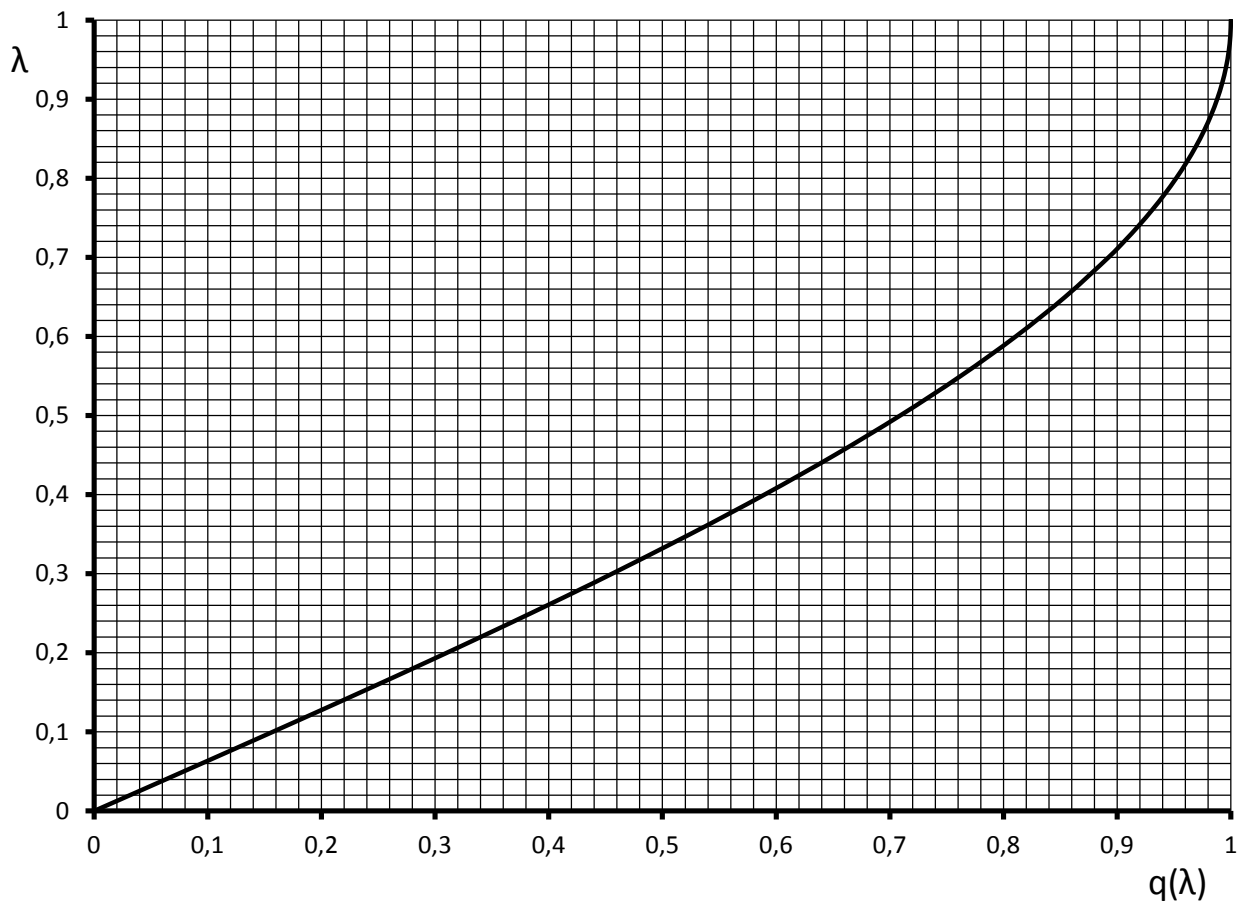


Рис. 5.10. Характеристики ТКМ

Рис. 5.11. Зависимость  $\lambda$  от  $q(\lambda)$  при  $k=1,4$

## Расчет эксплуатационных характеристик ТРДДсм

### 6.1. Построение линии предельных режимов двигателя на максимальном режиме

Формирование программы регулирования двигателя на максимальном режиме должно начинаться с построения "линии предельных режимов", которая ограничивает максимально допустимые значения приведенной (и, соответственно, физической) частоты вращения роторов двигателя в зависимости от температуры заторможенного потока воздуха на входе в него  $T_v^*$ .

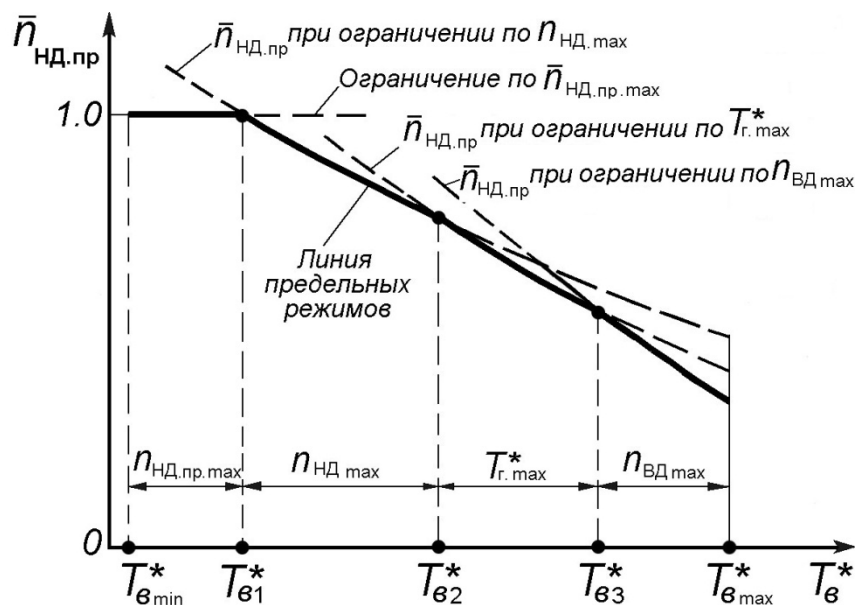


Рис. 6.1 Построение линии предельных режимов работы двигателя

В данной работе линия предельных режимов представляется в виде максимального (с учетом этих ограничений) значения  $\bar{n}_{нд.пр}$  в зависимости от  $T_v^*$ , как показано на рис. 6.1, и строится по результатам расчета характеристики турбокомпрессорного модуля (ТКМ) двигателя.

Прежде всего, следует определить ограничиваемые величины, т.е. значения  $\bar{n}_{нд.макс}$ ,  $\bar{n}_{вд.макс}$ ,  $\bar{n}_{нд.пр.макс}$  и  $T_{г.макс}^*$ .

**Одно из значений  $\bar{n}_{нд.макс}$  или  $\bar{n}_{вд.макс}$  должно быть задано равным 100 % от расчетного**, поскольку расчетный режим является максимальным. Частота вращения другого ротора обычно ограничивается величиной 102...105 %. Максимально допустимая температура газов  $T_{г.макс}^*$  в турбинах с охлаждаемыми лопатками обычно на 20...40 градусов превышает расчетную. Значение  $\Delta K_{y.min}$



и, соответственно,  $\bar{n}_{\text{НД.пр.max}}$  выбирается на основании статистических данных, согласно которым оно обычно равно 100...105 %.

Дальнейшие расчеты с использованием характеристик ТКМ удобнее вести не определяя максимальные значения  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$  для различных значений  $T_{\text{в}}^*$ , а наоборот, определяя те значения  $T_{\text{в}}^*$ , при которых наступают те или иные ограничения при различных значениях  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$ . Это можно сделать следующим образом.

1. Из характеристики ТКМ, представленной в табличной форме (табл. 6.1), выбирается несколько значений  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$ , для которых далее будет проводиться расчет.

Таблица 6.1

Характеристики ТКМ в табличной форме

$\bar{n}_{\text{ВД.пр}}$ :	0.916	0.923	0.930	0.938	0.947	0.955	0.964	0.973	0.982	0.991	1.000	1.008	1.016
$\bar{n}_{\text{НД.пр}}$ :	0.750	0.775	0.800	0.825	0.850	0.875	0.900	0.925	0.950	0.975	1.000	1.025	1.050
$G_{\text{в.пр.ТКМ}}$ :	287.3	294.9	302.5	310.1	317.7	325.4	333.2	341.0	348.7	356.2	363.1	369.5	375.1
$\Pi_{\text{ТКМ}}^*$ :	1.281	1.327	1.373	1.420	1.469	1.520	1.571	1.622	1.674	1.724	1.773	1.819	1.861
$\tau_{\text{ТКМ}}^*$ :	1.339	1.361	1.386	1.412	1.440	1.468	1.495	1.523	1.551	1.578	1.604	1.631	1.658
$G_{\text{тпр}}$ :	2523.	2758.	3026.	3316.	3625.	3948.	4282.	4629.	4984.	5338.	5691.	6048.	6399.
$\bar{n}'_{\text{ВД.пр}}$ :	0.869	0.880	0.892	0.904	0.917	0.930	0.944	0.958	0.972	0.986	1.000	1.013	1.026
$\Pi_{\text{КС}}^*$ :	13.88	14.82	15.83	16.91	18.04	19.19	20.36	21.54	22.72	23.88	25.00	26.11	27.19
$\Delta_{\text{ТКМ}}^*$ :	4.333	4.460	4.594	4.735	4.879	5.023	5.166	5.310	5.452	5.591	5.726	5.861	5.993
$m$ :	5.816	5.650	5.482	5.315	5.156	5.014	4.888	4.773	4.671	4.581	4.500	4.421	4.345
$\bar{\Pi}_{\text{ТНД}}^*$ :	0.809	0.825	0.847	0.869	0.891	0.912	0.932	0.951	0.969	0.985	1.000	1.015	1.029

2. Для каждого из этих  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$  из характеристики ТКМ в табличном виде определяются (выписываются) значения  $\Delta_{\text{ТКМ}}^*$  и  $\bar{n}'_{\text{ВД.пр}}$ .

3. Из формулы для приведенной частоты вращения ротора низкого давления, записанной в виде  $\bar{n}_{\text{НД.пр}} = \bar{n}_{\text{НД}} \max \sqrt{\frac{288}{T_{\text{в}}^*}}$ , определяется значение  $T_{\text{в}}^*$ , соответствующее (при данном  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$ )  $\bar{n}_{\text{НД.max}}: (T_{\text{в}}^*) \bar{n}_{\text{НД.max}} = 288 \left( \frac{\bar{n}_{\text{НД.max}}}{\bar{n}_{\text{НД.пр}}} \right)^2$ , К.

4. Из формулы для приведенной частоты вращения ротора высокого давления, записанной в виде  $\bar{n}'_{\text{ВД.пр}} = \bar{n}_{\text{ВД}} \max \sqrt{\frac{288}{T_{\text{в}}^*}}$ , определяется значение  $T_{\text{в}}^*$ , соответствующее (при данном  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$ )  $\bar{n}_{\text{ВД.max}}: (T_{\text{в}}^*) \bar{n}_{\text{ВД.max}} = 288 \left( \frac{\bar{n}_{\text{ВД.max}}}{\bar{n}'_{\text{ВД.пр}}} \right)^2$ , К.

5. Из формулы для степени подогрева в турбокомпрессорном модуле, записанной в виде  $\Delta_{\text{ТКМ}}^* = T_{\text{г.маx}}^*/T_{\text{в}}^*$ , определяется значение  $T_{\text{в}}^*$ , соответствующее (при данном  $n_{\text{НД.пр}}$ )  $T_{\text{г.маx}}^*$ :  $(T_{\text{в}}^*)_{T_{\text{г.маx}}^*} = T_{\text{г.маx}}^*/\Delta_{\text{ТКМ}}^*$ , К.

Результаты расчета рекомендуется представить в виде таблицы по типу табл. 6.2. При этом для двигателей, которые эксплуатируются на дозвуковых скоростях полета, максимальное значение  $T_{\text{в}}^*$  обычно не превосходит 350 К. Тогда для расчета линии предельных режимов достаточно использовать точки из характеристики ТКМ, соответствующие (с запасом)  $\bar{n}_{\text{НД.пр}} > 0,88$ , включая значение  $\bar{n}_{\text{НД.пр}} = 1,0$ .

Т а б л и ц а 6.2

Расчет линии предельных режимов работы двигателя  $\bar{n}_{\text{НД.пр.маx}} = f(T_{\text{в}}^*)$

Исходные данные: $\bar{n}_{\text{НД.маx}} =$ ; $\bar{n}_{\text{ВД.маx}} =$ ; $T_{\text{г.маx}}^* =$ К; $\bar{n}_{\text{НД.пр.маx}} =$						
1	$\bar{n}_{\text{НД.пр}}$ (выбирается из таблицы характеристик ТКМ)					
2	$\Delta_{\text{ТКМ}}^*$ (выбирается из таблицы характеристик ТКМ)					
3	$\bar{n}'_{\text{ВД.пр}}$ (выбирается из таблицы характеристик ТКМ)					
Значения $T_{\text{в}}^*$ , соответствующие $\bar{n}_{\text{НД}} = \bar{n}_{\text{НД.маx}}$						
4	$(T_{\text{в}}^*)_{\bar{n}_{\text{НД.маx}}} = 288 \left( \frac{\bar{n}_{\text{НД.маx}}}{\bar{n}_{\text{НД.пр}}} \right)^2$ , К					
Значения $T_{\text{в}}^*$ , соответствующие $\bar{n}_{\text{ВД}} = \bar{n}_{\text{ВД.маx}}$						
5	$(T_{\text{в}}^*)_{\bar{n}_{\text{ВД.маx}}} = 288 \left( \frac{\bar{n}_{\text{ВД.маx}}}{\bar{n}'_{\text{ВД.пр}}} \right)^2$ , К					
Значения $T_{\text{в}}^*$ , соответствующие $T_{\text{г.маx}}^*$						
6	$(T_{\text{в}}^*)_{T_{\text{г.маx}}^*} = \frac{T_{\text{г.маx}}^*}{\Delta_{\text{ТКМ}}^*}$ , К					

По результатам расчетов строится график, содержащий следующие кривые:  $(T_{\text{в}}^*)_{\bar{n}_{\text{НД.маx}}} = f(\bar{n}_{\text{НД.пр}})$ ,  $(T_{\text{в}}^*)_{\bar{n}_{\text{ВД.маx}}} = f(\bar{n}_{\text{НД.пр}})$  и  $(T_{\text{в}}^*)_{T_{\text{г.маx}}^*} = f(\bar{n}_{\text{НД.пр}})$ , как показано на рис. 6.2. Взаимное расположение этих кривых может несколько отличаться от расположения, представленного на рис. 6.1. При этом значение  $T_{\text{в.мин}}^*$  принимается равным 213 К ( - 60°С), а  $T_{\text{в.маx}}^*$  – наибольшему из полученных в расчете (в таблице 6.2) значению  $T_{\text{в}}^*$ . Затем на этот же график наносится горизонтальная линия, соответствующая ограничению по запасу устойчивости

КНД, т.е. линия  $\bar{n}_{\text{НД.пр.max}}$ . После этого по точкам пересечения построенных кривых определяются температуры  $T_{\text{в1}}^*$ ,  $T_{\text{в2}}^*$  и  $T_{\text{в3}}^*$ , соответствующие переходу от одного ограничения к другому.

При этом возможно, что не все из этих температур (кроме  $T_{\text{в1}}^*$ ) могут быть определены, т.е. не все кривые будут иметь точки пересечения в рассматриваемом диапазоне значений  $T_{\text{в}}^*$ .

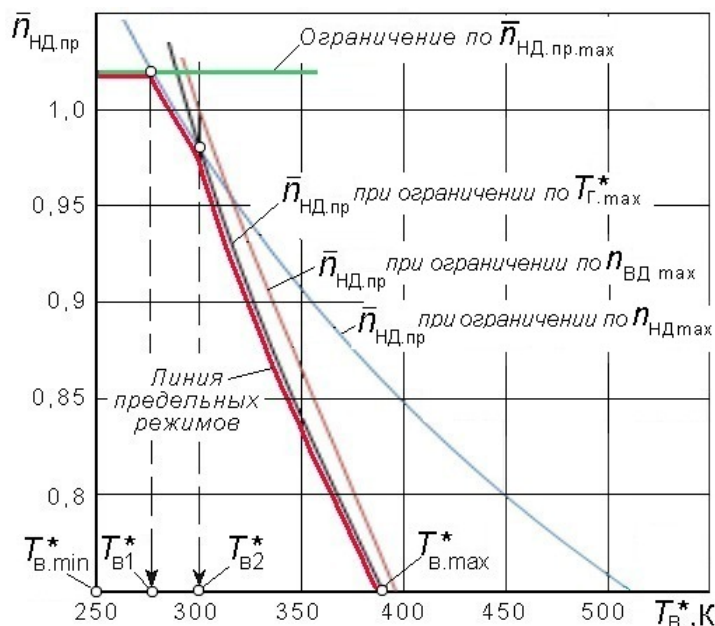


Рис. 6.2. Линия предельных режимов работы двигателя

## 6.2. Формирование программы регулирования двигателя на максимальном режиме

Полученная таким образом линия предельных режимов работы двигателя является основой для формирования программы регулирования двигателя на максимальном режиме (рис. 6.3).

Согласно линии предельных режимов при различных значениях  $T_{\text{в}}^*$  наступает то или иное ограничение на максимальном режиме работы двигателя.

Для формирования соответствующей программы регулирования двигателя необходимо построить график по типу рис 6.3, на котором следует отложить  $T_{\text{в.min}}^*$  и найденные при построении линии предельных режимов значения температур  $T_{\text{в1}}^*$ ,  $T_{\text{в2}}^*$ ,  $T_{\text{в3}}^*$  и  $T_{\text{в.max}}^*$ . Затем для каждой из них необходимо определить по линии предельных режимов (рис. 6.2) соответствующие значения  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$  и по характеристике ТКМ, представленной в графической форме (рис. 6.4), определить отвечающие им значения  $\bar{n}'_{\text{ВД.пр}}$  и  $\Delta_{\text{ТКМ}}^*$ .

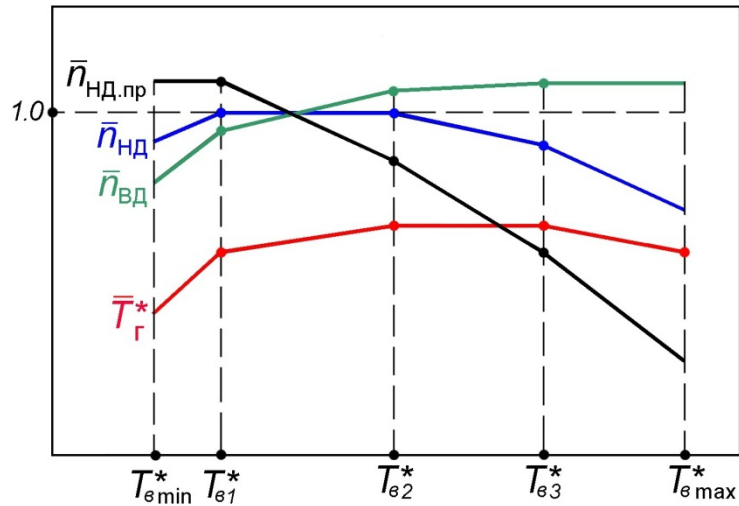


Рис. 6.3. Программа регулирования двигателем на максимальном режиме

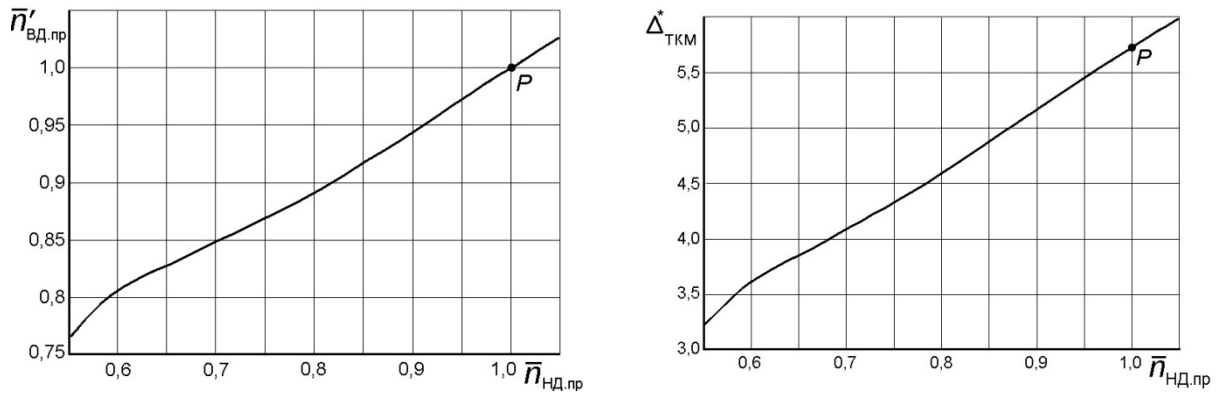


Рис. 6.4. Характеристики турбокомпрессорного модуля

После этого для каждого из рассматриваемых значений  $T_{в}^*$  вычисляются:

$$\bar{n}_{HD} = \bar{n}_{HD,пр} \sqrt{\frac{T_{в}^*}{T_{в,р}^*}}, \quad \bar{n}_{ВД} = \bar{n}'_{ВД,пр} \sqrt{\frac{T_{в}^*}{T_{в,р}^*}} \quad \text{и} \quad T_{г}^* = T_{в}^* \Delta^*_{ТКМ},$$

где  $T_{в,р}^*$  — полная температура на входе в двигатель на расчетном режиме его работы. Например, если расчетный режим работы двигателя соответствует условиям  $H=0$  и  $M_H=0$ , то  $T_{в,р}^* = 288$  К.

Все вычисления, необходимые для формирования программы регулирования двигателя на максимальном режиме, удобно представить в виде таблицы по типу табл. 6.3.

Соответствующие точки наносятся на график (рис. 6.5) и соединяются прямыми линиями.

**Формирование программы регулирования двигателя  
на максимальном режиме**

		$T_{в\ min}^*$	$T_{в1}^*$	$T_{в2}^*$	$T_{в3}^*$	$T_{в\ max}^*$
1	Значение температур $T_{в\ min}^*$ , $T_{в1}^*$ , $T_{в2}^*$ , $T_{в3}^*$ и $T_{в\ max}^*$ (определить из рис. 6.2)					
2	$\bar{n}_{НД.пр}$ (определить из рис. 6.2)					
3	$\bar{n}'_{ВД.пр}$ (определить из характеристики ТКМ, рис. 6.4, при значении $\bar{n}_{НД.пр}$ из пункта 3)					
4	$\Delta_{ТКМ}^*$ (определить из характеристики ТКМ, рис. 6.4, при значении $\bar{n}_{НД.пр}$ из пункта 3)					
5	$\bar{n}_{НД} = \bar{n}_{НД.пр} \sqrt{\frac{T_{в}^*}{T_{в.р}^*}}$					
6	$\bar{n}_{ВД} = \bar{n}'_{ВД.пр} \sqrt{\frac{T_{в}^*}{T_{в.р}^*}}$					
7	$T_{г}^* = T_{в}^* \Delta_{ТКМ}^*$					

### 6.3. Расчет эксплуатационных характеристик ТРДДсм

*Характеристиками авиационных ГТД* называются зависимости тяги и удельного расхода топлива от условий полета и режима работы двигателя.

К характеристикам ТРДДсм относят высотно-скоростные и дроссельные.

*Высотно-скоростными характеристиками* (ВСХ) называются зависимости тяги  $P$  и удельного расхода топлива  $C_{уд}$  от числа  $M_H$  (скорости полета) и высоты полета  $H$  на заданном режиме работы двигателя и принятой программе его регулирования. При расчете ВСХ выбирается один из режимов работы двигателя, например, максимальный.

*Дроссельными характеристиками* (ДХ) двигателя называются зависимости тяги  $P$  и удельного расхода топлива  $C_{уд}$  от режима работы двигателя при неизменных условиях полета ( $H$ ,  $M_H$ ).

При расчете характеристик ТРДДсм используются полученные ранее характеристики ТКМ и программа регулирования двигателя.

#### 6.3.1. Расчет скоростных характеристик

*Скоростными характеристиками* (СХ) двигателя называются зависимости тяги и удельного расхода топлива от числа  $M_H$  (скорости полета) на

неизменной высоте полета ( $H=\text{const}$ ) при заданном режиме работы двигателя и принятой программе его регулирования.

Расчет скоростной характеристики двигателя (см. табл. 6.4) на основе полученных характеристик ТКМ для ТРДДсм ведется в следующем порядке.

1. При заданных значениях  $H$  и  $M_H$  определяются значения параметров атмосферы  $p_H$ ,  $T_H$  (Приложение 1) и параметров заторможенного потока на входе в КНД, а также скорости полета:

$$T_B^* = T_H(1 + 0,2 M_H^2), \text{ К}; \quad p_B^* = p_H \sigma_{\text{вх}} (T_B^* / T_H)^{3,5}, \text{ Па};$$

$$a_H = \sqrt{kRT_H}, \text{ м/с}; \quad V = a_H M_H, \text{ м/с}.$$

2. По линии предельных режимов работы двигателя (рис.6.2) находится соответствующее данному значению  $T_B^*$  значение  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$  на максимальном режиме.

3. По характеристике ТКМ (рис. 6.6) находятся соответствующие данным  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$  значения  $\pi_{\text{ТКМ}}^*$ ,  $\tau_{\text{ТКМ}}^*$ ,  $m$ ,  $G_{\text{в.пр}}$ ,  $G_{\text{т.ч.пр}}$ .

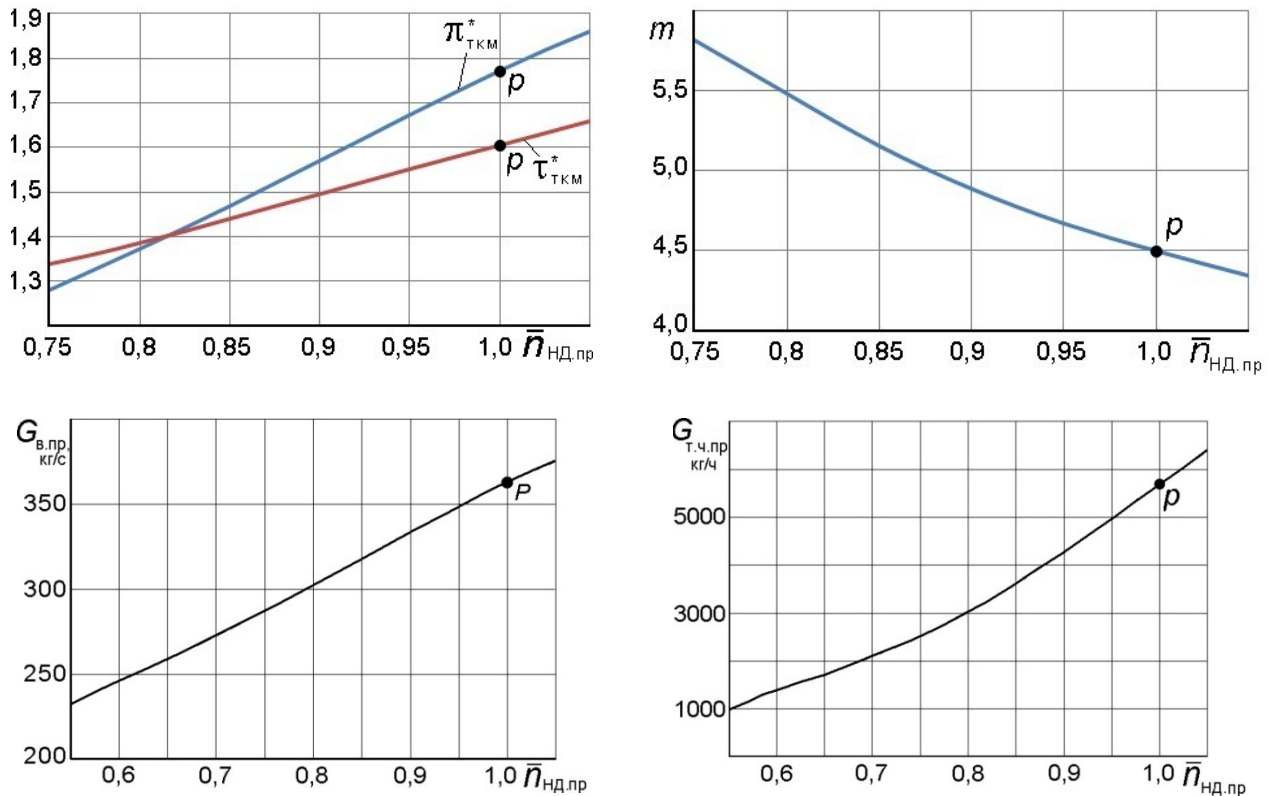


Рис. 6.6. Характеристики турбокомпрессорного модуля

4. Определяются значения расхода воздуха и топлива:

$$G_B = G_{\text{в.пр}} \frac{p_B^*}{101300} \sqrt{\frac{288}{T_B^*}}, \text{ кг/с}; \quad G_{\text{т.ч}} = G_{\text{т.ч.пр}} \frac{p_B^*}{101300} \sqrt{\frac{T_B^*}{288}}, \text{ кг/ч}.$$

5. Определяются скорость истечения газа  $c_c$ , тяга и удельный расход топлива двигателя:

$$\pi_c = \pi_{\text{ТКМ}}^* p_{\text{в}}^* / p_{\text{н}}; \quad 1 - 1/e_c = f(\pi_c) - \text{при } k_{\Gamma} = 1,33;$$

$$T_{\text{с}}^* = T_{\text{см}}^* = \tau_{\text{ТКМ}}^* T_{\text{в}}^*, \text{ К}; \quad c_c = \varphi_c \sqrt{2 c_{\text{p},\Gamma} T_{\text{с}}^* \left(1 - \frac{1}{e_c}\right)}, \text{ м/с};$$

$$G_{\Gamma} = G_{\text{в}}(1 - g_{\text{отб}}/(1+m)) + G_{\text{т.ч}}/3600, \text{ кг/с}; \quad P = G_{\Gamma} c_c - G_{\text{в}} V, \text{ Н}; \quad C_{\text{уд}} = G_{\text{т.ч}} / P, \text{ кг/(Н}\cdot\text{ч)}.$$

Таблица 6.4

1	Исходные данные				
	$H =$ , км; $p_{\text{н}} =$ , Па; $T_{\text{н}} =$ , К; $g_{\text{отб}} =$ ; $\varphi_c =$ ; [ $p_{\text{н}} = f(H)$ , $T_{\text{н}} = f(H)$ и $a_{\text{н}} = f(H)$ , см. Приложение 1]				
2	$M_{\text{н}}$				
3	$V = a_{\text{н}} M_{\text{н}}$ , м/с				
4	$\sigma_{\text{вх}} = f(M_{\text{н}})$ , определяется из рис. 6.7				
5	$T_{\text{в}}^* = T_{\text{н}}(1 + 0,2 M_{\text{н}}^2)$ , К				
6	$p_{\text{в}}^* = p_{\text{н}} \sigma_{\text{вх}} (T_{\text{в}}^* / T_{\text{н}})^{3,5}$ , Па				
7	$\bar{n}_{\text{нд.пр}} = f(T_{\text{в}}^*)$ , определяется по ЛПР из рис. 6.2				
8	$\pi_{\text{ТКМ}}^* = f(\bar{n}_{\text{нд.пр}})$ , определяется по характеристике ТКМ, рис. 6.6				
9	$\tau_{\text{ТКМ}}^* = f(\bar{n}_{\text{нд.пр}})$ , определить по характеристике ТКМ, рис. 6.6				
10	$m = f(\bar{n}_{\text{нд.пр}})$ , определить по характеристике ТКМ, рис. 6.6				
11	$G_{\text{в.пр}} = f(\bar{n}_{\text{нд.пр}})$ , кг/с, определить по характеристике ТКМ, рис. 6.6				
12	$G_{\text{т.ч.пр}} = f(\bar{n}_{\text{нд.пр}})$ , кг/ч, определить по характеристике ТКМ, рис. 6.6				
13	$G_{\text{в}} = G_{\text{в.пр}} \frac{p_{\text{в}}^*}{101300} \sqrt{\frac{288}{T_{\text{в}}^*}}$ , кг/с				
14	$G_{\text{т.ч}} = G_{\text{т.ч.пр}} \frac{p_{\text{в}}^*}{101300} \sqrt{\frac{T_{\text{в}}^*}{288}}$ , кг/ч				
15	$T_{\text{с}}^* = \tau_{\text{ТКМ}}^* T_{\text{в}}^*$ , К				
16	$\pi_c = \pi_{\text{ТКМ}}^* p_{\text{в}}^* / p_{\text{н}}$				
17	$e_c = \pi_c^{\frac{k_{\Gamma}-1}{k_{\Gamma}}}$ , где $k_{\Gamma} = 1,33$				
18	$c_c = \varphi_c \sqrt{2 c_{\text{p},\Gamma} T_{\text{с}}^* \left(1 - \frac{1}{e_c}\right)}$ , м/с, где $c_{\text{p},\Gamma} = 1158,3$ Дж/(кг·К)				
19	$G_{\Gamma} = G_{\text{в}}(1 - g_{\text{отб}}/(1+m)) + G_{\text{т.ч}}/3600$ , кг/с				
20	$P = G_{\Gamma} c_c - G_{\text{в}} V$ , Н				
21	$C_{\text{уд}} = G_{\text{т.ч}} / P$ , кг/(Н·ч)				

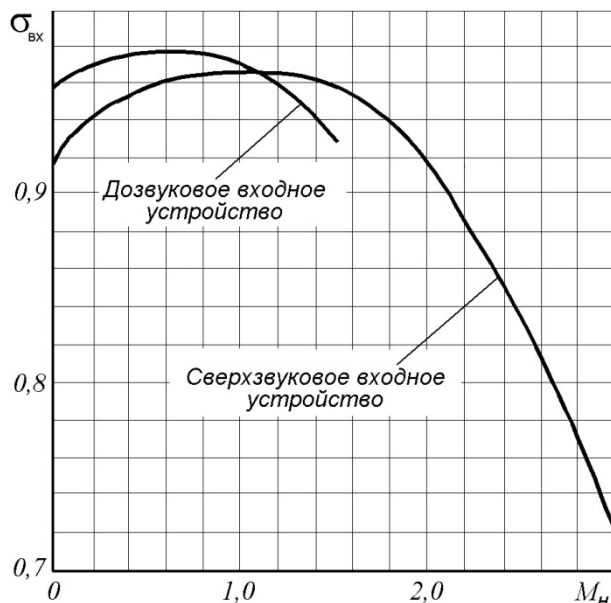


Рис. 6.7. Характеристика воздухозаборника

Обычно скоростные характеристики двигателей прямой реакции рассчитываются сразу для различных высот полета, а результаты такого расчета строятся на одном графике типа изображенного на рис. 6.8 и называются высотно-скоростными характеристиками двигателя.

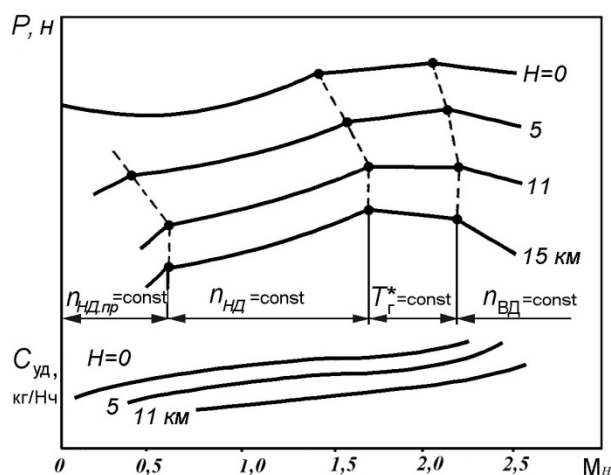


Рис. 6.8. Высотно-скоростная характеристика ТРДД (максимальный режим)

### 6.3.2. Расчет высотных характеристик

**Высотные характеристик двигателя**, то есть зависимости тяги  $P$  и удельного расхода топлива  $C_{уд}$  от высоты полета  $H$  при фиксированном значении  $M_H$  и принятой программе его регулирования, рассчитываются по тем же формулам, что и скоростные характеристики.



Примерный характер протекания высотной характеристики ТРДД показан на рис. 6.9а. На рис. 6.9б и рис. 6.9в изображены соответствующие кривые изменения параметров  $\pi_{\kappa}^*$ ,  $\Delta$ ,  $P_{уд}$ ,  $G_{в}$ ,  $\rho_H$  и  $Q$  по высоте полета.

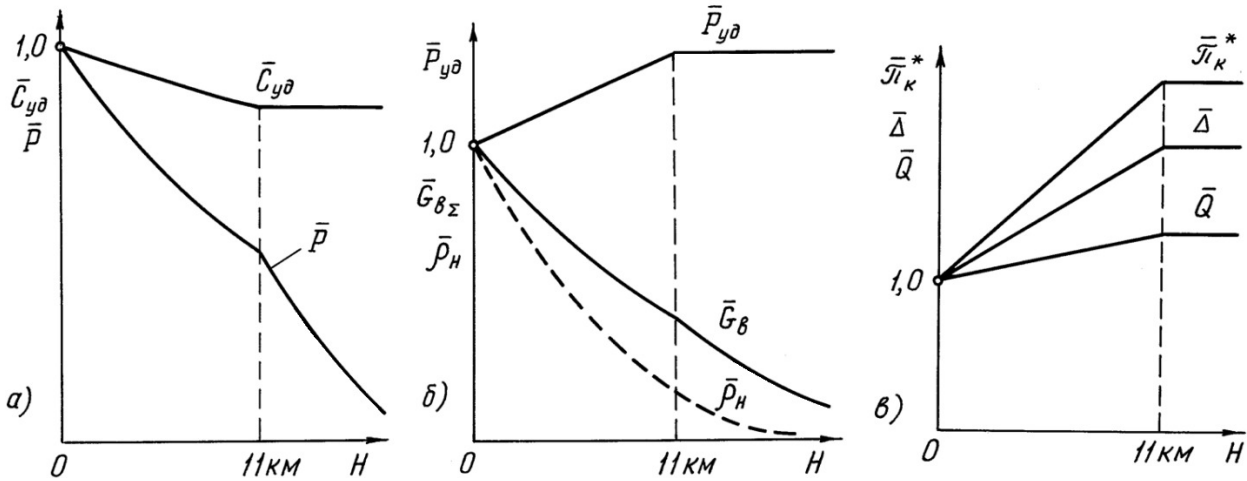


Рис. 6.9. Высотная характеристика ТРДД

### 6.3.3. Расчет характеристик двигателя в области ограничения по $p_{\kappa \max}^*$

Если задано число  $M_H$  полета ( $M_{\text{ногр}}$ ), при превышении которого на данной высоте  $H$  вступает в силу ограничение по максимальному давлению за компрессором  $p_{\kappa \max}^*$ , то прежде всего следует определить соответствующее значение  $p_{\kappa \max}^*$ .

Для этого необходимо, найдя значения  $T_v^* = T_H(1 + 0,2M_{\text{ногр}}^2)$  и  $p_v^* = p_H \sigma_{\text{вх}}(T_v^*/T_H)^{3,5}$ , определить по линии предельных режимов значение  $\bar{n}_{\text{нд,пр.огр}}$ , отвечающее данному  $T_v^*$ , а затем (по характеристике ТКМ)  $\pi_{\kappa \Sigma \text{огр}}^* = f(\bar{n}_{\text{нд,пр.огр}})$ . Тогда  $p_{\kappa \max}^* = p_v^* \pi_{\kappa \Sigma \text{огр}}^*$ .

Далее, для каждого из задаваемых в расчете значений  $M_H > M_{\text{ногр}}$  (на той же высоте  $H$ ) после определения отвечающих им значений  $T_v^*$  и  $p_v^*$  находится значение  $\pi_{\kappa \Sigma}^* = p_{\kappa \max}^* / p_v^*$ , а затем (из характеристики ТКМ) – соответствующие ему значения  $\pi_{\text{ткм}}^*$ ,  $\tau_{\text{ткм}}^*$ ,  $G_{\text{в,пр}}$ ,  $G_{\text{т.ч.пр}}$ .

Дальнейший расчет ведется в том же порядке, как и при отсутствии ограничения по  $p_{\kappa \max}^*$  по алгоритму, приведенному в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Исходные данные				
$H = \underline{\hspace{2cm}}$ , км; $p_H = \underline{\hspace{2cm}}$ , Па; $T_H = \underline{\hspace{2cm}}$ , К; $a_H = \underline{\hspace{2cm}}$ , м/с;				
$M_{\text{Ногр}} = \underline{\hspace{2cm}}$ ; $p_{\kappa \text{ max}}^* = \underline{\hspace{2cm}}$ , Па;				
1	$M_H$	$M_{\text{Ногр}}$	$M_{\text{Ногр}}+0,1$	$M_{\text{Ногр}}+0,2$
2	$\sigma_{\text{ВХ}} = f(M_H)$ (рис. 6.7)			
3	$T_{\text{В}}^* = T_H(1+0,2M_H^2)$ , К;			
4	$p_{\text{В}}^* = p_H \sigma_{\text{ВХ}} (T_{\text{В}}^*/T_H)^{3,5}$ , Па;			
5	$\pi_{\kappa \Sigma}^* = p_{\kappa \text{ max}}^* / p_{\text{В}}^*$			
6	$\bar{n}_{\text{НД,пр}} = f(\pi_{\kappa \Sigma}^*)$ – по характеристике ТКМ			
7	$G_{\text{В,пр}}$ , кг/с	По характеристике ТКМ для найденного $\bar{n}_{\text{НД,пр}}$		
8	$\pi_{\text{ТКМ}}^*$			
9	$\tau_{\text{ТКМ}}^*$			
10	$G_{\text{Т,ч,пр}}$ , кг/ч			
11	$\pi_{\text{с}} = \pi_{\text{ТКМ}}^* p_{\text{В}}^* / p_H$			
12	$1-1/e_{\text{с}} = f(\pi_{\text{с}})$ – по табл. ГДФ, при $k_{\Gamma} = 1,33$			
13	$T_{\text{см}}^* = \tau_{\text{ТКМ}}^* T_{\text{В}}^*$ , К			
14	$c_{\text{с}} = \varphi_{\text{с}} \sqrt{2c_{\rho \Gamma} T_{\text{см}}^* \left(1 - \frac{1}{e_{\text{с}}}\right)}$ , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$			
15	$G_{\text{В}} = G_{\text{В,пр}} \frac{p_{\text{В}}^*}{101300} \sqrt{\frac{288}{T_{\text{В}}^*}}$ , кг/с			
16	$G_{\text{Т,ч}} = G_{\text{Т,ч,пр}} \frac{p_{\text{В}}^*}{101300} \sqrt{\frac{T_{\text{В}}^*}{288}}$ , кг/ч			
17	$G_{\Gamma} = G_{\text{В}}(1-g_{\text{отб}}/(1+m)) + G_{\text{Т,ч}}/3600$ , кг/с;			
18	$P = G_{\Gamma} c_{\text{с}} - G_{\text{В}} V$ , Н			
19	$C_{\text{уд}} = G_{\text{Т,ч}} / P$ , кг/(Н · ч)			

### 6.3.4. Расчет дроссельных характеристик

**Дроссельной характеристикой авиационного двигателя прямой реакции называется** зависимость тяги и удельного расхода топлива от режима работы двигателя (изменения положения рычага управления двигателем) или взаимозависимость между тягой и удельным расходом топлива при изменении режима работы (в данных условиях полета).

Дроссельные характеристики рассчитываются в диапазоне режимов от максимального, соответствующего максимальному значению  $\bar{n}_{\text{НД,пр}}$  ( $\bar{n}_{\text{НД,пр,max}}$ ) по линии предельных режимов при данной  $T_{\text{В}}^*$  (определяемой условиями поле-

та), до минимального, соответствующего (в данном пособии) минимальному значению  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$  из числа полученных при расчете характеристик турбокомпрессорного модуля двигателя ( $\bar{n}_{\text{НД.пр.min}}$ ).

В этом диапазоне выбирается несколько (4...5) значений  $\bar{n}_{\text{НД.пр}}$  (включая  $\bar{n}_{\text{НД.пр.max}}$  и  $\bar{n}_{\text{НД.пр.min}}$ ) и для каждого из них определяются значения  $G_{\text{в.пр}}$ ,  $G_{\text{т.ч.пр}}$ ,  $m$ ,  $\pi_{\text{ТКМ}}^*$  и  $\pi_{\text{ТКМ}}^*$  по характеристике ТКМ. Затем проводится вычисление тяги и удельного расхода топлива двигателя по тем же формулам, которые используются при расчете высотно-скоростных характеристик.

Порядок расчета дроссельной характеристики изложен в табл. 6.6.

Таблица 6.6

Исходные данные				
$H=$ , км; $M_H=$ ; $p_H=$ , Па; $T_H=$ , К; $g_{\text{отб}}=$ ; $\varphi_c=$ ; $a_H=$ ; $V= a_H M_H=$ ; $\sigma_{\text{вх}}=f(M_H)=$ , определить по рис. 6.7 $T_{\text{в}}^*=T_H(1+0,2M_H^2)=$ , К; $p_{\text{в}}^*=p_H\sigma_{\text{вх}}(T_{\text{в}}^*/T_H)^{3,5}=$ , Па $[p_H=f(H), T_H=f(H) \text{ и } a_H=f(H), \text{ см. Приложение 1}]$				
1	$\bar{n}_{\text{НД.пр}}=f(T_{\text{в}}^*)$ , определить по ЛПР, рис. 6.2			
2	$\pi_{\text{ТКМ}}^*=f(\bar{n}_{\text{НД.пр}})$ , определить по характеристике ТКМ, рис. 6.6			
3	$\tau_{\text{ТКМ}}^*=f(\bar{n}_{\text{НД.пр}})$ , определить по характеристике ТКМ, рис. 6.6			
4	$m=f(\bar{n}_{\text{НД.пр}})$ , определить по характеристике ТКМ, рис. 6.6			
5	$G_{\text{в.пр}}=f(\bar{n}_{\text{НД.пр}})$ , кг/с, определить по характеристике ТКМ, рис. 6.6			
6	$G_{\text{т.ч.пр}}=f(\bar{n}_{\text{НД.пр}})$ , кг/ч, определить по характеристике ТКМ, рис. 6.6			
7	$G_{\text{в}}=G_{\text{в.пр}}\frac{p_{\text{в}}^*}{101300}\sqrt{\frac{288}{T_{\text{в}}^*}}$ , кг/с			
8	$G_{\text{т.ч}}=G_{\text{т.ч.пр}}\frac{p_{\text{в}}^*}{101300}\sqrt{\frac{T_{\text{в}}^*}{288}}$ , кг/ч			
9	$T_{\text{с}}^*=\tau_{\text{ТКМ}}^*T_{\text{в}}^*$ , К			
10	$\pi_{\text{с}}=\pi_{\text{ТКМ}}^*p_{\text{в}}^*/p_H$			
11	$e_c=\pi_{\text{с}}^{\frac{k_{\Gamma}-1}{k_{\Gamma}}}$ , где $k_{\Gamma}=1,33$			
12	$c_{\text{с}}=\varphi_{\text{с}}\sqrt{2c_{\text{р.г}}T_{\text{с}}^*\left(1-\frac{1}{e_c}\right)}$ , м/с, где $c_{\text{р.г}}=1158,3$ Дж/(кг·К)			
13	$G_{\Gamma}=G_{\text{в}}(1-g_{\text{отб}}/(1+m))+G_{\text{т.ч}}/3600$ , кг/с			
14	$P=G_{\Gamma}c_{\text{с}}-G_{\text{в}}V$ , Н			
15	$C_{\text{уд}}=G_{\text{т.ч}}/P$ , кг/(Н·ч)			

Вид дроссельной характеристики ТРДДсм представлен на рис. 6.10.

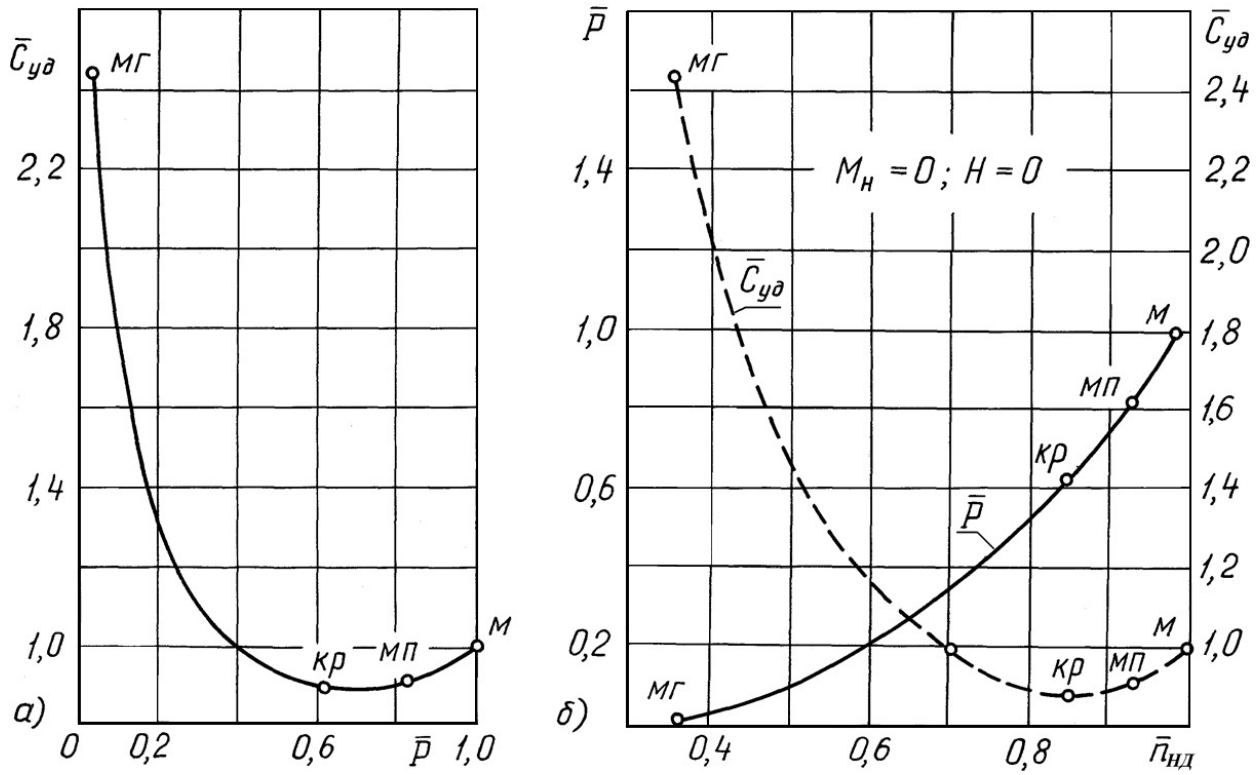


Рис. 6.10. Дроссельная характеристика ТРДДсм

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Котовский В.Н., Комов А.А. Теория авиационных двигателей, часть 1. – М.: МГТУ ГА, 2013.
2. Котовский В.Н., Комов А.А. Теория авиационных двигателей, часть 2. – М.: МГТУ ГА, 2013.
3. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей, часть. 1 – М.: Машиностроение, 1977.
4. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М., Котовский В.Н., Полев А.С. Теория авиационных двигателей, часть 1. /Под редакцией Ю.Н. Нечаева. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2012.
5. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М., Котовский В.Н., Полев А.С. Теория авиационных двигателей, часть 2. /Под редакцией Ю.Н. Нечаева. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2012.
6. Федоров Р.М. Приближенный расчет характеристик нерегулируемых осевых компрессоров. – М.: Журнал «Авиационная промышленность» № 3 – 4, 1995.
7. Котовский В.Н., Лещенко И.А., Федоров Р.М. Теория авиационных двигателей. Пособие по выполнению курсовой работы. – М.: МГТУ ГА, 2013.

Параметры стандартной атмосферы (ГОСТ 4401–81)

	°С	К			
0	15,00	288,15	101325,0	1,2250	340,3
200	13,70	286,85	98945,4	1,2017	339,5
400	12,40	285,55	96611,5	1,1786	338,8
600	11,10	284,25	94322,4	1,1560	338,0
800	9,80	282,95	92077,5	1,1337	337,2
1000	8,50	281,65	89876,3	1,1117	336,4
1200	7,20	280,35	87718,0	1,0900	335,7
1400	5,90	279,05	85602,0	1,0687	334,9
1600	4,60	277,75	83527,7	1,0476	334,1
1800	3,30	276,45	81494,3	1,0269	333,3
2000	2,00	275,15	79501,4	1,0066	332,5
2200	0,71	273,85	77548,2	0,9865	331,7
2400	-0,59	272,56	75634,3	0,9667	331,0
2600	-1,89	271,26	73758,8	0,9473	330,2
2800	-3,19	269,96	71921,3	0,9281	329,4
3000	-4,49	268,66	70121,1	0,9093	328,6
3200	-5,79	267,36	68357,8	0,8907	327,8
3400	-7,09	266,06	66630,5	0,8724	327,0
3600	-8,39	264,76	64939,0	0,8544	326,2
3800	-9,69	263,46	63282,5	0,8368	325,4
4000	-10,98	262,17	61660,4	0,8193	324,6
4200	-12,28	260,87	60072,3	0,8022	323,8
4400	-13,58	259,57	58517,6	0,7854	323,0
4600	-14,88	258,27	56995,7	0,7688	322,2
4800	-16,18	256,97	55506,1	0,7525	321,4
5000	-17,47	255,68	54048,3	0,7364	320,5
5200	-18,77	254,38	52621,7	0,7206	319,7
5400	-20,07	253,08	51225,9	0,7051	318,9
5600	-21,37	251,78	49860,2	0,6899	318,1
5800	-22,67	250,48	48524,3	0,6749	317,3
6000	-23,96	249,19	47217,6	0,6601	316,5
6200	-25,26	247,89	45939,6	0,6456	315,6
6400	-26,56	246,59	44689,9	0,6313	314,8
6600	-27,86	245,29	43467,9	0,6173	314,0

## Содержание

Введение.....	3
Практическое занятие № 1. Термодинамический расчет двухконтурных двигателей со смешением потоков (ТРДДсм).....	3
1.1. Основные условия и допущения.....	3
1.2. Выбор исходных данных.....	4
1.3. Термодинамический расчет ТРДДсм.....	5
1.3.1. Определение оптимального значения $\pi_{кнд,опт}^*$ .....	6
1.3.2. Определение параметров двигателя на расчетном режиме его работы .....	10
Практическое занятие № 2. Расчет характеристик осевого компрессора.....	12
Практическое занятие № 3. Приближенный расчет характеристик газовой турбины.....	21
3.1. Задание исходных данных.....	22
3.2. Подготовки данных для расчета $\eta_T^*$ , $L_T/T_T^*$ , $G_Z$ , и $\alpha_T$ при различных $\pi_T^*$ и заданном $\lambda_u$ .....	23
3.3. Определение $y_{опт}^*$ и максимального КПД турбины на заданном нерасчетном режиме (т.е. при $\lambda_u \neq \lambda_{ур}$ ).....	24
3.4. Определение КПД турбины на заданном (нерасчетном) режиме .....	25
3.5. Определение параметра расхода газа через турбину на заданном (нерасчетном) режиме ( т.е. при $\lambda_u \neq \lambda_{ур}$ и $\pi_T^* \neq \pi_{Т,р}^*$ ) .....	26
3.6. Определение параметра работы на заданном (нерасчетном) режиме ( т.е. при $\lambda_u \neq \lambda_{ур}$ и $\pi_T^* \neq \pi_{Т,р}^*$ ).....	27
3.7. Определение направления потока за турбиной на заданном (нерасчетном) режиме ( т.е. при $\lambda_u \neq \lambda_{ур}$ и $\pi_T^* \neq \pi_{Т,р}^*$ ).....	28
Практическое занятие № 4. Расчет положения рабочей линии на характеристике КВД ТРДДсм.....	32
Практическое занятие № 5. Расчет характеристик газогенератора и турбокомпрессорного модуля ТРДДсм.....	36
5.1. Расчет параметров газогенератора ТРДДсм.....	36
5.2. Определение режимов совместной работы элементов турбокомпрессорного модуля ТРДДсм.....	38
5.3. Расчет характеристик турбокомпрессорного модуля ТРДДсм .....	43

Практическое занятие № 6. Расчет эксплуатационных характеристик ТРДДсм.....	48
6.1. Построение линии предельных режимов двигателя на максимальном режиме.....	48
6.2. Формирование программы регулирования двигателя на максимальном режиме.....	51
6.3. Расчет эксплуатационных характеристик ТРДДсм.....	53
6.3.1. Расчет скоростных характеристик.....	53
6.3.2. Расчет высотных характеристик.....	56
6.3.3. Расчет характеристик двигателя в области ограничения по $p_{к\max}^*$ .....	57
6.3.4. Расчет дроссельных характеристик.....	58
ЛИТЕРАТУРА.....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Параметры стандартной атмосферы.....	62