

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

В.А. ГРИГОРЬЕВ

ПРОЕКТНЫЙ
ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ
АВИАЦИОННЫХ ГТД
ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Учебное пособие

САМАРА 2001

2002

УДК 629.7.036.001 (075.6)

Проектный термогазодинамический расчет авиационных ГТД гражданского назначения: Учебное пособие / В.А. Григорьев.
Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2001. 170 с.

ISBN 5-7883-0142-4

На числовых примерах изложена методика проектного термогазодинамического расчета основных типов авиационных ГТД гражданского назначения (ТРДД, ТВД, ТВВД и ТВад). Даны рекомендации по выбору исходных данных, по методике выполнения расчетов проектируемого ГТД на нерасчетном режиме

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 130301, выполняющих курсовую работу, и студентов специальности 130209, выполняющих задания на практических занятиях

Табл. 12. Ил. 6. Библиогр.: 14 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева

Рецензенты: д-р техн. наук *А.М. Идельсон*;
д-р техн. наук *Б.Д. Фишбейн*

ISBN 5-7883-0142-4

© Григорьев В.А., 2001

© Самарский государственный
аэрокосмический университет,
2001

СОКРАЩЕННЫЕ НАИМЕНОВАНИЯ

- ВСХ – высотно-скоростная характеристика;
 ДПС (ДТС) – дозвуковой пассажирский (транспортный) самолет;
 ОКР – опытно-конструкторские работы;
 СУ – силовая установка;
 ЛА – летательный аппарат (самолет, вертолет);
 НД – низкое давление;
 ВД – высокое давление;
 СД – среднее давление;
 ГДФ – газодинамические функции;
 ТДФ – термодинамические функции;
 САУ – стандартные атмосферные условия;
 ТВВД (ТВД) – турбовинтовентиляторный (турбовинтовой) двигатель;
 СТ – свободная турбина;
 ТВАд – турбовальный двигатель со свободной турбиной;
 ТРДД (см) – двухконтурный турбореактивный двигатель (со смешением).

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- | | |
|---|--|
| <p>A_T – пропускная способность турбины, m^2;</p> <p>a – скорость звука, m/s;</p> <p>$C_{уд}$ – удельный расход топлива ТРДД, $kg/kN \cdot ч$;</p> <p>C_e – удельный расход топлива ТВАд, $kg/kBt \cdot ч$;</p> <p>$C_э$ – удельный эквивалентный расход топлива, $kg/экBt \cdot ч$;</p> <p>$C_{T \cdot км}$ – удельные затраты топлива ЛА на $1 т \cdot км$, $kg/т \cdot км$;</p> | <p>D – диаметр, m;</p> <p>F – площадь сечения, m^2;</p> <p>G – массовый расход газа (воздуха), kg/c;</p> <p>H – высота полета, $км$;</p> <p>H_u – низшая теплотворная способность топлива, $кДж/кг$;</p> <p>i – энтальпия, $кДж/кг$;</p> |
|---|--|

L – работа компрессора, турбины, кДж/кг;	T – температура, К; период времени, год; межремонтный ресурс, ч ;
m – степень двухконтурности;	V – скорость полета, м/с, км/ч ;
$\gamma_{\text{дв}}$ – удельная масса ГТД, кг/кН, кг/кВт;	α – коэффициент избытка воздуха;
$M_{\text{СУ+т}}$ – масса СУ и топлива на ЛА, кг;	$\eta_{\text{к}}, \eta_{\text{т}}$ – коэффициент полезного действия компрессора, турбины;
M – число Маха; масса, кг;	$\eta_{\text{г}}$ – коэффициент полноты сгорания;
N – мощность, кВт;	λ – приведенная скорость ;
n – частота вращения, мин ⁻¹	ν – коэффициент изменения массового расхода;
$P_{\text{дв}}$ – реактивная тяга ГТД, кН;	$\pi_{\text{к}}, \pi_{\text{т}}$ – степень повышения (понижения) давления в компрессоре (турбине);
P – давление, кПа;	$\pi(T)$ – энтропийная термодинамическая функция “относительное давление”;
$q(\lambda), \pi(\lambda), \pi(\lambda)$ – газодинамические функции,	σ – коэффициент восстановления полного давления;
q_m – отношение расхода топлива к расходу воздуха;	$\varphi_{\text{с}}$ – коэффициент скорости выходного устройства;
R – газовая постоянная кДж/кг·К ;	$\pi_{\text{с}}$ – степень понижения давления в выходном устройстве
S – стоимость, руб ;	

ИНДЕКСЫ

в – воздух, вентилятор;	дв – двигатель;
вв – винтовентилятор, воздушный винт;	ж.дв – жизненный цикл ГТД;
вх – относящийся к входному устройству;	к – компрессор, сечение за компрессором;
г – газ;	

к_п – сечение за компрессором
наружного контура
(вентилятором);

кн – коммерческая нагрузка;

кс – камера сгорания;

кр – крейсерская, критическая;

н – высотный, сечение перед
воздухозаборником двигателя;

м – механический;

нз – навигационный запас;

охл – охлаждение;

п – полет;

пл – планер;

пр – приведенный к САУ;

р – расчетный;

рес – ресурс;

с – сопло, сечение на выходе из
сопла (выходного устройства);

сл – служебная нагрузка;

су – силовая установка;

s – изэнтропический;

т – турбина, сечение за турбиной;

т.св – свободная турбина;

т – топливо;

тс – топливная система;

уд – удельный;

ут – утечки;

ч – часовой;

э – эквивалентный;

е – эффективный;

Σ – суммарный;

* – параметры заторможенного
потока;

м – отнесенный к массе;

P – отнесенный к тяге;

N – отнесенный к мощности

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. РАСЧЕТ ТРДД С РАЗДЕЛЬНЫМ ИСТЕЧЕНИЕМ ИЗ КОНТУРОВ.....	9
1.1. Исходные данные к расчету.....	9
1.2. Проектный расчет ТРДД с раздельным истечением для условий крейсерского полета.....	11
1.3. Расчет ТРДД на взлетном режиме	25
2. РАСЧЕТ ТРДД СО СМЕШЕНИЕМ ПОТОКОВ	38
2.1. Исходные данные к расчету	38
2.2. Проектный расчет ТРДД со смешением потоков для условий крейсерского полета.....	40
2.3. Расчет ТРДДсм на взлетном режиме.....	54
3. РАСЧЕТ ТВВД (ТВД).....	68
3.1. Исходные данные к расчету.....	68
3.2. Проектный расчет ТВВД (ТВД) для условий крейсерского полета	70
3.3. Расчет ТВВД (ТВД) на взлетном режиме	82
4. РАСЧЕТ ТВАд	94
4.1. Исходные данные к расчету	94
4.2. Проектный расчет ТВАд для условий взлетного режима	96
4.3. Расчет ТВАд на крейсерском режиме	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120
Приложение 1. Диаграммы $\pi - i - T$ функций для воздуха ($\alpha = \infty$) и газа ($\alpha = 4$)	121
Приложение 2. Таблица стандартной атмосферы	155
Приложение 3. Таблица термодинамических функций $\pi - i - T$ для газа ($\alpha = 1$)	156
Приложение 4. Таблицы газодинамических функций для воздуха ($\kappa = 1.4$) и газа ($\kappa = 1.33$)	157
Список литературы.....	120

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении проектных термогазодинамических расчетов авиационных ГТД студенты специальностей 130209 и 130301 испытывают определенные трудности, пользуясь учебным пособием [1].

Принципиальной особенностью подхода, изложенного в данном пособии, является существенное уменьшение объема работ, связанных с выбором параметров рабочего процесса – основной набор необходимых исходных данных выдается преподавателем. При этом важно отметить, что исходные данные по проектному расчету для ТРДД, ТВД, ТВВД задаются для режима крейсерского полета, а для ТВАд – для взлетного режима. В пособии приведены необходимые материалы, позволяющие после проведения проектного расчета на указанных режимах по заданию преподавателя определить параметры и выходные данные двигателя на нерасчетном режиме (соответственно для ТРДД, ТВД и ТВВД на взлетном, а ТВАд – на крейсерском полетном режимах) для того, чтобы дать предварительную оценку эффективности применения ГТД на заданном ЛА.

Основные методические положения и числовые примеры дают представление о широко применяемых методах расчета и о порядке величин параметров современных авиационных ГТД.

В данной работе, как и в учебном пособии [1], для высокотемпературных двигателей с пленочным охлаждением лопаток турбины в качестве расчетной температуры газа T_{Γ}^* принята температура в горловине 1-го СА турбины. Схема потока рабочего тела в этом случае с учетом охлаждающего воздуха показана на рис. В 1. При таком подходе можно определить значения температуры на выходе из камеры сгорания $T_{КС}^*$ и температуры перед первым рабочим колесом $T_{СА}^*$. При отсутствии пленочного охлаждения $T_{КС}^* = T_{\Gamma}^*$. При отсутствии охлаждения СА $T_{СА}^* = T_{\Gamma}^*$.

Примеры расчета подобраны таким образом, чтобы студент мог на их основе самостоятельно составить методики проектного расчета для других типов и схем ГТД (например, ТРД, одновального ТВД, одновального ТВАд и др.), а также методику

1. РАСЧЕТ ТРДД С РАЗДЕЛЬНЫМ ИСТЕЧЕНИЕМ ИЗ КОНТУРОВ

В разделе приводятся примеры проектного расчета ТРДД с раздельным истечением в условиях крейсерского полета и расчета этого двигателя в условиях взлета. Схема двигателя приведена на рис. 1.1.

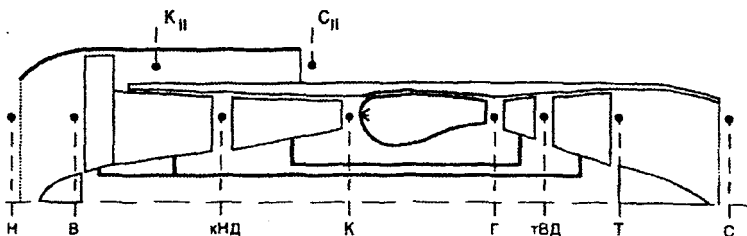


Рис. 1.1. Схема ТРДД с раздельным выхлопом

1.1. Исходные данные к расчету

В таблице 1.1 приведены необходимые исходные данные. Рассмотрен пример задания на курсовую (дипломную) работу по проектированию ТРДД с раздельным истечением.

Заданные режимы работы двигателя:

$P_{\text{дв.взл}} = 99 \text{ кН}$ при $H_{\text{п}} = 0$, $M_{\text{п}} = 0$, САУ;

$P_{\text{дв.кр}} = 20,4 \text{ кН}$ в условиях полета $H_{\text{п}} = 11 \text{ км}$, $M_{\text{п}} = 0,8$, САУ.

Заданный прототип двигателя – ТРДД TF-34-GE-2 [9].

Заданный прототип ЛА – Боинг 737-300 [10].

Расчетная дальность полета ЛА – $L_{\text{п}} = 3500 \text{ км}$.

Ограничения:

максимальная температура газа перед турбиной $T_{\text{г max}}^* \leq 1560 \text{ К}$;

удельные затраты топлива ЛА $C_{\text{т.км}} \leq 0,30 \text{ кг / т} \cdot \text{км}$.

Таблица 1.1

Вариант исходных данных к расчету ТРДД

Параметры	Значения параметров	
	$H=11, M_{\Pi}=0,8; P_{\text{дв.кр}}=20,4 \text{ кН}$	$H=0, M_{\Pi}=0, P_{\text{дв.взл}}=99 \text{ кН}^{*)}$
$T_{\Gamma}^*, \text{ К}$	1400	1560
m	6,1	6,16
$\bar{G}_{\text{в пр кНД}}$	1,0	0,94
$\pi_{\text{к}\Sigma}$	23	20,79
$\pi_{\text{в}}$	1,68	1,6
$\Pi_{\text{в}}$	0,875	0,884
$\pi_{\text{к НД}}$	1,504	1,43
$\eta_{\text{к НД}}$	0,853	0,862
$\pi_{\text{к ВД}}$	15,3	14,54
$\eta_{\text{к ВД}}$	0,848	0,848
$\eta_{\text{т ВД}}$	0,907	0,907
$\eta_{\text{т НД}}$	0,92	0,902
$a, \text{ м/с}$	295,07	340,28
$\sigma_{\text{вх}} = 1,0$	$\eta_{\text{м НД}} = 0,995$	$V_{\text{охл пл са вл}} = 0,96$
$\sigma_{\text{кс}} = 0,945$	$\Phi_{\text{с I}} = 0,99$	$V_{\text{охл са вл}} = 0,98$
$\eta_{\Gamma} = 0,99$	$\Phi_{\text{с II}} = 0,995$	$V_{\text{охл рк вл}} = 0,975$
$\eta_{\text{м НД}} = 1,0$	$\sigma_{\text{II}} = 0,99$	$V_{\text{ут вл}} = 0,995$
$V_{\text{охл пл са нд}} = 1,0$	$V_{\text{охл са нд}} = 0,98$	$V_{\text{охл рк нд}} = 1,0$
		$V_{\text{ут нд}} = 1,0$

*) Значения величин в этой колонке получены путем пересчета соответствующих проектных данных по рекомендациям учебного пособия [1], см. раздел табл. 1.2 "Предварительная оценка исходных данных ТРДД б/см для расчета взлетного режима", с.23...24.

1.2. Проектный расчет ТРДД с раздельным истечением для условий крейсерского полета

Проектный расчет выполняется при $G_{в\Sigma} = 1 \text{ кг/с}$

Таблица 1.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Входное устройство		
$V_{п} = M_{п} \cdot a$	$0,8 \cdot 295,07 = 236,1 \text{ м/с}$	
$T_{н}$ $p_{н}$	216,7 К 22,766 кПа	МСА (приложение 2) [5, с. 170]
$i_{н}$ $\pi(T_{н})$	216,9 кДж/кг 0,447	$\pi - i - T^{1)}$, по величине $T_{н}$
$i_{н}^* = i_{н} + \frac{V_{п}^2}{2000}$	$216,9 + \frac{236,1^2}{2000} = 244,77 \text{ кДж / кг}$	
$\pi(T_{н}^*)$	0,6811	$\pi - i - T$, по значению $i_{н}^*$
$p_{н}^* = p_{н} \cdot \frac{\pi(T_{н}^*)}{\pi(T_{н})}$	$22,766 \cdot \frac{0,6815}{0,4470} = 34,69 \text{ кПа}$	
$T_{н}^*$	244,64 К	$\pi - i - T$, по значению $i_{н}^*$
$G'_{в\Sigma}^{2)}$	1 кг/с	принимается для проектного расчета
$\bar{G}_{в \text{ пр}}$	1,0	принимается для проектного расчета
Вентилятор (компрессор наружного контура)		
$\bar{p}_{в \text{ пр}}$	1,0	принимается
m	6,1	табл. 1.1

¹⁾ Здесь и далее $\pi - i - T$ — диаграммы термодинамических функций для воздуха $\alpha = \infty$ и газа $\alpha = 4$ (см. приложение 1)

²⁾ Верхний индекс "*" означает, что данный параметр определен для $G_{в\Sigma} = 1 \text{ кг/с}$.

Продолжение табл.1.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$G'_{вII} = G'_{в} \Sigma \frac{m}{1+m}$	$1 \cdot \frac{6,1}{1+6,1} = 0,8592 \text{ кг/с}$	
$\pi_{в}$	1,68	табл.1.1
$\eta_{в}$	0,875	табл.1.1
$P_{кII}^* = P_{н}^* \cdot \pi_{в}$	$34,69 \cdot 1,68 = 58,14 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{кII}^*) = \pi(T_{н}^*) \cdot \pi_{в}$	$0,6811 \cdot 1,68 = 1,1424$	
$i_{кII}^*$	284,38 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{кII}^*)$
$L_{вII} = \frac{i_{кII}^* - i_{н}^*}{\eta_{в}}$	$\frac{284,38 - 244,77}{0,875} = 44,67 \text{ кДж/кг}$	
$i_{кII}^* = i_{н}^* + L_{вII}$	$244,77 + 44,67 = 289,34 \text{ кДж/кг}$	
$T_{кII}^*$	289,1 К	$\pi - i - T$ по $i_{кII}^*$
$N_{кII} = G'_{вII} \cdot L_{вII}$	$0,8592 \cdot 44,67 = 38,38 \text{ кВт}$	
Компрессор низкого давления		
$G'_{вI} = G'_{в} \Sigma \frac{1}{1+m}$	$1 \cdot \frac{1}{1+6,1} = 0,1408 \text{ кг/с}$	
$\pi_{кНД}$	1,504	табл.1.1
$\eta_{кНД}$	0,853	табл.1.1
$P_{кНД}^* = P_{н}^* \cdot \sigma_{вх} \cdot \pi_{кНД}$	$34,69 \cdot 1 \cdot 1,504 = 52,05 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{кНД}^*) = \pi(T_{н}^*) \cdot \pi_{кНД}$	$0,6811 \cdot 1,504 = 1,023$	
$i_{кНД}^*$	275,0 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{кНД}^*)$

Продолжение табл. 1.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$L_{кнд} = \frac{i_{кндс}^* - i_n^*}{\eta_{кнд}}$	$\frac{275,0 - 244,77}{0,853} = 35,43 \text{ кДж/кг}$	
$i_{кнд}^* = i_n^* + L_{кнд}$	$244,77 + 35,43 = 280,19 \text{ кДж/кг}$	
$T_{кнд}^*$	279,9 К	$\pi - i - T$ по $i_{кнд}^*$
$\pi(T_{кнд}^*)$	1,084	
$N_{кнд} = G_{в1} \cdot L_{кнд}$	$0,1408 \cdot 35,43 = 4,988 \text{ кВт}$	
Компрессор высокого давления		
$\bar{G}_{в пр к в д}$	1,0	принимается
$\pi_{к в д}$	15,3	табл. 1.1
$\eta_{к в д}$	0,848	табл. 1.1
$P_k^* = P_{кнд}^* \cdot \pi_{к в д}$	$52,05 \cdot 15,3 = 796,4 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{кс}^*) = \pi(T_{кнд}^*) \cdot \pi_{к в д}$	$1,084 \cdot 15,3 = 16,58$	
$i_{кс}^*$	610,92 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{кс}^*)$
$L_{к в д} = \frac{i_{кс}^* - i_{кнд}^*}{\eta_{к в д}}$	$\frac{610,92 - 280,1}{0,848} = 390,1 \text{ кДж/кг}$	
$i_k^* = i_{кнд}^* + L_{к в д}$	$280,19 + 380,1 = 670,29 \text{ кДж/кг}$	
T_k^*	659,7 К	$\pi - i - T$ по i_k^*
$i_{к \alpha=1}^*$	709 кДж/кг	по T_k^* [4, с.50] или прилож 3
$N_{к в д} = G'_{в1} \cdot L_{к в д}$	$0,1408 \cdot 390,1 = 54,93 \text{ кВт}$	

Продолжение табл. 1.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Камера сгорания		
T_r^*	1400 К	табл. 1.1
η_r	0,99	табл. 1.1
$\sigma_{кс}$	0,945	табл. 1.1
i_r^*	1549,27 кДж/кг	по $T_r^* = 1400$ К $\pi - i - T$ для $\alpha = 4$
$\pi(T_r^*)$	519,35	по $T_r^* = 1400$ К $\pi - i - T$ для $\alpha = 4$
$H_u = H_{u0} + L_0(i_k^* - i_{293})_{\alpha=\infty} - (1 + L_0)(i_k^* - i_{293})_{\alpha=1}$	$42900 + 14,78(670,29 - 293,32) - (1 + 14,78)(709,15 - 302,93) = 42061,4$ кДж/кг	
$i_{r\alpha=1}^*$	1646 кДж/кг	[4, с.50] или прилож.3 по $T_r^* = 1400$ К
$i_{r\alpha=\infty}^*$	1512,43 кДж/кг	$\pi - i - T$ по T_r^* , $\alpha = \infty$
$i_{293\alpha=1}^*$	302,93 кДж/кг	[4, с.50] или прилож. 3 по $T = 293$ К
$i_{293\alpha=\infty}^*$	295,18 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $T = 293$ К $\alpha = \infty$
$q_m = \frac{(i_r^* - i_k^*)_{\alpha=\infty}}{H_u \cdot \eta_r - (1 + L_0)(i_r^* - i_k^*)_{\alpha=1} + L_0(i_r^* - i_k^*)_{\alpha=\infty}} =$	$\frac{1512,43 - 670,29}{42061,4 \cdot 0,99 - (1 + 14,78)(1646,1 - 709) + 14,78(1512 - 670,29)} = 0,0214$	проверить по номограмме $q_m = f(T_r^*, T_k^*)$ [1, с.43] [4, с.124...126]

Продолжение табл.1.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$v_{\text{охл } \Sigma \text{ ВД}} = 1 - [(1 - v_{\text{пл СА ВД}}) + (1 - v_{\text{СА ВД}}) + (1 - v_{\text{рк ВД}}) + (1 - v_{\text{ут ВД}})] =$ $= 1 - [(1 - 0,98) + (1 - 0,975) + (1 - 0,995)] =$	0,95	При расчете этой величины принимается $v_{\text{пл СА ВД}} = 1$
$v_{\text{охл } \Sigma \text{ НД}} = 1 - [(1 - v_{\text{пл СА НД}}) + (1 - v_{\text{охл СА НД}}) + (1 - v_{\text{рк НД}}) + (1 - v_{\text{ут НД}})] =$ $= 1 - [(1 - 1) + (1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1)] =$	0,98	
$v_{\text{охл } \Sigma} = 1 - [(1 - v_{\text{охл } \Sigma \text{ ВД}}) + (1 - v_{\text{охл } \Sigma \text{ НД}})] =$ $= 1 - [(1 - 0,95) + (1 - 0,98)] =$	0,93	
$G'_{\text{в КС}} = G'_{\text{в л}} - (1 - v_{\text{охл } \Sigma}) \cdot G'_{\text{в л}} =$ $= 0,1408 - (1 - 0,93) \cdot 0,1408 =$	0,1309 кг/с	
$G'_{\text{м с}} = q_{\text{м}} \cdot G'_{\text{в КС}} = 0,0214 \cdot 0,1309 =$	0,002802 кг/с	
$G'_{\text{м ч}} = 3600 \cdot G'_{\text{м с}} = 3600 \cdot 0,002802 =$	10,11 кг/ч	
$G'_{\text{г КС}} = G'_{\text{в КС}} + G'_{\text{м с}} = G'_{\text{г ВД}} = 0,1309 + 0,002802 = 0,1338 \text{ кг/с}$		
$i_{\text{КС}}^* = \frac{G'_{\text{г КС}} \cdot i_{\text{г}}^* - i_{\text{к}}^* \alpha = \infty (1 - v_{\text{пл СА ВД}}) \cdot G'_{\text{в л}}}{G'_{\text{г КС}} - G'_{\text{в л}} (1 - v_{\text{пл СА ВД}})} =$ $= \frac{0,1338 \cdot 1549,27 - 670,29 (1 - 0,96) \cdot 0,1408}{0,1338 - 0,1408 (1 - 0,96)} = \frac{203,36}{0,12807} =$	1587,88 кДж/кг	определяется при наличии пленочного охлаждения ($v_{\text{пл СА НД}} \neq 1$)

Продолжение табл. 1.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
T_{KC}^*	1430 К	$\pi - i - T$ по i_{KC}^*
$i_{CA}^* = \frac{G'_{Г KC} \cdot i_{Г}^* + i_{К}^* (1 - v_{CA ВД}) \cdot G'_{В I}}{G'_{Г KC} + (1 - v_{CA ВД}) \cdot G'_{В I}} =$ $= \frac{0,1338 \cdot 1549,27 + 670,29 (1 - 0,98) \cdot 0,1405}{0,1338 + (1 - 0,98) \cdot 0,1408} =$	1531,28 кДж/кг	
T_{CA}^*	1384,8 К	$\pi - i - T$ по i_{CA}^*
$\alpha_{KC} = \frac{1}{q_m L_0}$	$\frac{1}{0,0214 \cdot 14,78} = 3,16$	
$p_r^* = p_k^* \cdot \sigma_{KC}$	796,4-0,945 = 753 кПа	
Турбина высокого давления		
$N_{ТВД} = N_{кВД} / \eta_{мВД}$	54,93 / 0,995 = 55,26 кВт	
$G'_{Г ТВД} = G'_{Г KC} + G'_{В I} [(1 - v_{CA ВД}) + (1 - v_{ГК ВД}) +$ $+ (1 - v_{УТ ВД}) + (1 - v_{пл СА НД})] = G'_{Г НД} =$ $= 0,1338 + 0,1408 [(1 - 0,98) + (1 - 0,975) +$ $+ (1 - 0,995) + (1 - 1)] =$	0,1408 кг/с	
$\eta_{ТВД}$	0,907	табл. 1.1
$L_{ТВД} = \frac{N_{ТВД}}{G'_{Г ВД}}$	$\frac{55,26}{0,1338} = 412,7$ кДж / кг	
$i_{ТВДс}^* = i_{Г}^* - \frac{L_{ТВД}}{\eta_{ТВД}} = 1549,27 - \frac{412,7}{0,907} =$	1094,25 кДж / кг	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\pi(T_{\tau \text{ВД}}^*)$	139	$\pi - i - T$ по $i_{\tau \text{ВД}}^*$
$\pi_{\tau \text{ВД}} = \frac{\pi(T_{\tau}^*)}{\pi(T_{\tau \text{ВД}}^*)}$	$\frac{519,35}{130} = 3,721$	
$p_{\tau \text{ВД}}^* = p_{\tau}^* / \pi_{\tau \text{ВД}}$	$753 / 3,721 = 202,4 \text{ кПа}$	
$i_{\tau \text{ВД}} = \frac{(i_{\tau} - L_{\tau \text{ВД}}) \cdot G'_{\tau \text{КС}} + i_{\text{к}} \cdot G'_{\text{в л}} \left[(1 - v_{\text{СА ВД}}) + (1 - v_{\text{РК ВД}}) + (1 - v_{\text{УТ ВД}}) + (1 - v_{\text{пл СА ИД}}) \right]}{G'_{\tau \text{ВД}}} = \frac{(1549,27 - 412,7) \cdot 0,1337 + 670,29 \cdot 0,1408 [(1 - 0,98) + (1 - 0,975) + (1 - 0,995) + (1 - 1)]}{0,1408} = 1118,3 \text{ кДж/кг}$		
$T_{\tau \text{ВД}}^*$	1044 К	$\pi - i - T$ по $i_{\tau \text{ВД}}^*$
$\pi(T_{\tau \text{ВД}}^*)$	150,7	$\pi - i - T$ по $i_{\tau \text{ВД}}^*$
$A'_{\tau \text{ВД}} = \frac{G'_{\tau \text{КС}} \cdot \sqrt{R_{\tau} \cdot 10^3 \cdot T_{\tau}^*}}{p_{\tau \text{ВД}}^* \cdot 10^3}$	$\frac{0,1338 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1400}}{753 \cdot 10^3} = 1,129 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\bar{n}_{\tau \text{ВД}} = \sqrt{T_{\tau}^* / T_{\text{ГР}}^*}$	$\sqrt{1400 / 1400} = 1,0$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Турбина низкого давления		
$N_{\text{ТНД}} = \frac{N_{\text{кП}} + N_{\text{кНД}}}{\eta_{\text{мНД}}}$	$\frac{38,38 + 4,988}{1,0} = 43,4 \text{ кВт}$	
$G'_{\text{ГТ}} = G'_{\text{ГНД}} + G'_{\text{ВЛ}} \left[(1 - v_{\text{сАНД}}) + (1 - v_{\text{РКНД}}) + (1 - v_{\text{УТНД}}) \right] =$ $= G'_{\text{ВЛ}} (1 + q_{\text{м}} \cdot v_{\text{охл } \Sigma}) = G'_{\text{Гс}} =$ $= 0,1408 + 0,1408 [(1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1)] = 0,1436 \text{ кг/с}$		
$\eta_{\text{ТНД}}$	0,92	табл. 1.1
$L_{\text{ТНД}} = \frac{N_{\text{ТНД}}}{G_{\text{ГНД}}}$	$\frac{43,4}{1,408} = 308 \text{ кДж / кг}$	
$i_{\text{Тс}}^* = i_{\text{ТВД}}^* - \frac{L_{\text{ТНД}}}{\eta_{\text{ТНД}}}$	$1118,3 - \frac{308}{0,92} = 783 \text{ кДж / кг}$	
$\pi(T_{\text{Тс}}^*)$	40,86	$\pi - i - T$ по $i_{\text{Тс}}^*$
$\pi_{\text{ТНД}} = \frac{\pi(T_{\text{ТВД}}^*)}{\pi(T_{\text{Тс}}^*)}$	$\frac{150,7}{40,86} = 3,688$	
$p_{\text{Т}}^* = p_{\text{ТВД}}^* / \pi_{\text{ТНД}}$	$\frac{202,4}{3,688} = 54,87 \text{ кПа}$	
$i_{\text{Т}}^* = \frac{(i_{\text{ТВД}}^* - L_{\text{ТНД}}) \cdot G'_{\text{ГНД}} + i_{\text{к}}^* \cdot G'_{\text{ВЛ}} \left[(1 - v_{\text{сАНД}}) + (1 - v_{\text{РКНД}}) + (1 - v_{\text{УТНД}}) \right]}{G'_{\text{ГТ}}}$ $= \frac{(1118,3 - 308) \cdot 0,1408 + 670 \cdot 0,1408 [(1 - 0,98) + (1 - 0,975) + (1 - 1)]}{0,1436} = 809,34 \text{ кДж/кг}$		

Продолжение табл. 1.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
T_T^*	776,1 К	$\pi - i - T$ по i_T^*
$\pi(T_T^*)$	45,92	$\pi - i - T$ по i_T^*
$A'_{ТНД} = \frac{G'_{ГНД} \cdot \sqrt{R \cdot 10^3 \cdot T_{ТВД}^*}}{P_{ТВД}^* \cdot 10^3}$	$\frac{0,1408 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1044}}{202,4 \cdot 10^3} = 3,818 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\bar{n}_{ТНД} = \bar{n}_{в пр} \cdot \sqrt{\frac{T_{ТН}^*}{T_{ТНр}^*}}$	$1,0 \cdot \sqrt{\frac{244,6}{244,6}} = 1,0$	
Соотношение внутреннего контура		
$\pi_{c1} = \frac{P_T^* \cdot \sigma_1}{P_H}$	$\frac{54,87 \cdot 1,00}{22,7} = 2,417$	$\pi_{c1} = 2,417 >$ $> \pi_{с кр} = 1,85$
Φ_{c1}	0,99	табл. 1.1
$a_{кр} = 18,1 \cdot \sqrt{T_T^*}$	$18,1 \cdot \sqrt{776,1} = 505,56 \text{ м/с}$	
$C_c = \Phi_{c1} \cdot a_{кр}$	$0,99 \cdot 504,24 = 500,5 \text{ м/с}$	
$C_{cs} = C_c / \Phi_{c1}$	$505,5 / 0,99 = 505,56 \text{ м/с}$	
$\lambda_c = C_c / a_{кр}$	$505,5 / 505,56 = 0,99$	
$q(\lambda_c)$	1	табл. ГДФ ¹⁾ $\kappa = 1,33$
$\lambda_{Cs} = \lambda_c / \Phi_{c1}$	$0,99 / 0,99 = 1,0$	
$\pi(\lambda_c)$	0,5476	табл. ГДФ $\kappa = 1,33$
$\pi(\lambda_{Cs}) = \pi(\lambda_{кр})$	0,5404	табл. ГДФ $\kappa = 1,33$

¹⁾ Здесь и далее "табл. ГДФ" – таблицы газодинамических функций для воздуха $\kappa = 1,4$ и газа $\kappa = 1,33$ (см. Приложение 4).

Продолжение табл. 1.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\sigma_c = \frac{\pi(\lambda_{cs})}{\pi(\lambda_c)}$	$\frac{0,5404}{0,5476} = 0,987$	
$G'_{rc} = G'_{в1} (1 + q_m \cdot V_{охл \Sigma})$	$0,1408 \cdot (1 + 0,0214 \cdot 0,93) = 0,1436 \text{ кг/с}$	
$\mu F'_c = \frac{G'_{rc} \cdot \sqrt{T_T^*} = T_c^*}{m_T P_T^* \cdot \sigma_c \cdot q(\lambda_c)}$	$\frac{0,1436 \cdot \sqrt{776,1}}{39,7 \cdot 54,87 \cdot 0,987 \cdot 1,0} = 18,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\pi_{с кр} = \frac{1}{\pi(\lambda_{кр})}$	$\frac{1}{0,5404} = 1,85$	
$p_c = p_T^* / \pi_{с кр}$	$\frac{54,87}{1,85} = 29,52 \text{ кПа}$	
$p_c \downarrow p_n$	$29,52 - 22,7 = 6,82 \text{ кПа}$	
Сопло наружного контура		
$\pi_{с II} = \frac{p_{к II}^* \cdot \sigma_{II}}{p_n}$	$\frac{58,14 \cdot 0,99}{22,7} = 2,305$	$\pi_{с II} = 2,305 > \pi_{с кр} = 1,89$
$\varphi_{с II}$	0,995	табл. 1.1
$a_{кр II} = 18,3 \cdot \sqrt{T_{к II}^*}$	$18,3 \cdot \sqrt{289,1} = 311,15 \text{ м/с}$	
$C_{с II} = \varphi_{с II} \cdot a_{кр II}$	$0,995 \cdot 311,15 = 309,7 \text{ м/с}$	
$C_{с II s} = a_{кр II}$	311,15 м/с	
$\lambda_{с II} = C_{с II} / a_{кр II}$	$309,7 / 311,15 = 0,995$	
$q(\lambda_{с II})$	1,0	табл. ГДФ к = 1,4

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\lambda_{c \text{ с II}}$	1,0	
$\pi(\lambda_{c \text{ II}})$	0,5345	табл. ГДФ к = 1,4
$\pi(\lambda_{c \text{ II с}})$	0,5283	табл. ГДФ к = 1,4
$\sigma_{c \text{ II}} = \frac{\pi(\lambda_{c \text{ с II}})}{\pi(\lambda_{c \text{ II}})}$	$\frac{0,5283}{0,5315} = 0,993$	
$\mu F'_{c \text{ II}} = \frac{G'_{\text{в II}} \cdot \sqrt{T_{к \text{ II}}^*}}{m_{\text{в}} p_{к \text{ II}}^* \cdot \sigma_{c \text{ II}} \cdot q(\lambda_{c \text{ II}})}$	$\frac{0,8592 \cdot \sqrt{289,1}}{40,4 \cdot 58,14 \cdot 0,999 \cdot 1,0} = 65,41 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\pi_{c \text{ кр}} = \frac{1}{\pi(\lambda_{\text{кр}})}$	$\frac{1}{0,5404} = 1,85$	
$p_{c \text{ II}} = p_{к \text{ II}}^* / \pi_{c \text{ кр}}$	$\frac{58,14}{1,85} = 30,01 \text{ кПа}$	
$p_{c \text{ II}} - p_{\text{н}}$	$30,01 - 22,7 = 7,31 \text{ кПа}$	
Удельные параметры двигателя		
$P_{\text{уд I}} = (G'_{\text{гс}} \cdot C_{\text{с}} - G'_{\text{в I}} \cdot V_{\text{п}}) \cdot 10^{-3} + F'_{c \text{ I}} (p_{c \text{ I}} - p_{\text{н}})$	$(0,1436 \cdot 500,5 - 0,1408 \cdot 236,1) \cdot 10^{-3} + 18,53 \cdot 10^{-4} \cdot 6,82 = 0,0514 \text{ кН} \cdot \text{с} / \text{кг}$	
$P_{\text{уд II}} = G'_{\text{в II}} (C_{c \text{ II}} - V_{\text{п}}) \cdot 10^{-3} + F'_{c \text{ II}} (p_{c \text{ II}} - p_{\text{н}})$	$0,8592 (309,7 - 236,1) \cdot 10^{-3} + 65,41 \cdot 10^{-3} \cdot 7,31 = 0,1111 \text{ кН} \cdot \text{с} / \text{кг}$	
$P_{\text{уд}} = P_{\text{уд I}} + P_{\text{уд II}}$	$0,0514 + 0,1111 = 0,1625 \text{ кН} \cdot \text{с} / \text{кг}$	
$C_{\text{уд}} = G'_{\text{т}} / P_{\text{уд}}$	$10,11 / 0,1625 = 62,21 \text{ кг} / \text{кН} \cdot \text{ч}$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Основные проектные данные двигателя при $P_{\text{дв кр}} = 20,4$ кН		
$G_{\text{в } \Sigma \text{ p}} = \frac{P_{\text{дв кр}}}{P_{\text{уд}}}$	$\frac{20,4}{0,1625} = 125,5 \text{ кг/с}$	
$G_{\text{т ч}} = C_{\text{уд}} \cdot P_{\text{дв}}$	$62,21 \cdot 20,4 = 1269 \text{ кг/ч}$	
$F_{\text{вх}} = \frac{G_{\text{в } \Sigma \text{ p}} \cdot \sqrt{T_{\text{в}}^*}}{40,4 \cdot P_{\text{в}}^* \cdot q(\lambda_{\text{в}})}$	$\frac{125,5 \cdot \sqrt{244,6}}{40,4 \cdot 34,61 \cdot 0,875} = 1,604 \text{ м}$	$q(\lambda_{\text{т}}) = 0,875$ принята по табл. 2.1 [1]
$A_{\text{т в д}} = A'_{\text{т в д}} \cdot G_{\text{в } \Sigma \text{ p}}$	$1,129 \cdot 10^{-4} \cdot 125,5 = 141,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$A_{\text{т н д}} = A'_{\text{т н д}} \cdot G_{\text{в } \Sigma \text{ p}}$	$3,818 \cdot 10^{-4} \cdot 125,5 = 479,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\mu F_{\text{с I}} = \mu F'_{\text{с I}} \cdot G_{\text{в } \Sigma \text{ p}}$	$18,53 \cdot 10^{-4} \cdot 125,5 = 0,2326 \text{ м}^2$	
$\mu F_{\text{с II}} = \mu F'_{\text{с II}} \cdot G_{\text{в } \Sigma \text{ p}}$	$65,41 \cdot 10^{-4} \cdot 125,5 = 0,8209 \text{ м}^2$	
$G_{\text{в II}} = G'_{\text{в II}} \cdot G_{\text{в } \Sigma \text{ p}}$	$0,8592 \cdot 125,5 = 107,8 \text{ кг/с}$	
$G_{\text{в I}} = G'_{\text{в I}} \cdot G_{\text{в } \Sigma \text{ p}}$	$0,1408 \cdot 125,5 = 17,67 \text{ кг/с}$	
$G_{\text{т в д}} = G'_{\text{т в д}} \cdot G_{\text{в } \Sigma \text{ p}}$	$0,1338 \cdot 125,5 = 16,79 \text{ кг/с}$	
$G_{\text{т н д}} = G'_{\text{т н д}} \cdot G_{\text{в } \Sigma \text{ p}}$	$0,1408 \cdot 125,5 = 17,67 \text{ кг/с}$	
$G_{\text{т с}} = G'_{\text{т с}} \cdot G_{\text{в } \Sigma \text{ p}}$	$0,1436 \cdot 125,5 = 18,02 \text{ кг/с}$	
$D_{\text{дв}} = \bar{D} \left[\frac{4 F_{\text{вх}}}{\pi (1 - \bar{d}_{1\kappa}^2)} \right]^{0,5}$	$1,05 \left[\frac{4 \cdot 1,604}{3,14 \cdot (1 - 0,32^2)} \right]^{0,5} = 1,584 \text{ м}$	где $\bar{D} = \frac{D_{\text{дв}}}{D_{1\kappa}} =$ 1,03...1,15 $\bar{d}_{1\kappa} = 0,3...0,5$ [1, с. 71]

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Предварительная оценка исходных параметров ТРДД б/см для расчета взлетного режима		
$\bar{P}_{\text{дв кр}} = P_{\text{дв кр}} / P_{\text{дв взл}}$	20,4 / 99 = 0,206	$P_{\text{дв кр}}, P_{\text{дв взл}}$ задаются в табл. 1.1
$\bar{T}_T^* = T_{T \text{ взл}}^* / T_{T \text{ кр}}^*$	1,11	см. рис. 3.6. [1, с. 70] по $m = 6,1$ и $\bar{P} = 0,206$
$\bar{\pi}_B = \pi_{B \text{ взл}} / \pi_{B \text{ кр}}$	0,95	там же
$\bar{\eta}_B = \eta_{B \text{ взл}} / \eta_{B \text{ кр}}$	1,01	рис. 2.1 [1, с. 37] по $\bar{G}_{B \text{ пр кнд}}$ и π_B
$\bar{\pi}_{\text{к нд}} = \pi_{\text{к нд взл}} / \pi_{\text{к нд кр}}$	0,95	рис. 3.6. [1, с. 70] по $m = 6,1$ и $\bar{P} = 0,206$
$\bar{\pi}_{\text{к вл}} = \pi_{\text{к вл взл}} / \pi_{\text{к вл кр}}$	0,95	там же
$\bar{m} = m_{\text{взл}} / m_{\text{кр}}$	1,01	там же
$\bar{G}_{B \text{ пр}} = G_{B \text{ пр взл}} / G_{B \text{ пр кр}} = \bar{G}_{B \text{ пр кнд}}$	0,94	там же
$\bar{\eta}_{\text{к нд}} = \eta_{\text{к нд взл}} / \eta_{\text{к нд кр}}$	0,99	рис. 2.1 [1, с. 37]
$\bar{\eta}_{\text{т нд}} = \eta_{\text{т нд взл}} / \eta_{\text{т нд кр}}$	0,991	рис. 3.6. [1, с. 70]
$\bar{G}_{B \text{ пр кнд}} = \frac{\bar{G}_{B \text{ пр}}}{\pi_{\text{кнд}}^{0,857}} \cdot \frac{1 + m_{\text{кр}}}{1 + m \cdot m_{\text{кр}}}$	$\frac{0,94}{0,95^{0,857}} \cdot \frac{1 + 6,1}{1 + 1,01 \cdot 6,1} = 0,974$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\bar{\eta}_{к вД} = \eta_{к вД вЗл} / \eta_{к вД кр}$	1,002	рис.2.1 [1, с.37] по $\bar{G}_{в пр кВД}$ и $\pi_{кВД}$
$\bar{n}_{пр} = n_{пр вЗл} / n_{пр кр}$	0,952	рис.2.1 [1, с.37] по $\bar{G}_{в пр кВД}$ и $\pi_{кВД кр}$
$T_{г вЗл}^* = T_{г кр}^* \cdot \bar{T}_g^*$	$1400 \cdot 1,11 = 1560 \text{ К}$	В случае, если проектный расчет выполняется при $H = 0, M = 0$, эти величины задаются преподавателем в табл. 1.1
$m_{вЗл} = m_{кр} \cdot \bar{m}$	$6,1 \cdot 1,01 = 6,16$	
$\pi_{в вЗл} = \pi_{в кр} \cdot \bar{\pi}_в$	$1,68 \cdot 0,95 = 1,6$	
$\pi_{к нД вЗл} = \pi_{к нД кр} \cdot \bar{\pi}_{к нД}$	$1,504 \cdot 0,95 = 1,43$	
$\pi_{к вД вЗл} = \pi_{к вД кр} \cdot \bar{\pi}_{к вД}$	$15,3 \cdot 0,95 = 14,54$	
$\eta_{т вД вЗл} = \eta_{т вД кр} = \text{const}$	0,907	
$\eta_{т нД вЗл} = \eta_{т нД кр} \cdot \bar{\eta}_{т нД}$	$0,91 \cdot 0,991 = 0,902$	
$\eta_{в вЗл} = \eta_{в кр} \cdot \bar{\eta}_в$	$0,875 \cdot 1,01 = 0,884$	
$\eta_{к нД вЗл} = \eta_{к нД кр} \cdot \bar{\eta}_{к нД}$	$0,853 \cdot 0,99 = 0,862$	
$\eta_{к вД вЗл} = \eta_{к вД кр} \cdot \bar{\eta}_{к вД}$	$0,848 \cdot 1,002 = 0,85$	
$G_{в \Sigma вЗл} = G_{в \Sigma р} \cdot \frac{101,33}{P_n^*} \cdot \sqrt{\frac{T_n^*}{288,16}} \cdot \bar{G}_{в пр к нД} =$ $= 125,5 \cdot \frac{101,33}{36,61} \cdot \sqrt{\frac{244}{288,16}} \cdot 0,94 = 318,2 \text{ кг / с}$		Если расчет ТРДД при $H = 0, M = 0$ проводится после проектного, то он выполняется для $G_{в \Sigma вЗл}$. Если же проводится проектный расчет ТРДД при $H = 0, M = 0$, то он выполняется для $G_{в \Sigma вЗл} = 1 \text{ кг/с}$

1.3. Расчет ТРДД на взлетном режиме

Таблица 1.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Входное устройство		
$V_{\text{п}} = M_{\text{п}} \cdot a$	$0 \cdot 340,28 = 0$	$a = 340,28$ [5, с.169] или прилож. 2.
$T_{\text{н}}$	288,16 К	[5, с.169] или прилож. 2
$p_{\text{н}}$	101,33 кПа	[5, с. 169]
$i_{\text{н}}$ $\pi(T_{\text{н}})$	288,4 кДж/кг 1,207	$\pi - i - T$, по величине $T_{\text{н}}$
$i_{\text{н}}^* = i_{\text{н}}$, т.к. $V_{\text{п}} = 0$	288,4 кДж/кг	
$\pi(T_{\text{н}}^*) = \pi(T_{\text{н}})$, т.к. $V_{\text{п}} = 0$	1,207	
$p_{\text{н}}^* = p_{\text{н}} = p_{\text{в}}^*$	101,33 кПа	
$T_{\text{н}}^* = T_{\text{н}}$	288,16 К	
$G_{\text{в} \Sigma}$	318,2 кг/с	
Вентилятор (компрессор наружного контура)		
m	6,16	табл. 1.1
$G_{\text{вII}} = G_{\text{в} \Sigma} \cdot \frac{m}{1+m}$	$318,2 \cdot \frac{6,16}{1+6,16} = 273,76$ кг/с	
$\pi_{\text{в}}$	1,6	табл. 1.1
$\eta_{\text{в}}$	0,884	табл. 1.1
$p_{\text{кII}}^* = p_{\text{н}}^* \cdot \pi_{\text{в}}$	$101,33 \cdot 1,6 = 162,1$ кПа	
$\pi(T_{\text{кII}}^*) = \pi(T_{\text{н}}^*) \cdot \pi_{\text{в}}$	$1,207 \cdot 1,6 = 1,9312$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$i_{к\Pi s}^*$	330,86 кДж/кг	$\pi-i-T$ по $\pi(T_{к\Pi s}^*)$
$L_{в\Pi} = \frac{i_{к\Pi s}^* - i_n^*}{\eta_{в}}$	$\frac{330,86 - 288,4}{0,884} = 47,15$ кДж / кг	
$i_{к\Pi}^* = i_n^* + L_{в\Pi}$	$288,4 + 47,15 = 335,55$ кДж/кг	
$T_{к\Pi}^*$	335,1 К	$\pi-i-T$ по $i_{к\Pi}^*$
$\pi(T_{к\Pi}^*)$	2,028	$\pi-i-T$ по $i_{к\Pi}^*$
$N_{к\Pi} = G_{в\Pi} \cdot L_{в\Pi}$	$273,76 \cdot 47,15 = 12905$ кВт	
Компрессор низкого давления		
$G_{в1} = G_{в} \cdot \frac{1}{1+m}$	$318,2 \cdot \frac{1}{1+6,16} = 44,44$ кг / с	
$\pi_{кНД}$	1,43	табл. 1.1
$\eta_{кНД}$	0,862	табл. 1.1
$P_{кНД}^* = P_n^* \cdot \sigma_{вх} \cdot \pi_{кНД}$	$101,33 \cdot 1 \cdot 1,43 = 144,8$ кПа	
$\pi(T_{кНДs}^*) = \pi(T_n^*) \cdot \pi_{кНД}$	$1,207 \cdot 1,43 = 1,707$	
$i_{кНДs}^*$	319,62 кДж/кг	$\pi-i-T$ по $\pi(T_{кНДs}^*)$
$L_{кНД} = \frac{i_{кНДs}^* - i_n^*}{\eta_{кНД}}$	$\frac{319,62 - 288,4}{0,862} = 36,22$ кДж / кг	
$i_{кНД}^* = i_n^* + L_{кНД}$	$288,4 + 36,22 = 324,62$ кДж/кг	
$T_{кНД}^*$	324,2 К	$\pi-i-T$ по $i_{кНД}^*$
$\pi(T_{кНД}^*)$	1,802	$\pi-i-T$ по $i_{кНД}^*$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$N_{кнд} = G_{вI} \cdot L_{кнд}$	$44,44 \cdot 36,22 = 1609 \text{ кВт}$	
Компрессор высокого давления		
$\pi_{квд}$	14,54	
$\eta_{квд}$	0,848	
$P_k^* = P_{кнд}^* \cdot \pi_{квд}$	$144,8 \cdot 14,54 = 2107 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{кс}^*) = \pi(T_{кнд}^*) \cdot \pi_{квд}$	$1,802 \cdot 14,54 = 26,45$	
$i_{кс}^*$	696,22 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{кс}^*)$
$L_{квд} = \frac{i_{кс}^* - i_{кнд}^*}{\eta_{квд}}$	$\frac{696,22 - 324,62}{0,848} = 437,7 \text{ кДж/кг}$	
$i_k^* = i_{кнд}^* + L_{квд}$	$324,62 + 437,7 = 762,32 \text{ кДж/кг}$	
T_k^*	745,3 К	$\pi - i - T$ по i_k^*
$i_{к\alpha=1}^*$	810,2 кДж/кг	[4, с.50] или прилож.3
$N_{квд} = G_{вI} \cdot L_{квд}$	$44,44 \cdot 437,7 = 19449 \text{ кВт}$	
Камера сгорания		
$T_{г}^*$	1560 К	табл. 1.1
$i_{г\alpha=4}^*$	1749,8 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $T_{г}^*$ для $\alpha = 4$
$\pi(T_{г}^*)_{\alpha=4}$	831,4	$\pi - i - T$ по $T_{г}^*$ для $\alpha = 4$
$i_{г\alpha=1}^*$	1865,7 кДж/кг	[4, с.50] или прилож.3
$i_{г\alpha=\infty}^*$	1709 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $T_{г}^*$ для $\alpha = \infty$

$\equiv$ Параметр И формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$H_u = H_{u0} + L_0(i_k^* - i_{293}^*)_{\alpha=\infty} - (1 + L_0)(i_k^* - i_{293}^*)_{\alpha=1} =$ $= 42900 + 14,78(762,32 - 293,32) - (1 + 14,78)(810,2 - 302,93) =$ $= 41827,1 \text{ кДж/кг}$		для стандартного авиационного керосина $H_{u0} = 42900 \text{ кДж/кг}$
$q_m = \frac{(i_r^* - i_k^*)_{\alpha=\infty}}{H_u \cdot \eta_r - (1 + L_0)(i_r^* - i_k^*)_{\alpha=1} + L_0(i_r^* - i_k^*)_{\alpha=\infty}} =$ $= \frac{1709 - 762,32}{41827,1 \cdot 0,99 - (1 + 14,78)(1865,7 - 810,2) + 14,78(1709 - 762,32)} =$ $= \frac{946,68}{38744,97} = 0,0244$		проверить по номограмме $q_m = f(T_r^*, T_k^*)$ [1, с.43] [4, с.124...126]
$V_{охл \Sigma \text{ ВД}}$	0,95	см. проектный расчет
$V_{охл \Sigma \text{ НД}}$	0,98	см. проектный расчет
$V_{охл \Sigma}$	0,93	см. проектный расчет
$G_{в \text{ КС}} = G_{в \text{ I}} - (1 - v_{охл \Sigma}) \cdot G_{в \text{ I}} =$ $= 44,44 - (1 - 0,93) \cdot 44,44 =$	41,33 кг/с	
$G_{м \text{ с}} = q_m \cdot G_{в \text{ КС}} = 0,0244 \cdot 41,33 =$	1,00843 кг/с	
$G_{м \text{ ч}} = 3600 \cdot G_{м \text{ с}} = 3600 \cdot 1,00843 =$	3,626 кг/с	
$G_{г \text{ КС}} = G_{в \text{ КС}} + G_{м \text{ с}} = G_{г \text{ ВД}} = 41,33 + 0,00843 =$	42,33 кг/с	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$i_{KC}^* = \frac{G_{ГКС} \cdot i_{Г\alpha=4}^* - i_{К\alpha=\infty}^* (1 - v_{пл\text{ СА ВД}}) \cdot G_{В1}}{G_{ГКС} - G_{В1} (1 - v_{пл\text{ СА ВД}})} =$ $= \frac{42,33 \cdot 1749,8 - 762,32 (1 - 0,96) \cdot 44,44}{42,33 - 44,44 (1 - 0,96)} =$	1793,08 кДж/кг	
T_{KC}^*	1594,4 К	$\pi - i - T$ по i_{KC}^*
$i_{CA}^* = \frac{G_{ГКС} \cdot i_{Г}^* - i_{К}^* (1 - v_{СА ВД}) \cdot G_{В1}}{G_{ГКС} + (1 - v_{СА ВД}) \cdot G_{В1}} =$ $= \frac{42,33 \cdot 1749,8 + 762,32 (1 - 0,98) \cdot 44,44}{42,33 + (1 - 0,98) \cdot 44,44} =$	1729,478 кДж/кг	
T_{CA}^*	1543,8 К	$\pi - i - T$ по i_{CA}^*
$\alpha_{KC} = \frac{1}{q_m L_0}$	$\frac{1}{0,0244 \cdot 14,78} = 2,77$	
$P_{Г}^* = P_{К}^* \cdot \sigma_{KC}$	2107 · 0,945 = 1992 кПа	
Турбина высокого давления		
$N_{ТВД} = N_{КВД} / \eta_{м ВД}$	19449 / 0,995 = 12562 кВт	
$G_{ГТВД} = G_{ГКС} + G_{В1} [(1 - v_{СА ВД}) + (1 - v_{РК ВД}) +$ $+ (1 - v_{УТ В}) + (1 - v_{пл\text{ СА ВД}})] = G_{ГНД} =$ $= 42,387 + 44,44 [(1 - 0,98) + (1 - 0,975) +$ $+ (1 - 0,995) + (1 - 1)] =$	44,5 кг/с	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$L_{\text{ТВД}} = \frac{N_{\text{ТВД}}}{G_{\text{ТВД}}}$	$\frac{19562}{42,33} = 461,33 \text{ кДж/кг}$	
$i_{\text{ТВДС}}^* = i_{\text{г}}^* - \frac{L_{\text{ТВД}}}{\eta_{\text{ТВД}}} = 1749,8 - \frac{461,33}{0,907} =$	$1241,16 \text{ кДж/кг}$	
$\pi(T_{\text{ТВДС}}^*)$	223,19	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВДС}}^*$
$\pi_{\text{ТВД}} = \frac{\pi(T_{\text{г}}^*)}{\pi(T_{\text{ТВДС}}^*)}$	$\frac{831,4}{223,19} = 3,725$	
$p_{\text{ТВД}}^* = p_{\text{г}}^* / \pi_{\text{ТВД}}$	$1992 / 3,725 = 534,6 \text{ кПа}$	
$G_{\text{гТВД}} = G_{\text{гНД}} = G_{\text{гКС}} + G_{\text{в1}} [(1 - v_{\text{САВД}}) + (1 - v_{\text{РКВД}}) +$ $+ (1 - v_{\text{УТВД}}) + (1 - v_{\text{ПЛСАНД}})] =$ $= 42,287 + 44,44 [(1 - 0,98) + (1 - 0,975) + (1 - 0,995) + (1 - 1)]$	44,55 кг/с	
$i_{\text{ТВД}}^* = \frac{(i_{\text{г}}^* - L_{\text{ТВД}}) \cdot G_{\text{гКС}} + i_{\text{к}}^* \cdot G_{\text{в1}} [(1 - v_{\text{САВД}}) + (1 - v_{\text{РКВД}}) +$ $+ (1 - v_{\text{УТВД}}) + (1 - v_{\text{ПЛСАВД}})]}{G_{\text{гНД}}} = \frac{(1749,8 - 461,33) \cdot 42,33 + 762,32 \cdot 44,44 [(1 - 0,98) +$ $+ (1 - 0,975) + (1 - 0,995) + (1 - 1)]}{44,55} = 1269,2 \text{ кДж/кг}$		
$T_{\text{ТВД}}^*$	1170,4К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\pi(T_{ТВД}^*)$	233,45	$\pi - i - T$ по $i_{ТВД}^*$
$A_{ТВД} = \frac{G_{ГКС} \cdot \sqrt{R_{г} \cdot 10^3 \cdot T_{г}^*}}{p_{гВД}^* \cdot 10^3}$	$\frac{42,33 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1560}}{1992 \cdot 10^3} = 142,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной $A_{ТВД}$, определенной в предыдущем расчете
$\bar{n}_{ТВД} = \sqrt{T_{г}^* / T_{гР}^*}$	$\sqrt{1560 / 1400} = 1,05$	
Турбина низкого давления		
$N_{ТНД} = \frac{N_{КШ} + N_{КНД}}{\eta_{мНД}}$	$\frac{12905 + 1609}{1,0} = 14525 \text{ кВт}$	
$G_{ГТ} = G_{ГНД} + G_{ВЛ} [(1 - v_{САНД}) + (1 - v_{РКНД}) + (1 - v_{УТНД})] = G_{ГС} =$ $= 44,55 + 44,44 [(1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1)] = 45,55 \text{ кг/с}$		
$L_{ТНД} = \frac{N_{ТНД}}{G_{ГНД}}$	$\frac{14525}{44,55} = 325,8 \text{ кДж/кг}$	
$i_{ТС}^* = i_{ТВД}^* - \frac{L_{ТНД}}{\eta_{ТНД}}$	$1269,2 - \frac{325,8}{0,902} = 908 \text{ кДж/кг}$	
$\pi(T_{ТС}^*)$	69,81	$\pi - i - T$ по $i_{ТС}^*$
$\pi_{ТНД} = \frac{\pi(T_{ТВД}^*)}{\pi(T_{ТС}^*)}$	$\frac{233,45}{69,81} = 3,462$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$p_T^* = p_{ТВД}^* / \pi_{ТНД}$	$\frac{534,6}{3,462} = 154,4 \text{ кПа}$	
$i_T^* = \frac{(i_{ТВД}^* - L_{ТНД}) \cdot G_{ГНД} + i_K^* \cdot G_{ВЛ} [(1 - v_{САНД}) + (1 - v_{РКНД}) + (1 - v_{УГНД})]}{G_{ГТ}} =$ $= \frac{(1269,2 - 325,8) \cdot 44,55 + 762,32 \cdot 44,44 [(1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1)]}{45,45} = 943,33 \text{ кДж/кг}$		
T_T^*	894,1 К	$\pi - i - T$ по i_T^*
$\pi(T_T^*)$	80,32	$\pi - i - T$ по i_T^*
$A_{ТНД} = \frac{G_{ГНД} \cdot \sqrt{R \cdot 10^3 \cdot T_{ТВД}^*}}{p_{ТВД}^* \cdot 10^3}$	$\frac{44,55 \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1170,4}}{534,6 \cdot 10^3} = 483,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной $A_{ТНД}$ определенной в проектном расчете
$\bar{n}_{ТНД} = \bar{n}_{впр} \cdot \sqrt{\frac{T_{ТН}^*}{T_{Нр}^*}}$	$0,952 \cdot \sqrt{\frac{288,16}{244,6}} = 1,03$	
$G_{Гс} = G_{ГТНД}$	45,45 кг/с	
Сопло внутреннего контура		
$\pi_{с1} = \frac{p_{ТНД}^* \cdot \sigma_1}{p_{Н}}$	$\frac{154,4 \cdot 1,0}{101,33} = 1,524$	$\pi_{с1} = 1,524 < \pi_{скр} = 1,85$
$\pi(T_c) = \pi(T_T^*) / \pi_{с1}$	$80,32 / 1,524 = 52,7$	
i_c	840,75 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_c)$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$C_c = \varphi_c \cdot \sqrt{2(i_T^* - i_c)} \cdot 10^3$	$0,99 \cdot \sqrt{2(943,33 - 840,75)} \cdot 10^3 = 448,9 \text{ м/с}$	
$a_{кр} = 18,1 \cdot \sqrt{T_T^*}$	$18,1 \cdot \sqrt{894,1} = 541,2 \text{ м/с}$	
$\lambda_{cs} = C_c / a_{кр}$	$448,9 / 541,2 = 0,829$	
$q(\lambda_c)$	0,966	табл. ГДФ по λ_c , $\kappa = 1,33$
$\lambda_{cs} = \lambda_c / \varphi_c$	$0,829 / 0,99 = 0,839$	
$\pi(\lambda_c)$	0,6612	табл. ГДФ по λ_c , $\kappa = 1,33$
$\pi(\lambda_{cs})$	0,6542	табл. ГДФ по λ_{cs} , $\kappa = 1,33$
$\sigma_c = \frac{\pi(\lambda_{cs})}{\pi(\lambda_c)}$	$\frac{0,6542}{0,6612} = 0,99$	
$\mu F_c = \frac{G_{гс} \cdot \sqrt{T_T^*} = T_c^*}{m_{г} p_{тнл}^* \sigma_c \cdot q(\lambda_c)}$	$\frac{45,45 \cdot \sqrt{894,1}}{39,7 \cdot 154,4 \cdot 0,99 \cdot 0,966} = 0,2316 \text{ м}^2$	с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной μF_c , определенной в проектном расчете
$p_c - p_n$	0	для $p_c < p_{с кр}$
Сопло наружного контура		
$\pi_{сП} = \frac{p_{кП}^* \sigma_{П}}{p_n}$	$\frac{162,1 \cdot 0,99}{101,33} = 1,583$	$\pi_{сП} < \pi_{с кр}$

Продолжение табл. 1.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\pi(T_{c\Pi}) = \pi(T_{к\Pi}^*) / \pi_{c\Pi}$	2,028 / 1,583 = 1,28	
$i_{c\Pi}$	294,09 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{c\Pi})$
$C_c = \varphi_c \cdot \sqrt{2(i_{к\Pi}^* - i_{c\Pi})} \cdot 10^3$	$0,995 \cdot \sqrt{2(335,55 - 294,09) \cdot 10^3} =$ $= 283,5 \text{ м/с}$	
$a_{кр\Pi} = 18,3 \cdot \sqrt{T_{к\Pi}^*}$	$18,3 \cdot \sqrt{335} = 335 \text{ м/с}$	
$\lambda_{c\Pi} = C_c / a_{кр}$	283,5/335 = 0,846	
$q(\lambda_{c\Pi})$	0,971	табл. ГДФ, по $\lambda_{c\Pi} \cdot K = 1,4$
$\lambda_{c\Pi s} = \lambda_c / \varphi_c$	0,846 / 0,995 = 0,85	
$\pi(\lambda_{c\Pi})$	0,6418	табл. ГДФ по $\lambda_{c\Pi} \cdot K = 1,4$
$\pi(\lambda_{c\Pi s})$	0,6382	табл. ГДФ по $\lambda_{c\Pi s} \cdot K = 1,4$
$\sigma_c = \frac{\pi(\lambda_{c\Pi s})}{\pi(\lambda_{c\Pi})}$	$\frac{0,6382}{0,6418} = 0,9944$	
$\mu F_{c\Pi} = \frac{G_{в\Pi} \cdot \sqrt{T_{к\Pi}^*}}{m_{в\Pi} p_{к\Pi}^* \cdot \sigma_c \cdot q(\lambda_{c\Pi})}$	$\frac{273,76 \cdot \sqrt{335,1}}{40,4 \cdot 162,1 \cdot 0,9944 \cdot 0,971} = 0,8238 \text{ м}^2$ с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной $\mu F_{c\Pi}$, определенной в проектном расчете	
$p_c - p_H$	0	для $\pi_c < \pi_{с кр}$

Продолжение табл. 1.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Определение тяги и удельного расхода топлива		
$P_{взл} = (G_{гс I} \cdot C_{I} - G_{в II} \cdot C_{с II}) \cdot 10^{-3}$	$45,45 \cdot 448,9 + 273,76 \cdot 283,5 = 99 \text{ кН}$ (10092 кгс)	
$C_{уд} = G_{т ч} / P_{взл}$	$3626 / 99 = 36,6 \text{ кг/кН} \cdot \text{ч}$ (0,36 кг/кгс · ч)	
Расчет проектной величины массы двигателя		
$M_{дв} = (M_I + M_{II}) \cdot K_{рес} \cdot K_c$		[8, с. 31]
$M_I = B \cdot (G_{B I})_{пр.вент}^{m_1} \left[\left(\frac{\pi_{к \Sigma}}{\pi_{B I}} \right)^{0,281} - 1 \right]^{m_2} \cdot K_{T_r}$		
$(G_{B I})_{пр.вент} = G_{B I} \cdot \frac{1}{\pi_{B I}} \cdot \sqrt{1 + \left(\pi_{B I}^{0,286} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_{B I}}} =$ $44,44 \cdot \frac{1}{1,43} \cdot \sqrt{1 + \left(1,43^{0,286} - 1 \right) \cdot \frac{1}{0,884}} = 33,73 \text{ кг / с}$		
$K_{T_r} = 1 + 2 \cdot 10^{-4} (T_{г \text{ взл}}^* - 1200) = 1 + 2 \cdot 10^{-4} (1560 - 1200) = 1,072$		
B	15,2	[8, с.32, табл.2.2]
m_1	1	[8, с.32, табл.2.2]
m_2	0,5	[8, с.32, табл.2.2]
$M_I = 15,2 \cdot 33,73^1 \left[\left(\frac{20,8}{1,43} \right)^{0,286} - 1 \right]^{0,5} \cdot 1,072 = 589,46 \text{ кг}$		

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$M_{II} = 2,865 \cdot G_{B\Sigma \text{ вЗЛ}}^{0,903} \cdot m_{\text{вЗЛ}}^{0,104} \cdot \pi_B^{1,193} =$ $2,865 \cdot 318,2^{0,903} \cdot 6,16^{0,104} \cdot 1,6^{1,193} = 1103,14 \text{ кг}$		
$K_{\text{рес}}$	1,00	[1, с.78]
K_c	1,00	[1, с.78, рис.3.7].
$M_{\text{дв}} = (589,46 + 1103,14) \cdot 1,00 \cdot 1,00 = 1693 \text{ кг}$		
$\gamma_{\text{дв}} = M_{\text{дв}} / P_{\text{вЗЛ}}$	$\frac{1693}{99} = 17,0 \text{ кг / кН}$	
Оценка показателей эффективности проектируемого ТРДД в системе ДПС		
Масса силовой установки		
$n_{\text{дв}}$	2	задается или выбирается по прототипу
$K_{\text{су}}$	1,5	[1, с.27]
$M_{\text{су}} = M_{\text{дв}} \cdot K_{\text{су}} \cdot n_{\text{дв}}$	$1,693 \cdot 1,5 \cdot 2 = 5079 \text{ кг}$	
Необходимое топливо на борту самолета		
$L_{\text{п}}$	3500 км	задается или выбирается по прототипу
$\bar{V}_{\text{т}}$	0,93	[1, с.28, рис. 1.5] по $L_{\text{п}}$
$V_{\text{т}} = \bar{V}_{\text{т}} \cdot 3,6 \cdot a \cdot M$	$0,93 \cdot 3,6 \cdot 20,05 \cdot \sqrt{216,7} \cdot 0,8 = 790 \text{ км / ч}$	
$\bar{G}_{\text{топ}}$	1,06	[1, с.28, рис. 1.5] по $L_{\text{п}}$
$t_{\text{нЗ}}$	1 ч	[1, с.28]

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$M_{тЛА} = n_{дв} \cdot \bar{G}_{топ} \cdot C_{уд} \cdot P_{дв\text{кр}} \left(\frac{L_{п}}{V_T} + t_{нз} \right)$	$2 \cdot 1,06 \cdot 62,21 \cdot 20,4 \cdot \left(\frac{3500}{790} + 1 \right) = 14610 \text{ кг}$	
Суммарная масса силовой установки и топлива		
$\bar{M}_{мс}$	1,05	[1, с.28]
$M_{су+m} = M_{су} + \bar{M}_{мс} \cdot M_{тЛА}$	$5079 + 1,05 \cdot 14610 = 20420 \text{ кг}$	
Взлетная масса самолета		
$\bar{M}_{пл}^*$	0,47	[1, с.27, табл. 1.1]
$\bar{M}_{кн}$	0,2	[1, с.27, табл. 1.1]
$M_0 = \frac{M_{су+m}}{1 - \bar{M}_{пл}^* - \bar{M}_{кн}}$	$\frac{20420}{1 - 0,47 - 0,2} = 61880 \text{ кг}$	
Проверка величины стартовой тяговооруженности самолета		
$\mu_{взл} = \frac{P_{дв\text{взл}} \cdot n_{дв}}{M_0 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{99 \cdot 2}{61880 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}} = 0,326$	Сопоставить с табл. 1.2 [1, с.29]
Расчет удельных затрат топлива ЛА на 1 т.км		
$M_{кн} = M_0 \cdot \bar{M}_{кн}$	$61880 \cdot 0,2 = 1237 \text{ кг}$	
$M_{тЛА} = \bar{G}_{топ} \cdot C_{уд} \cdot P_{дв\text{кр}} \cdot n_{дв} \cdot \frac{L_{п}}{V_T}$	$1,06 \cdot 62,21 \cdot 20,4 \cdot 2 \cdot \frac{3500}{790} = 11919 \text{ кг}$	
$C_{ткм} = \frac{M_{тЛ}}{M_{кн} \cdot L_{п} \cdot 10^{-3}}$	$\frac{11919}{12376 \cdot 3500 \cdot 10^{-3}} = 0,275 \text{ кг/т.км}$	полученная величина должна быть лучше записанной в задании

2. РАСЧЕТ ТРДД СО СМЕШЕНИЕМ ПОТОКОВ

Схема ТРДД со смешением потоков приведена на рис. 2.1. Далее следует проектный расчет и расчет в нерасчетных условиях варианта такого двигателя.

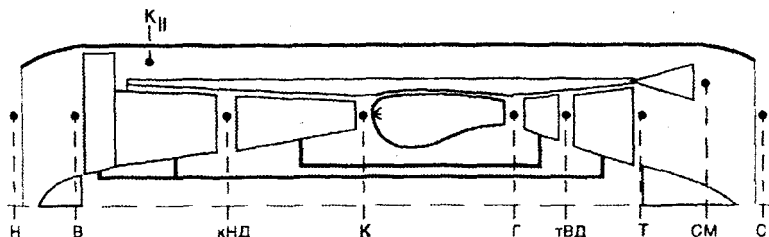


Рис.2.1. Схема ТРДД со смешением потоков

2.1. Исходные данные к расчету

Пример задания на курсовую (дипломную) работу по разделу проектирование ТРДД со смешением потоков.

Заданные режимы работы двигателя:

$$P_{\text{дв.взл}} \geq 158 \text{ кН} \quad \text{при } H = 0, \quad M_{\text{п}} = 0, \text{ САУ};$$

$$P_{\text{дв.кр}} = 39,455 \text{ кН} \quad \text{при } H_{\text{п}} = 11 \text{ км}, \quad M_{\text{п}} = 0,8, \text{ САУ}.$$

Заданный прототип двигателя – ТРДД ПС-90 [13]

Заданный прототип ЛА – ИЛ-96М [13]

Расчетная дальность полета ЛА – $L_{\text{п}} = 7500 \text{ км}$.

Ограничения:

максимальная температура газа в горле 1-го СА $T_{\text{г max}}^* = 1570 \text{ К}$;

удельные затраты топлива ЛА $c'_{\text{т-км}} \leq 0,23 \text{ кг / т} \cdot \text{км}$.

Таблица 2.1

Вариант исходных данных к расчету ТРДД

Параметры	Значения параметров	
	$H = 11, M_n = 0,8; P_{кр}^{тэ} = 39,455 \text{ кН}$	$H = 0, M = 0, P_{взл} \geq 158 \text{ кН}^*)$
$T_r^*, \text{ К}$	1483	1564
m	4,178	4,362
$\pi_{к\Sigma}$	38,7	32
$\pi_{в}$	1,838	1,685
$\eta_{в}$	0,86	0,8858
$\pi_{кнд}$	2,354	2,26
$\eta_{кнд}$	0,804	0,812
$\pi_{квд}$	16,44	14,14
$\eta_{квд}$	0,842	0,852
$\eta_{твд}$	0,888	0,888
$\eta_{тнд}$	0,907	0,89
$a, \text{ м / с}$	295,07	340,28
$\sigma_{вх} = 1,0$	$\eta_{мвд} = 0,995$	$V_{пл. са вд} = 0,97$
$\sigma_{кс} = 0,945$	$\varphi_c = 0,9945$	$V_{са вд} = 0,974$
$\eta_r = 0,995$	$\sigma_I = 0,99$	$V_{рк вд} = 0,975$
$\eta_{мнд} = 1,0$	$\sigma_{II} = 0,995$	$V_{ут вд} = 0,995$
$V_{пл са нд} = 1,0$	$V_{са нд} = 0,98$	$V_{рк нд} = 1,0$
		$V_{ут нд} = 1,0$

Значения величин в этой колонке получены путем пересчета соответствующих проектных данных по рекомендациям учебного пособия [1], см раздел табл 2.2 "Предварительная оценка исходных параметров ТРДД для расчета взлетного режима", с 52...54.

2.2. Проектный расчет ТРДД со смешением потоков для условий крейсерского полета

Проектный расчет выполняется при $G_{в\Sigma} = 1 \text{ кг/с}$.

Таблица 2.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Входное устройство		
$V_n = M_n \cdot a$	$0,8 \cdot 295,07 = 236,1 \text{ м/с}$	
T_n	$216,7 \text{ К}$	МСА [5, с.170] или прилож. 2
P_n	$22,766 \text{ кПа}$	МСА [5, с.170] или прилож. 2
i_n	$216,9 \text{ кДж/кг}$	$\pi - i - T$ по T_n
$\pi(T_n)$	$0,447$	$\pi - i - T^{(1)}$, по T_n
$i_n^* = i_n + \frac{V_n^2}{2000}$	$216,9 + \frac{236,1^2}{2000} = 244,77 \text{ кДж/кг}$	
$\pi(T_n^*)$	$0,6810$	$\pi - i - T$ по i_n^*
$P_n^* = P_n \cdot \frac{\pi(T_n^*)}{\pi(T_n)}$	$22,766 \cdot \frac{0,6810}{0,447} = 34,69 \text{ кПа}$	
T_n^*	$244,64 \text{ К}$	$\pi - i - T$ по i_n^*
$G'_{в\Sigma}^{(2)}$	1 кг/с	принимается для проектного расчета
$\bar{G}_{в \text{ пр}}$	1	принимается для проектного расчета
Вентилятор (компрессор наружного контура)		
$\bar{p}_{в \text{ пр}}$	$1,0$	принимается

¹⁾ Здесь и далее $\pi - i - T$ – диаграммы термодинамических функций для воздуха $\alpha = \infty$ и газа $\alpha = 4$ (см. приложение 1).

²⁾ Верхний индекс "*" означает, что данный параметр определен для $G_{в\Sigma} = 1 \text{ кг/с}$.

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
m	4,178	табл. 2.1
$G'_{вП} = G'_в \cdot \frac{m}{1+m}$	$1 \cdot \frac{4,178}{1+4,178} = 0,8069 \text{ кг/с}$	
$\pi_в$	1,82	табл.2.1
$\eta_{вП}$	0,86	табл. 2.1
$P_{кП}^* = P_H^* \cdot \sigma_{вх} \cdot \pi_в$	$34,69 \cdot 1 \cdot 1,838 = 63,76 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{кПс}^*) = \pi(T_H^*) \cdot \pi_{вП}$	$0,6811 \cdot 1,838 = 1,252$	
$i_{кПс}^*$	292,17 кДж/кг	$\pi-i-T$ по $\pi(T_{кПс}^*)$
$L_{вП} = \frac{i_{кПс}^* - i_H^*}{\eta_{вП}}$	$\frac{292,17 - 244,77}{0,86} = 55,11 \text{ кДж/кг}$	
$i_{кП}^* = i_H^* + L_{вП}$	$244,77 + 55,11 = 299,88 \text{ кДж/кг}$	
$T_{кП}^*$	299,1 К	$\pi-i-T$ по $i_{кП}^*$
$\pi(T_{кП}^*)$	1,385	$\pi-i-T$ по $i_{кП}^*$
$N_{кП} = G'_{вП} \cdot L_{вП}$	$0,8069 \cdot 55,11 = 44,468 \text{ кВт}$	
Компрессор низкого давления		
$G'_{в1} = G'_в \cdot \frac{1}{1+m}$	$1 \cdot \frac{1}{1+4,178} = 0,1931 \text{ кг/с}$	
$\pi_{кНД}$	2,354	табл. 2.1
$\eta_{кНД}$	0,804	табл. 2.1
$P_{кНД}^* = P_H^* \cdot \sigma_{вх} \cdot \pi_{кНД}$	$34,69 \cdot 1 \cdot 2,354 = 81,66 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{кНДс}^*) = \pi(T_H^*) \cdot \pi_{кНД}$	$0,6811 \cdot 2,354 = 1,6033$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$i_{кндс}^*$	313,9 кДж/кг	
$L_{кнд} = \frac{i_{кндс}^* - i_n^*}{\eta_{кнд}}$	$\frac{313,9 - 244,77}{0,804} = 85,92$ кДж/кг	
$i_{кнд}^* = i_n^* + L_{кнд}$	$244,77 + 85,92 = 330,689$ кДж/кг	
$T_{кнд}^*$	330,9 К	$\pi - i - T$ по $i_{кнд}^*$
$\pi(T_{кнд}^*)$	1,928	
$N_{кнд} = G_{вг} \cdot L_{кнд}$	$0,1931 \cdot 85,92 = 16,59$ кВт	
Компрессор высокого давления		
$\bar{G}_{впрквд}$	1,0	принимается
$\pi_{квд}$	16,44	табл. 2.1
$\eta_{квд}$	0,842	табл. 2.1
$P_{квд}^* = P_{кнд}^* \cdot \pi_{квд}$	$81,66 \cdot 16,44 = 1342,5$ кПа	
$\pi(T_{кс}^*) = \pi(T_{кнд}^*) \cdot \pi_{квд}$	$1,928 \cdot 16,44 = 31,696$	
$i_{кс}^*$	732,641 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{кс}^*)$
$L_{квд} = \frac{i_{кс}^* - i_{кнд}^*}{\eta_{квд}}$	$\frac{732,641 - 330,689}{0,842} = 477,38$ кДж/кг	
$i_k^* = i_{кнд}^* + L_{квд}$	$330,689 + 477,8 = 808,07$ кДж/кг	
T_k^*	787,3 К	$\pi - i - T$ по i_k^*
$i_{к\alpha=1}^*$	860,28 кДж/кг	[4, с. 50]
$N_{квд} = G'_{вг} \cdot L_{квд}$	$0,1931 \cdot 477,38 = 92,182$ кВт	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Камера сгорания		
η_r	0,995	табл. 2.1
$\sigma_{кс}$	0,945	табл. 2.1
T_r^*	1483 К	табл. 2.1
$i_{r \alpha=4}^*$	1653,2 кДж/кг	$\pi - i - T$ по T_r^*
$i_{r \alpha=1}^*$	1759,7 кДж/кг	[4, с.50] или прилож 3
$i_{r \alpha=\infty}^*$	1615,3 кДж/кг	$\pi - i - T$ по T_r^* $\alpha = \infty$
$i_{293 \alpha=1}^*$	302,93 кДж/кг	[4, с.50] или прилож 3
$i_{293 \alpha=\infty}^*$	293,32 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $T = 293K$ $\alpha = \infty$
$\pi(T_r^*)_{\alpha=4}$	666,5	$\pi - i - T$ по T_r^*
$H_u = H_{u0} + L_0(i_{к}^* - i_{293}^*)_{\alpha=\infty} - (1 + L_0)(i_{к}^* - i_{293}^*)_{\alpha=1}$	$42900 + 14,78(808,07 - 293,32) - (1 + 14,78)(860,28 - 302,93) = 41713$ кДж/кг	
$q_m = \frac{(i_r^* - i_k^*)_{\alpha=\infty}}{H_u \cdot \eta_r - (1 + L_0)(i_r^* - i_k^*)_{\alpha=1} + L_0(i_r^* - i_k^*)_{\alpha=\infty}} = \frac{1615,3 - 808,07}{41713 \cdot 0,995 - (1 + 14,78)(1759,7 - 860,28) + 14,78(1615,3 - 807,07)} = 0,02057$		проверить по номограмме $q_m = f(T_r^*, T_k^*)$ [1, с.43] [4, с.124...126]

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$v_{\text{охл } \Sigma \text{ ВД}} = 1 - \left[(1 - v_{\text{пл СА ВД}}) + (1 - v_{\text{СА ВД}}) + (1 - v_{\text{РК ВД}}) + (1 - v_{\text{УГ ВД}}) \right] =$ $= 1 - [(1 - 1) + (1 - 0,974) + (1 - 0,975) + (1 - 0,995)] =$	0,944	в этой формуле $v_{\text{пл СА ВД}}$ принимается равной единице
$v_{\text{охл } \Sigma \text{ НД}} = 1 - \left[(1 - v_{\text{пл СА НД}}) + (1 - v_{\text{СА НД}}) + (1 - v_{\text{РК НД}}) + (1 - v_{\text{УГ НД}}) \right] =$ $= 1 - [(1 - 1) + (1 - 0,979) + (1 - 1) + (1 - 1)] =$	0,979	
$v_{\text{охл } \Sigma} = 1 - \left[(1 - v_{\text{охл ВД}}) + (1 - v_{\text{охл } \Sigma \text{ НД}}) \right]$ $= 1 - [(1 - 0,95) + (1 - 0,98)]$	0,923	
$G'_{\text{ВКС}} = G'_{\text{ВЛ}} (1 - v_{\text{охл } \Sigma}) \cdot G'_{\text{ВЛ}} =$ $= 0,1931 - (1 - 0,923) \cdot 0,1931 =$	0,17893 кг/с	
$G'_{\text{мс}} = q_m \cdot G'_{\text{ВКС}} = 0,02057 \cdot 0,17823 =$	0,003666 кг/с	
$G'_{\text{мч}} = 3600 \cdot G'_{\text{мс}} = 3600 \cdot 0,003666 =$	13,2 кг/с	
$G'_{\text{ГКС}} = G'_{\text{ВКС}} + G'_{\text{мс}} = G'_{\text{ГВД}} = 0,17823 + 0,003666 = 0,1819 \text{ кг/с}$		
$i_{\text{КС}}^* = \frac{G'_{\text{ГКС}} \cdot i_{\text{Г } \alpha=4}^* - i_{\text{К } \alpha=\infty}^* (1 - v_{\text{пл СА ВД}}) \cdot G'_{\text{ВЛ}}}{G'_{\text{ГКС}} - G'_{\text{ВЛ}} (1 - v_{\text{пл СА ВД}})} =$ $= \frac{0,1819 \cdot 1653,2 - 808,07(1 - 0,97) \cdot 0,1931}{0,1819 - 0,1931(1 - 0,97)} =$	1681 кДж/кг	
$T_{\text{КС}}^*$	1505,2 К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{КС}}^*$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$i_{CA}^* = \frac{G'_{ГКС} \cdot i_{Г}^* - i_{К}^* (1 - v_{CAВД}) \cdot G'_{В1}}{G'_{ГКС} + (1 - v_{CAВД}) \cdot G'_{В1}} =$ $= \frac{0,1819 \cdot 1653,2 + 808,07 (1 - 0,974) \cdot 0,1931}{0,1819 + (1 - 0,974) \cdot 0,1931} =$	1630,7 кДж/кг	
T_{CA}^*	1465 К	$\pi - i - T$ по i_{CA}^*
$\alpha_{КС} = \frac{1}{q_m L_0}$	$\frac{1}{0,02057 \cdot 14,78} = 3,29$	
$p_{Г}^* = p_{К}^* \cdot \sigma_{КС}$	1342,5 · 0,945 = 1268,7 кПа	
Турбина высокого давления		
$N_{ТВД} = N_{ТВД} / \eta_{мВД}$	92,182 / 0,995 = 92,645 кВт	
$G'_{ГТВД} = G'_{ГКС} + G_{В1} \left[(1 - v_{CAВД}) + (1 - v_{РКВД}) + \right.$ $\left. + (1 - v_{УГВД}) + (1 - v_{ПЛСАНД}) \right] \approx G'_{ГВД} =$ $= 0,1819 + 0,1931 [(1 - 0,974) + (1 - 0,975) +$ $+ (1 - 0,995) + (1 - 1)] =$	0,1927 кг/с	
$\eta_{ТВД}$	0,888	табл. 2.1
$L_{ТВД} = \frac{N_{ТВД}}{G'_{ГВД}}$	$\frac{92,645}{0,1819} = 509,32$ кДж / кг	
$i_{ГВДs}^* = i_{Г}^* - \frac{L_{ТВД}}{\eta_{ТВД}} = 1653,2 - \frac{509,32}{0,888} =$	1079,64 кДж / кг	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$\pi(T_{\text{ТВД}}^*)$	132,28	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$
$\pi_{\text{ТВД}} = \frac{\pi(T_{\text{Г}}^*)}{\pi(T_{\text{ТВД}}^*)}$	$\frac{666,5}{132,28} = 5,038$	
$p_{\text{ТВД}}^* = p_{\text{Г}}^* / \pi_{\text{ТВД}}$	$1268,7 / 5,038 = 251,83 \text{ кПа}$	
$i_{\text{ТВД}}^* = \frac{(i_{\text{Г}}^* - L_{\text{ТВД}}) \cdot G'_{\text{ТВД}} + i_{\text{к}}^* \cdot G'_{\text{в1}} \left[(1 - v_{\text{СА ВД}}) + (1 - v_{\text{РК ВД}}) + (1 - v_{\text{УТ ВД}}) + (1 - v_{\text{СА НД}}) \right]}{G_{\text{ГНД}}} = \frac{(1653,2 - 509,32) \cdot 0,1819 + 808,07 \cdot 0,1931 [(1 - 0,974) + (1 - 0,975) + (1 - 0,995) + (1 - 1)]}{0,1927} = 1125 \text{ кДж/кг}$		
$T_{\text{ТВД}}^*$	1049 К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$
$\pi(T_{\text{ТВД}}^*)$	154,15	
$A'_{\text{ТВД}} = \frac{G'_{\text{ГКС}} \cdot \sqrt{R \cdot 10^3 \cdot T_{\text{Г}}^*}}{p_{\text{Г}}^* \cdot 10^3} = \frac{0,1819 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1483}}{1268,7 \cdot 10^3} = 0,9357 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$		
$\bar{n}_{\text{ТВД}} = \sqrt{T_{\text{Г}}^* / T_{\text{Гр}}^*}$	$\sqrt{1483 / 1483} = 1$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Турбина низкого давления		
$N_{\text{ТНД}} = \frac{N_{\text{кП}} + N_{\text{кНД}}}{\eta_{\text{мНД}}}$	$\frac{44,468 + 16,59}{1,0} = 61,06 \text{ кВт}$	
$G'_{\text{ГТ}} = G'_{\text{ВЛ}} (1 + q_m \cdot v_{\text{охл.}}) = G'_{\text{ВЛ}} = 0,1931 (1 + 0,02057 \cdot 0,923) = 0,19677 \text{ кг/с}$		
$\eta_{\text{ТНД}}$	0,907	табл. 2.1
$L_{\text{ТНД}} = \frac{N_{\text{ТНД}}}{G'_{\text{ГНД}}}$	$\frac{61,06}{0,1927} = 316,86 \text{ кДж/кг}$	
$i_{\text{ТС}}^* = i_{\text{ТВД}}^* - \frac{L_{\text{ТНД}}}{\eta_{\text{ТНД}}}$	$1125 - \frac{316,86}{0,907} = 775,55 \text{ кДж/кг}$	
$\pi(T_{\text{ТС}}^*)$	39,34	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТС}}^*$
$\pi_{\text{ТНД}} = \frac{\pi(T_{\text{ТВД}}^*)}{\pi(T_{\text{ТС}}^*)}$	$\frac{154,15}{39,34} = 3,918$	
$p_{\text{Т}}^* = p_{\text{ТВД}}^* / \pi_{\text{ТНД}}$	$\frac{251,83}{3,918} = 64,275 \text{ кПа}$	
$i_{\text{Т}}^* = \frac{(i_{\text{ТВД}}^* - L_{\text{ТНД}}) \cdot G'_{\text{ТНД}} + i_{\text{к}}^* \cdot G'_{\text{ВЛ}} [(1 - v_{\text{САТД}}) + (1 - v_{\text{ПКТД}}) + (1 - v_{\text{СТТД}})]}{G'_{\text{ГТ}}}$	$\frac{(1125 - 316,86) \cdot 0,1927 + 808,07 \cdot 0,1931 [(1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1)]}{0,19667} = 809,34 \text{ кДж/кг}$	
$T_{\text{Т}}^*$	774,6 К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{Т}}^*$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$\pi(T_T^*)$	45,56	$\pi - i - T$ по $i_{TНД}^*$
$p_I^* = p_T^* \cdot \sigma_I$	$64,275 \cdot 0,99 = 63,63$ кПа	
$p_{II}^* / p_I^* = p_{к II}^* \sigma_{II} / p_I^*$	$\frac{63,76 \cdot 0,995}{63,63} = 0,99$	соответствует ограничению [1, с. 53]
$A'_{ТНД} = \frac{G'_{ГНД} \cdot \sqrt{R_T \cdot 10^3 \cdot T_{ТВД}^*}}{p_{ТВД}^* \cdot 10^3}$	$\frac{0,1927 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1049,7}}{251,83 \cdot 10^3} = 4,201 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\bar{n}_{ТНД} = \bar{n}_{в пр} \cdot \sqrt{\frac{T_{Н}^*}{T_{нр}^*}}$	$1,0 \cdot \sqrt{\frac{244,64}{244,64}} = 1,0$	
Камера смешения		
$G_{см} = G_I + G_{II} = G'_{ГТ} + G'_{в II}$	$0,19667 + 0,8069 = 1,00357$ кг/с	
$i_{см}^* = \frac{i_T^* \cdot G'_{ГТ} + i_{к II}^* \cdot G'_{в II}}{G_{см}}$	$\frac{807,680 \cdot 0,19667 + 299,88 \cdot 0,8069}{1,00357} = 400,82$ кДж/кг	
$T_{см}^*$	399,8 К	$\pi - i - T$ по $i_{см}^*$ для $\alpha = \infty$
$\pi(T_{см}^*)$	3,772	$\pi - i - T$ по $T_{см}^*$, $\alpha = \infty$
λ_I	0,38	принимается [1, с. 54]
$\pi(\lambda_I)$	0,9201	табл. ГДФ ¹⁾ по λ_I $k = 1,33$
$p_I = p_{II} = p_I^* \cdot \pi(\lambda_I)$	$63,63 \cdot 0,9201 = 58,546$ кПа	

¹⁾ Здесь и далее "табл. ГДФ" – таблицы газодинамических функций для воздуха $k = 1,4$ и газа $k = 1,33$ (см. приложение 4)

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$\pi(\lambda_{II}) = p_{II} / p_{II}^* = p_{II} / p_{к II} \cdot \sigma_{II}$	$\frac{58,546}{64 \cdot 0,995} = 0,9194$	
$q(\lambda_I)$	0,567	табл. ГДФ по $\pi(\lambda_I)$, $\kappa = 1,33$
$q(\lambda_{II})$	0,5633	табл. ГДФ по $\pi(\lambda_{II})$, $\kappa = 1,4$
$F'_I = \frac{G'_I \cdot \sqrt{T_I^*}}{39,7 \cdot p_I^* \cdot q(\lambda_I)} = \frac{G'_{гТ} \cdot \sqrt{T_{гТ}^*}}{39,7 \cdot p_I^* \cdot q(\lambda_I)}$	$\frac{0,19667 \cdot \sqrt{774,6}}{39,7 \cdot 64,275 \cdot 0,567} = 0,003783 \text{ м}^2$	
$F'_{II} = \frac{G'_{II} \cdot \sqrt{T_{II}^*}}{40,4 \cdot p_{II}^* \cdot q(\lambda_{II})} = \frac{G'_{Вк II} \cdot \sqrt{T_{к II}^*}}{40,4 \cdot p_{II}^* \cdot q(\lambda_{II})}$	$\frac{0,8069 \cdot \sqrt{299}}{40,4 \cdot 63,76 \cdot 0,995 \cdot 0,5633} = 0,009666 \text{ м}^2$	
$F'_{см} = F'_I + F'_{II}$	$0,003783 + 0,009666 = 0,01345 \text{ м}^2$	
$Z(\lambda_I)$	1,5058	табл. ГДФ по λ_I
$Z(\lambda_{II})$	1,504	табл. ГДФ по λ_{II}
$Z(\lambda_{см}) = \frac{m}{m+1} \cdot Z(\lambda_{II}) \cdot \sqrt{\frac{T_{II}^*}{T_{см}^*}} + \frac{1}{m+1} \cdot Z(\lambda_I) \cdot \sqrt{\frac{T_I^*}{T_{см}^*}} =$ $= \frac{4,178}{4,17+1} \cdot 1,504 \cdot \sqrt{\frac{299,1}{399,8}} + \frac{1}{4,178+1} \cdot 1,5088 \cdot \sqrt{\frac{774,6}{399,8}} = 1,4544$		
$q(\lambda_{см}^*)$	0,5879	табл. ГДФ по $Z(\lambda_{см})$, $\kappa = 1,4$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$p_{cm}^* = \frac{G'_{cm} \cdot \sqrt{T_{cm}^*} \cdot \sigma_{kcm}}{40,4 \cdot q(\lambda_{cm}) \cdot F'_{cm}}$	$\frac{1,00357 \cdot \sqrt{399,8} \cdot 0,995}{40,4 \cdot 0,5879 \cdot 0,01345} = 62,5 \text{ кПа}$	
Выходное устройство		
$\pi_c = \frac{p_{cm}^*}{p_n}$	$\frac{62,5}{22,776} = 2,744$	
φ_c	0,9945	табл. 2.1
$a_{кр} = 18,3 \cdot \sqrt{T_{cm}^*}$	$18,3 \cdot \sqrt{399,8} = 365,91 \text{ м/с}$	
$C_c = \varphi_c \cdot a_{кр}$	$0,9945 \cdot 365,91 = 363,9 \text{ м/с}$	
$C_{cs} = C_c / \varphi_c$	$363,9 / 0,9945 = 365,91 \text{ м/с}$	
$\lambda_c = C_c / a_{кр}$	$363,9 / 365,91 = 0,9945$	
λ_{cs}	1,0	т.к. $\pi_c > \pi_{c \text{ кр}}$
$\pi(\lambda_c)$	0,5333	табл. ГДФ по λ_c $\kappa = 1,4$
$\pi(\lambda_{cs})$	0,5283	табл. ГДФ по λ_{cs} , $\kappa = 1,4$
$\sigma_c = \pi(\lambda_{cs}) / \pi(\lambda_c)$	$0,5283 / 0,5333 = 0,991$	
$\mu F'_c = \frac{G'_{cm} \cdot \sqrt{T_{cm}^*} \cdot T_c^*}{m_b \cdot p_{cm}^* \cdot \sigma_c \cdot q(\lambda_c)}$	$\frac{1,00357 \cdot \sqrt{399,8}}{40,4 \cdot 62,5 \cdot 0,991 \cdot 1} = 8,019 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$	
$\pi_{c \text{ кр}} = \frac{1}{\pi(\lambda_c)}$	$\frac{1}{0,5333} = 1,875$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$P_c = P_{cm}^* / \pi_{c \text{ кр}}$	$\frac{62,5}{1,875} = 33,325 \text{ кПа}$	
$P_c - P_n$	$33,325 - 22,768 = 10,559 \text{ кПа}$	
Удельные параметры двигателя		
$P_{уд} = (G'_{cm} \cdot C_c - G'_{в\Sigma} \cdot V_{п}) \cdot 10^{-3} + F'_c (P_c - P_n)$	$(1,00357 \cdot 363,9 - 1 \cdot 236,1) \cdot 10^{-3} + 8,019 \cdot 10,559 \cdot 10^{-3} = 0,2138 \text{ кН} \cdot \text{с} / \text{кг}$	
$C_{уд} = G'_{mч} / P_{уд}$	$13,2 / 0,2138 = 61,74 \text{ кг} / \text{кН} \cdot \text{ч}$	
Основные проектные данные двигателя при $P_{дв \text{ кр}} = 39,455 \text{ кН}$		
$G_{в\Sigma p} = \frac{P_{дв \text{ кр}}}{P_{уд}}$	$\frac{39,455}{0,2138} = 184,54 \text{ кг} / \text{с}$	
$G_{mч} = C_{уд} \cdot P_{дв \text{ кр}}$	$61,74 \cdot 39,455 = 2436 \text{ кг} / \text{ч}$	
$F_{вх} = \frac{G_{в\Sigma p} \cdot \sqrt{T_{\mu}^*}}{40,4 \cdot p_{\mu}^* \cdot q(\lambda_{в})}$	$\frac{184,54 \cdot \sqrt{244,64}}{40,4 \cdot 34,69 \cdot 0,875} = 2,057 \text{ м}^2$	$q(\lambda_{в}) = 0,875$, принята по табл. 2.1 [1]
$A_{твд} = A'_{твд} \cdot G_{в\Sigma p}$	$0,9357 \cdot 10^{-4} \cdot 184,54 = 172,67 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$A_{тнд} = A'_{тнд} \cdot G_{в\Sigma p}$	$4,201 \cdot 10^{-4} \cdot 184,54 = 775,252 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\mu F_c = \mu F'_c \cdot G_{в\Sigma p}$	$80,19 \cdot 10^{-4} \cdot 184,54 = 1,46 \text{ м}^2$	
$G_{в\Pi} = G'_{в\Pi} \cdot G_{в\Sigma p}$	$0,8069 \cdot 184,54 = 148,9 \text{ кг} / \text{с}$	
$G_{вI} = G'_{вI} \cdot G_{в\Sigma p}$	$0,1931 \cdot 184,54 = 35,634 \text{ кг} / \text{с}$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$G_{ГВД} = G'_{ГВД} \cdot G_{В \Sigma p}$	$0,1819 \cdot 184,54 = 33,57 \text{ кг/с}$	
$G_{ГНД} = G'_{ГНД} \cdot G_{В \Sigma p}$	$0,1927 \cdot 184,54 = 35,56 \text{ кг/с}$	
$G_{Гс} = G'_{см} \cdot G_{В \Sigma p}$	$1,00357 \cdot 184,54 = 185,2 \text{ кг/с}$	
$D_{ДВ} = \bar{D} \left[\frac{4 F_{вх}}{\pi (1 - \bar{d}_{1к}^2)} \right]^{0,5}$	$1,05 \left[\frac{4 \cdot 2,057}{3,14 \cdot (1 - 0,32^2)} \right]^{0,5} = 1,794 \text{ м}$	$\bar{D}, \bar{d}_{1к}$ [1, с.71]
Предварительная оценка исходных параметров ТРДД см для расчета взлетного режима		
$\bar{P}_{ДВ кр} = P_{ДВ кр} / P_{ДВ взл}$	$20,4 / 99 = 0,206$	табл. 2.1
$\bar{T}_г^* = T_{г взл}^* / \bar{T}_{г кр}^*$	1,0546	рис.3.6. [1, с.70] по $m = 4,178$ и $\bar{P} = 0,252$
$\bar{\pi}_в = \pi_{в взл} / \pi_{в кр}$	0,912	там же
$\bar{G}_{в пр} = \bar{G}_{в пр к нд} = \frac{G_{в пр взл}}{G_{в пр кр}}$	0,947	там же
$\bar{\eta}_в = \eta_{в взл} / \eta_{в кр}$	1,03	рис.2.1 [1, с.37] по $\bar{G}_{в пр}$ и $\pi_в$
$\bar{\pi}_{к нд} = \pi_{к нд взл} / \pi_{к нд кр}$	0,96	рис.3.6. [1, с.70]
$\bar{\pi}_{к вд} = \pi_{к вд взл} / \pi_{к вд кр}$	0,86	там же
$\bar{m} = m_{взл} / m_{кр}$	1,044	там же

Продолжение табл.2.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$\bar{\eta}_{к НД} = \eta_{к НД в з л} / \eta_{к НД к р}$	1,01	рис.2.1 [1, с.37] по $\bar{G}_{в пр}$ и $\pi_{к НД}$
$\bar{\eta}_{т НД} = \eta_{т НД в з л} / \eta_{т НД к р}$	0,981	рис.3.6. [1, с.70] по $\bar{P}$ и $m_{кр}$
$\bar{G}_{в пр к НД} = \frac{\bar{G}_{в пр}}{\pi_{к НД}^{0,857}} \cdot \frac{1+m_{кр}}{1+\bar{m} \cdot m_{кр}}$	$\frac{0,947}{0,96^{0,857}} \cdot \frac{1+4,178}{1+1,044 \cdot 4,178} = 0,947$	
$\bar{\eta}_{к ВД} = \eta_{к ВД в з л} / \eta_{к ВД к р}$	1,012	рис.2.1 [1, с.37] по $\bar{G}_{в пр к ВД}$ и $\pi_{к ВД}$
$\bar{n}_{пр ВД} = n_{пр в з л ВД} / n_{пр к р ВД}$	0,96	рис.2.1 [1, с.37] по $\bar{G}_{в пр к ВД}$ и $\pi_{к ВД}$
$m_{в з л} = m_{кр} \cdot \bar{m}$	$4,178 \cdot 1,044 = 4,362$	В случае, если проектный расчет выполняется при $H = 0, M = 0$, эти величины задаются преподавателем либо выбираются самостоятельно по рекомендациям работы [1, глава 2]
$\pi_{в в з л} = \pi_{в к р} \cdot \bar{\pi}_в$	$1,838 \cdot 0,912 = 1,676$	
$\pi_{к НД в з л} = \pi_{к НД к р} \cdot \bar{\pi}_{к НД}$	$2,354 \cdot 0,96 = 2,26$	
$\pi_{к ВД в з л} = \pi_{к ВД к р} \cdot \bar{\pi}_{к ВД}$	$16,44 \cdot 0,86 = 14,14$	
$\eta_{т НД в з л} = \eta_{т НД к р} \cdot \bar{\eta}_{т НД}$	$0,907 \cdot 0,981 = 0,89$	
$\eta_{в в з л} = \eta_{в к р} \cdot \bar{\eta}_в$	$0,86 \cdot 1,03 = 0,8858$	
$\eta_{к НД в з л} = \eta_{к НД к р} \cdot \bar{\eta}_{к НД}$	$0,804 \cdot 1,01 = 0,812$	
$\eta_{к ВД в з л} = \eta_{к ВД к р} \cdot \bar{\eta}_{к ВД}$	$0,842 \cdot 1,012 = 0,852$	
$\eta_{т ВД в з л} = \eta_{т ВД к р}$	0,888	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$T_{г \text{ взл}}^* = T_{г \text{ кр}}^* \cdot \bar{T}_г$	$1483 \cdot 1,0546 = 1564 \text{ К}$	
$G_{в \Sigma \text{ взл}} = G_{в \Sigma p} \cdot \frac{101,33}{p_n^*} \cdot \sqrt{\frac{T_n^*}{288,16}} \cdot \bar{G}_{в \text{ пр к нд}} =$ $= 184,54 \cdot \frac{101,33}{34,69} \cdot \sqrt{\frac{244,64}{288,16}} \cdot 0,947 = 470,35 \text{ кг/с}$		Если расчет ТРДД при $H=0, M=0$ проводится после проектного, то он выполняется для $G_{в \Sigma \text{ взл}}$ Если же проводится проектный расчет ТРДД при $H=0, M=0$, то он выполняется для $G_{в \Sigma \text{ взл}} = 1 \text{ кг/с}$

2.3. Расчет ТРДДсм на взлетном режиме

Таблица 2.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Входное устройство		
$V_n = M_n \cdot a$	$0 \cdot 340,28 = 0$	$a = 340,28 \text{ [5, с. 169]}$ или прилож. 2
T_n	$288,16 \text{ К}$	там же
p_n	$101,33$	там же
i_n $\pi(T_n)$	$288,4 \text{ кДж/кг}$ $1,207$	$\pi - i - T$ по T_n
$i_n^* = i_n$, т.к. $V = 0$	$288,4 \text{ кДж/кг}$	
$\pi(T_n^*) = \pi(T_n)$, т.к. $V = 0$	$1,207$	
$p_n^* = p_n = p_v^*$	$101,33 \text{ кПа}$	
$T_n^* = T_n$	$288,16 \text{ К}$	
$G_{в \Sigma}$	$470,35 \text{ кг/с}$	

Продолжение табл 2.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Вентилятор (компрессор наружного контура)		
m	4,362	табл. 2.1
$G_{вII} = G_{в\Sigma} \cdot \frac{m}{1+m}$	$470,35 \cdot \frac{4,362}{1+4,362} = 382,63 \text{ кг/с}$	
$\pi_{в}$	1,676	табл. 2.1
$\eta_{в}$	0,8858	табл. 2.1
$p_{кII}^* = p_H^* \cdot \sigma_{вк} \cdot \pi_{в}$	$101,33 \cdot 1 \cdot 1,685 = 170,74 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{кII}^*) = \pi(T_H^*) \cdot \pi_{в}$	$1,207 \cdot 1,685 = 2,034$	
$i_{кIIc}^*$	335,88 кДж/кг	$\pi-i-T$ по $\pi(T_{кII}^*)$
$L_{вII} = \frac{i_{кIIc}^* - i_H^*}{\eta_{в}}$	$\frac{335,88 - 288,4}{0,8858} = 53,6 \text{ кДж/кг}$	
$i_{кII}^* = i_H^* + L_{вII}$	$288,4 + 53,6 = 342,0 \text{ кДж/кг}$	
$T_{кII}^*$	341,5 К	$\pi-i-T$ по $i_{кII}^*$
$\pi(T_{кII}^*)$	2,171	$\pi-i-T$ по $i_{кII}^*$
$N_{кII} = G_{вII} \cdot L_{вII}$	$382,63 \cdot 53,6 = 20509 \text{ кВт}$	
Компрессор низкого давления (внутренний контур)		
$G_{вI} = G_{в\Sigma} \cdot \frac{1}{1+m}$	$470,35 \cdot \frac{1}{1+4,362} = 87,72 \text{ кг/с}$	
$\pi_{кИД}$	2,26	табл. 2.1
$\eta_{кИД}$	0,812	табл. 2.1

Продолжение табл.2.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$P_{к\text{НД}}^* = P_{\text{н}}^* \cdot \sigma_{\text{вх}} \cdot \pi_{к\text{НД}}$	$101,33 \cdot 1 \cdot 2,26 = 229 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{к\text{НД}}^*) = \pi(T_{\text{н}}^*) \cdot \pi_{к\text{НД}}$	$1,207 \cdot 2,26 = 2,728$	
$i_{к\text{НД}}^*$	364,56 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{к\text{НД}}^*)$
$L_{к\text{НД}} = \frac{i_{к\text{НД}}^* - i_{\text{н}}^*}{\eta_{к\text{НД}}}$	$\frac{364,56 - 288,4}{0,812} = 93,8 \text{ кДж/кг}$	
$i_{к\text{НД}}^* = i_{\text{н}}^* + L_{к\text{НД}}$	$288,4 + 93,8 = 382,2 \text{ кДж/кг}$	
$T_{к\text{НД}}^*$	381,4 К	$\pi - i - T$ по $i_{к\text{НД}}^*$
$\pi(T_{к\text{НД}}^*)$	3,2	$\pi - i - T$ по $i_{к\text{НД}}^*$
$N_{к\text{НД}} = G_{\text{вI}} \cdot L_{к\text{НД}}$	$87,72 \cdot 93,8 = 8228 \text{ кВт}$	
Компрессор высокого давления		
$\pi_{к\text{ВД}}$	14,14	табл. 2.1
$\eta_{к\text{ВД}}$	0,852	табл. 2.1
$P_{к}^* = P_{к\text{НД}}^* \cdot \pi_{к\text{ВД}}$	$229 \cdot 14,14 = 3238,06 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{к\text{с}}^*) = \pi(T_{к\text{НД}}^*) \cdot \pi_{к\text{ВД}}$	$3,2 \cdot 14,14 = 42,248$	
$i_{к\text{с}}^*$	794,27 кДж/кг	
$L_{к\text{ВД}} = \frac{i_{к\text{с}}^* - i_{к}^*}{\eta_{к\text{ВД}}}$	$\frac{794,27 - 382,2}{0,852} = 483,65 \text{ кДж/кг}$	
$i_{к}^* = i_{к\text{НД}}^* + L_{к\text{ВД}}$	$382,2 + 483,65 = 865,8 \text{ кДж/кг}$	
$T_{к}^*$	839,7 К	$\pi - i - T$ по $i_{к}^*$

Продолжение табл. 2.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$i_{\kappa}^* \alpha=1$	923,49 кДж/кг	[4, с. 50] или прил. 3 по T_{Γ}^*
$N_{\kappa \text{ВД}} = G_{\text{вГ}} \cdot L_{\kappa \text{ВД}}$	$87,72 \cdot 483,65 = 424258 \text{ кВт}$	
Камера сгорания		
T_{Γ}^*	1564 К	табл. 2.1
$i_{\Gamma}^* \alpha=4$	1754,8 кДж/кг	$\pi - i - T$ по T_{Γ}^*
$\pi(T_{\Gamma}^*) \alpha=4$	840,08	$\pi - i - T$ по T_{Γ}^*
$i_{\Gamma}^* \alpha=1$	1870,26 кДж/кг	[4, с. 50] или прилож. 3 по T_{Γ}^*
$i_{\Gamma}^* \alpha=\infty$	1713,4 кДж/кг	$\pi - i - T$ по T_{Γ}^* $\alpha=\infty$
$H_u = H_{u0} + L_0(i_{\kappa}^* - i_{293}^*)_{\alpha=\infty} - (1 + L_0)(i_{\kappa}^* - i_{293}^*)_{\alpha=1} =$ $= 42900 + 14,78(865,8 - 293,32) - (1 + 14,78)(923,49 - 302,93) = 41568,8 \text{ кДж/кг}$		
$q_m = \frac{(i_{\Gamma}^* - i_{\kappa}^*)_{\alpha=\infty}}{H_u \cdot \eta_{\Gamma} - (1 + L_0)(i_{\Gamma}^* - i_{\kappa}^*)_{\alpha=1} + L_0(i_{\Gamma}^* - i_{\kappa}^*)_{\alpha=\infty}} =$ $= \frac{1713,4 - 865,8}{41568,8 \cdot 0,995 - (1 + 14,78)(1870,26 - 923,49) + 14,78(1713,4 - 865,8)} = 0,02176$		проверить по номограмме $q_m = f(T_{\Gamma}^*, T_{\kappa}^*)$ [1, с 43] [4, с 124 - 126]
$v_{\text{охл}} \Sigma \text{ВД}$	0,944	см. проектный расчет
$v_{\text{охл}} \Sigma \text{НД}$	0,979	см. проектный расчет

Продолжение табл.2.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$v_{охл \Sigma}$	0,923	см. проектный расчет
$G_{вк} = G_{в1} - (1 - v_{охл \Sigma}) \cdot G_{в1} = 87,72 - (1 - 0,923) \cdot 87,72 = 80,96 \text{ кг/с}$		
$G_{мс} = q_m \cdot G_{вк} = 0,02176 \cdot 80,96 =$	1,762 кг/с	
$G_{мч} = 3600 \cdot G_{мс} = 3600 \cdot 1,762 =$	6343 кг/с	
$G_{гк} = G_{вк} + G_{мс} = G_{гвд} = 80,96 + 1,762 =$	82,722 кг/с	
$i_{кк}^* = \frac{G_{гк} \cdot i_{г}^* - i_{к}^* (1 - v_{пл \text{ САВД}}) \cdot G_{в1}}{G_{гк} - G_{в1} (1 - v_{пл \text{ САВД}})} =$ $= \frac{82,722 \cdot 1754,8 - 865,8 (1 - 0,97) \cdot 87,72}{82,722 - 87,72 (1 - 0,97)} =$	1784 кДж/кг	
$T_{кк}^*$	1587 К	$\pi - i - T$ по $i_{кк}^*$
$i_{сa}^* = \frac{G_{гк} \cdot i_{г}^* + i_{к}^* (1 - v_{сa \text{ ВД}}) \cdot G_{в1}}{G_{гк} + (1 - v_{сa \text{ ВД}}) \cdot G_{в1}} =$ $= \frac{82,722 \cdot 1754,8 + 865,8 (1 - 0,974) \cdot 87,72}{82,722 + (1 - 0,974) \cdot 87,72} =$	1730,95 кДж/кг	
$T_{сa}^*$	1545 К	$\pi - i - T$ по $i_{сa}^*$
$\alpha_{кк} = \frac{1}{q_m L_0}$	$\frac{1}{0,02176 \cdot 14,78} = 3,11$	
$p_{г}^* = p_{к}^* \cdot \sigma_{кк}$	$3238,06 \cdot 0,945 =$ 3060 кПа	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Турбина высокого давления		
$N_{ТВД} = N_{КВД} / \eta_{мВД}$	42425,8 / 0,995 = 42638 кВт	
$G_{гТВД} = G_{гВД} + G_{в1} \left[(1 - v_{сАВД}) + (1 - v_{рКВД}) + (1 - v_{ут}) + (1 - v_{плсАНД}) \right] =$ $= G_{гНД} = 82,722 + 87,72 \left[(1 - 0,974) + (1 - 0,975) + (1 - 0,995) + (1 - 1) \right] = 87,634 \text{ кг / с}$		
$L_{ТВД} = \frac{N_{ТВД}}{G_{гВД}}$	$\frac{42638}{82,722} = 515,43 \text{ кДж / кг}$	
$i_{ТВДс}^* = i_{г}^* - \frac{L_{ТВД}}{\eta_{гВД}} = 1754,8 - \frac{515,43}{0,888} =$	1174,4 кДж / кг	
$\pi(T_{ТВДс}^*)$	180,95	$\pi - i - T$ по $i_{ТВДс}^*$
$\pi_{ТВД} = \frac{\pi(T_{г}^*)}{\pi(T_{ТВДс}^*)}$	$\frac{840,08}{180,95} = 4,64$	
$p_{ТВД}^* = p_{г}^* / \pi_{ТВД}$	3060 / 4,64 = 659,5 кПа	
$i_{ТВД}^* = \frac{(i_{г\alpha=4}^* - L_{ТВД}) \cdot G_{гВД} + i_{к\alpha=\infty}^* \cdot G_{в1} \left[(1 - v_{сАВД}) + (1 - v_{рКВД}) + (1 - v_{ут}) + (1 - v_{плсАНД}) \right]}{G_{гТВД}} =$ $\frac{(1754,8 - 515,43) \cdot 82,722 + 865,8 \cdot 87,22 \left[(1 - 0,974) + (1 - 0,975) + (1 - 0,995) + (1 - 1) \right]}{87,634} = 1218 \text{ кДж/кг}$		
$T_{ТВД}^*$	1127,8 К	$\pi - i - T$ по $i_{ТВД}^*$
$\pi(T_{ТВД}^*)$	207,5	$\pi - i - T$ по $i_{ТВД}^*$

Продолжение табл. 2.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$A_{\text{ТВД}} = \frac{G_{\text{ГКС}} \cdot \sqrt{R \cdot 10^3 \cdot T_{\text{Г}}^*}}{p_{\text{Г}}^* \cdot 10^3}$	$\frac{82,722 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1564}}{3060 \cdot 10^3} = 18,18 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной $A_{\text{ТВД}}$, определенной в проектном расчете
$\bar{n}_{\text{ТВД}} = \sqrt{T_{\text{Г}}^* / T_{\text{ГР}}^*}$	$\sqrt{1564 / 1483} = 1,027$	
Турбина низкого давления		
$N_{\text{ТНД}} = \frac{N_{\text{КП}} + N_{\text{КНД}}}{\eta_{\text{мНД}}}$	$\frac{20509 + 8228}{1,0} = 28737 \text{ кВт}$	
$G_{\text{ГТ}} = G_{\text{ВЛ}} (1 + q_m \cdot v_{\text{охл}} \Sigma) = G_1 = 87,72 (1 + 0,02176 \cdot 0,923) = 89,48 \text{ кг/с}$		
$\eta_{\text{ТНД}}$	0,89	табл. 2.1
$L_{\text{ТНД}} = \frac{N_{\text{ТНД}}}{G_{\text{ТНД}}}$	$\frac{28737}{87,634} = 327,9 \text{ кДж / кг}$	
$i_{\text{ТС}}^* = i_{\text{ТВД}}^* - \frac{L_{\text{ТНД}}}{\eta_{\text{ТНД}}}$	$1218 - \frac{327,9}{0,89} = 845,4 \text{ кДж / кг}$	
$\pi(T_{\text{ТС}}^*)$	53,78	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТНДС}}^*$
$\pi_{\text{ТНД}} = \frac{\pi(T_{\text{ТВД}}^*)}{\pi(T_{\text{ТС}}^*)}$	$\frac{207,5}{53,78} = 3,858$	
$p_{\text{ГТ}}^* = p_{\text{ТВД}}^* / \pi_{\text{ТНД}}$	$\frac{659,5}{3,858} = 170,94 \text{ кПа}$	

Продолжение табл. 2.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$i_T^* = \frac{(i_{ТВД}^* - L_{ТНД}) \cdot G_{ГНД} + i_K^* \cdot G_{В1} [(1 - v_{САНД}) + (1 - v_{РКНД}) + (1 - v_{УТНД})]}{G_{ГТ}} =$ $\frac{(1218 - 327,9) \cdot 87,634 + 865,8 \cdot 87,22 [(1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1)]}{89,48} = 888,6 \text{ кДж/кг}$		
T_T^*	846,2 К	$\pi - i - T$ по i_T^*
$\pi(T_T^*)$	64,51	$\pi - i - T$ по i_T^*
$p_I^* = p_T^* \cdot \sigma_I$	$170,94 \cdot 0,99 = 169,23 \text{ кПа}$	
$p_{II}^* / p_I^* = p_{кII}^* \cdot \sigma_{II} / p_I^*$	$\frac{170,74 \cdot 0,995}{169,23} = 1,004$	Необходимо обеспечить $p_{II}^* / p_I^* = 0,95 \dots 1,05$ [1. с.53]
$A_{ТНД} = \frac{G_{ГНД} \sqrt{R \cdot 10^3 \cdot T_{ТНД}^*}}{p_{ТНД}^* \cdot 10^3}$	$\frac{87,634 \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1127,8}}{659,5 \cdot 10^3}$ $= 737 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной $A_{ТНД}$ определенной в проектном расчете
$\bar{n}_{ТНД} = \bar{n}_{в пр} \cdot \sqrt{\frac{T_{н}^*}{T_{нр}^*}}$	$1,0 \cdot \sqrt{\frac{288,16}{244,64}} = 1,085$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Камера смешения		
$G_{\text{см}} = G_I + G_{II} = G_{\Gamma_{\text{ТНД}}} + G_{\text{В II}}$	$89,48 + 382,63 = 472,11 \text{ кг / с}$	
$i_{\text{см}}^* = \frac{i_{\Gamma_{\text{ТНД}}}^* \cdot G_{\Gamma_{\text{ТНД}}} + i_{\text{к II}}^* \cdot G_{\text{В II}}}{G_{\text{см}}}$	$\frac{888,6 \cdot 89,48 + 341,5 \cdot 382,63}{472,11} = 445,2 \text{ кДж / кг}$	
$T_{\text{см}}^*$	443,3 К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{см}}^*$ для $\alpha = \infty$
$\pi(T_{\text{см}}^*)$	5,485	$\pi - i - T$ по $T_{\text{см}}^*, \alpha = \infty$
λ_1	0,38	принимается [1, с.54]
$\pi(\lambda_1)$	0,9201	табл. ГДФ по $\lambda_1, \kappa = 1,33$
$p_I = p_{II} = p_I^* \cdot \pi(\lambda)$	$169,23 \cdot 0,9201 = 155,7 \text{ кПа}$	
$\pi(\lambda_{II}) = p_{II} / p_{II}^* = p_{II} / p_{\text{к II}}^* \cdot \sigma_{II}$	$\frac{155,7}{170,74 \cdot 0,995} = 0,9165$	
$q(\lambda_I)$	0,0567	табл. ГДФ по $\pi(\lambda_I), \kappa = 1,33$
$q(\lambda_{II})$	0,5692	табл. ГДФ по $\pi(\lambda_{II}), \kappa = 1,4$
$F_I = \frac{G_I \cdot \sqrt{T_I^*}}{39,7 \cdot p_I^* \cdot q(\lambda_I)}$	$\frac{89,48 \cdot \sqrt{846,2}}{39,7 \cdot 169,23 \cdot 0,567} = 0,683 \text{ м}^2$	с точностью до 5% эти величины должны совпадать с величинами, F_I, F_{II} и $F_{\text{см}}$, определенными в проектном расчете
$F_{II} = \frac{G_{II} \cdot \sqrt{T_{II}^*}}{40,4 \cdot p_{II}^* \cdot q(\lambda_{II})}$	$\frac{382,63 \cdot \sqrt{342}}{40,4 \cdot 169,89 \cdot 0,5693} = 1,811 \text{ м}^2$	
$F_{\text{см}} = F_I + F_{II}$	$0,683 + 1,811 = 2,494 \text{ м}^2$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$Z(\lambda_I)$	1,5058	табл. ГДФ по λ_I
$Z(\lambda_{II})$	1,4941	табл. ГДФ по λ_{II}
$Z(\lambda_{CM}) = \frac{m}{m+1} \cdot Z(\lambda_{II}) \cdot \sqrt{\frac{T_{II}^*}{T_{CM}^*}} + \frac{1}{m+1} \cdot Z(\lambda_I) \cdot \sqrt{\frac{T_I^*}{T_{CM}^*}} =$ $= \frac{4,362}{4,362+1} \cdot 1,4941 \cdot \sqrt{\frac{341,5}{443,3}} + \frac{1}{4,362+1} \cdot 1,5058 \cdot \sqrt{\frac{846,2}{443,3}} = 1,4548$		
$q(\lambda_{CM})$	0,5872	табл. ГДФ по λ_{CM} , $K = 1,4$
$P_{CM}^* = \frac{G_{CM} \cdot \sqrt{T_{CM}^*} \cdot \sigma_{KCM}}{40,4 \cdot q(\lambda_{CM}) \cdot F_{CM}}$	$\frac{472,11 \cdot \sqrt{443,3} \cdot 0,995}{40,4 \cdot 0,5872 \cdot 2,494} = 167,17 \text{ кПа}$	
Выходное устройство		
$\pi_c = \frac{P_{CM}^*}{P_H}$	$\frac{167,17}{101,33} = 1,649$	$\pi_c < \pi_{c \text{ кр}} = 1,85$
φ_c	0,9945	табл. 2.1
$\pi(T_c) = \frac{\pi(T_{CM}^*)}{\pi_c}$	$\frac{5,485}{2,649} = 3,325$	
i_c	385,79 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_c)_{\alpha=\infty}$
$C_c = \varphi_c \cdot \sqrt{2(i_{CM}^* - i_c)} \cdot 10^3$	$0,9945 \cdot \sqrt{2 \cdot (445,2 - 385,79)} \cdot 10^3 = 342,8 \text{ м/с}$	
$a_{кр} = 18,3 \cdot \sqrt{T_{CM}^*}$	$18,3 \cdot \sqrt{443,3} = 385,3 \text{ м/с}$	

Продолжение табл. 2.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$\lambda_c = C_c / a_{кр}$	$342,8 / 385,3 = 0,8897$	
$q(\lambda_c)$	0,9851	табл. ГДФ по λ_c , к = 1,4
$\lambda_{cs} = \lambda_c / \varphi_c$	$0,8897 / 0,9945 = 0,8946$	
$\pi(\lambda_c)$	0,6094	табл. ГДФ по λ_c , к = 1,4
$\pi(\lambda_{cs})$	0,6057	табл. ГДФ по λ_{cs} , к = 1,4
$\sigma_c = \pi(\lambda_{cs}) / \pi(\lambda_c)$	$0,6057 / 0,6094 = 0,994$	
$\mu F_c = \frac{G_{см} \cdot \sqrt{T_{см}^*}}{m \cdot p_{см}^* \cdot \sigma_c \cdot q(\lambda_c)}$	$\frac{472,11 \cdot \sqrt{443,3}}{40,4 \cdot 167,17 \cdot 0,994 \cdot 0,9851} = 1,503 \text{ м}^2$	с точностью до 5% эта величина должна совпадать с μF_c , определенной в проектном расчете
$p_c - p_n$	0	для $\pi_c < \pi_{с кр}$
Определение тяги и удельного расхода топлива		
$P_{вэл} = G_{см} \cdot C_c \cdot 10^{-3}$	$472,11 \cdot 342,8 \cdot 10^{-3} = 161,83 \text{ кН (16500 кгс)}$	
$C_{уд} = G_{т ч} / P_{вэл}$	$6343 / 161,83 = 39,2 \text{ кг/кН} \cdot \text{ч (0,38 кг/кгс} \cdot \text{ч)}$	
Расчет проектной величины массы двигателя		
$M_{дв} = (M_1 + M_{п} + M_{к см}) \cdot K_{рес} \cdot K_c$	3295	[8, с. 31]
$M_1 = B \cdot (G_{в1})_{пр.вент}^{m_1} \left[\left(\frac{\pi_{к \Sigma}}{\pi_{в1}} \right)^{0,281} - 1 \right]^{m_2} \cdot K_{T_T}$		

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$(G_{в1})_{\text{пр.вент}} = G_{в1} \cdot \frac{1}{\pi_{в1}} \cdot \sqrt{1 + \left(\pi_{в1}^{0,286} - 1\right) \cdot \frac{1}{\eta_{в1}}} =$ $87,72 \cdot \frac{1}{1,54} \cdot \sqrt{1 + \left(1,54^{0,286} - 1\right) \cdot \frac{1}{0,875}} = 62,3 \text{ кг / с}$		величины $\pi_{в1}$ и $\eta_{в1}$ определены ниже
$\pi_{в1} = \pi_{в \text{ вкл}} \cdot \bar{\pi}$	$1,676 \cdot 0,9188 = 1,54$	$\bar{\pi} = 0,9188$ см. [1, рис. 1.4]
$\eta_{в1} = \eta_{в \text{ вкл}} \cdot \bar{\eta}$	$0,8858 \cdot 0,988 = 0,875$	$\bar{\eta} = 0,988$ см. [1, рис. 1.4]
$K_{T_r} = 1 + 2 \cdot 10^{-4} (T_{г \text{ вкл}}^* - 1200) = 1 + 2 \cdot 10^{-4} (1560 - 1200) = 1,0728$		
B	6,96	[8, с.32, табл. 2.2]
m_1	1,2	там же
m_2	0,5	там же
$M_1 = 6,96 \cdot 62,3 \cdot 1,2 \left[\left(\frac{31,96}{1,54} \right)^{0,286} - 1 \right]^{0,5} \cdot 1,0728 = 1248 \text{ кг}$		
$M_{II} = 2,865 \cdot G_{в\Sigma}^{0,903} \cdot m^{0,104} \cdot \pi_{вII}^{1,193} = 2,865 \cdot 470,35^{0,903} \cdot 4,362^{0,104} \cdot 1,685^{1,193} = 1610,6 \text{ кг}$		
$M_{к см} = 2,316 \cdot G_{в\Sigma}^{0,753}$	$2,316 \cdot 470,35^{0,753} = 238,3 \text{ кг}$	
$K_{\text{рес}}$	1,05	[1, с. 78]
K_c	0,95	[1, с. 78]
$M_{дв} = (1248 + 1610,6 + 238,3) \cdot 1 \cdot 0,95 = 2942 \text{ кг}$		
$\gamma_{дв} = M_{дв} / P_{вкл}$	$\frac{2942}{161,83} = 18,18 \text{ кг / кВт}$	

Продолжение табл.2.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Оценка показателей эффективности проектируемого ТРДД в системе ДПС		
Масса силовой установки		
$n_{дв}$	4	задается или принимается по прототипу ЛА
$K_{сy}$	1,5	[1, с.27]
$M_{сy} = M_{дв} \cdot K_{сy} \cdot n_{дв}$	$2942 \cdot 1,5 \cdot 4 = 17652 \text{ кг}$	
Необходимое топливо на борту самолета		
$L_{п}$	7500 км	задается или выбирается по прототипу ЛА
$\bar{V}_T$	0,97	[1, с.28, рис. 1,5] по $L_{п}$
$V_T = \bar{V}_T \cdot 3,6 \cdot a \cdot M = \bar{V}_T \cdot 3,6 \cdot 20,05 \cdot \sqrt{T_H} \cdot M$	$0,97 \cdot 3,6 \cdot 20,05 \cdot \sqrt{216,7} \cdot 0,8 = 824,5 \text{ км/ч}$	
$\bar{G}_{топ}$	1,020	[1, с.28, рис. 1,5] по $L_{п}$
$t_{нз}$	1 ч	[1, с.28]
$M_{мЛА} = n_{дв} \cdot \bar{G}_{топ} \cdot C_{уд} \cdot P_{дв \text{ кр}} \left(\frac{L_{п}}{V_T} + t_{нз} \right)$	$4 \cdot 1,020 \cdot 61,74 \cdot 39,455 \cdot \left(\frac{7500}{824,5} + 1 \right) = 100345 \text{ кг}$	
Суммарная масса силовой установки и топлива		
$\bar{M}_{мс}$	1,02	[1, с.28]
$M_{сy+m} = M_{сy} + \bar{M}_{мс} \cdot M_{мЛА}$	$17652 + 1,02 \cdot 100345 = 120004 \text{ кг}$	
Взлетная масса самолета		
$\bar{M}_{пл}^*$	0,35	[1, с.27, табл.1.1]
$\bar{M}_{кн}$	0,2	[1, с.27, табл.1.1] или по прототипу

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$M_0 = \frac{M_{cy+m}}{1 - \overline{M}_{пл}^* - \overline{M}_{кн}}$	$\frac{120004}{1 - 0,35 - 0,2} = 266675 \text{ кг}$	Необходимо сопоставить с прототипом ЛА
Проверка величины стартовой тяговооруженности самолета		
$\mu_{взл} = \frac{P_{взл} \cdot n_{дв}}{M_0 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{161,83 \cdot 4}{266675 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}} = 0,25$	Сопоставить с табл. 1.2 [1, с. 29]
Расчет удельных затрат топлива ЛА на 1 т.км		
$M_{кн} = M_0 \cdot \overline{M}_{кн}$	$266675 \cdot 0,2 = 53335 \text{ кг}$	
$M_{mL} = \overline{G}_{топ} \cdot C_{уд} \cdot P_{дв \cdot кр} \cdot n_{дв} \cdot \frac{L_{п}}{V_{т}}$	$1,02 \cdot 61,74 \cdot 39,455 \cdot 4 \cdot \frac{7500}{824,5} = 90406 \text{ кг}$	
$C_{ткм} = \frac{M_{mL}}{M_{кн} \cdot L_{п} \cdot 10^{-3}}$	$\frac{90406}{53355 \cdot 7500 \cdot 10^{-3}} = 0,226 \text{ кг/т.км}$	полученная величина должна быть лучше записанной в задании

3. РАСЧЕТ ТВВД (ТВД)

В качестве примера рассмотрен расчет ТВВД с приводом тянущего винтовентилятора и компрессора НД от турбины НД.

Схема такого двигателя приведена на рис. 3. 1.

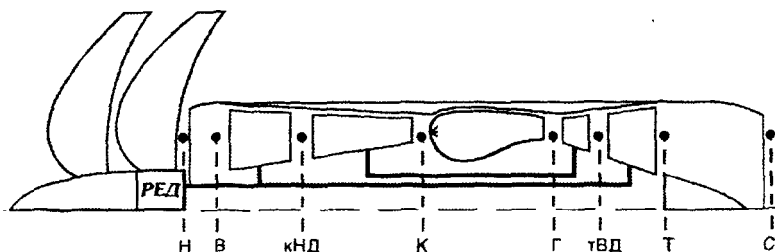


Рис.3.1. Схема ТВВД (ТВД)

3.1. Исходные данные к расчету

Пример задания на курсовую (дипломную) работу по разделу проектирования ТВВД (ТВД).

Заданные режимы работы двигателя:

$N_{э\text{ взл}} = 11000 \text{ экВт}$ (14946 э.л.с.) при $H_{п} = 0$, $M_{п} = 0$, САУ;

$N_{э\text{ кр}} = 6600 \text{ экВт}$ в условиях полета $H_{п} = 11 \text{ км}$, $M_{п} = 0,8$, САУ.

Заданный прототип двигателя – проект ТВВД STS589 фирмы Пратт-Уитни
или ТВВД Д-27 МКБ “Прогресс” [13].

Заданный прототип ЛА – Боннг 757-200 или АН-180.

Расчетная дальность полета ЛА – $L_{п} = 3500 \text{ км}$.

Ограничения:

максимальная температура газа в горле 1-го СА турбины $T_{г\text{ max}}^* \leq 1650 \text{ К}$;

удельные затраты топлива ЛА $C_{т\text{ км}} \leq 0,20 \text{ кг / т} \cdot \text{км}$.

Таблица 3.1

Вариант исходных данных к расчету ТВВД (ТВД)

Параметры	Значения параметров	
	$H_{\text{п}} = 11 \text{ км}, M_{\text{п}} = 0,8;$ $N_{\text{э кр}} = 6600 \text{ кВт}$	$H_{\text{п}} = 0, M_{\text{п}} = 0,^{*)}$ $N_{\text{э взл}} = 11000 \text{ кВт}$
$T_{\text{г}}^*, \text{ К}$	1500	1550
$\pi_{\text{к}\Sigma}$	30	21,64
$\pi_{\text{к нд}}$	4	2,96
$\eta_{\text{к нд}}$	0,867	0,867
$\pi_{\text{к вд}}$	7,5	7,31
$\eta_{\text{к вд}}$	0,869	0,872
$\eta_{\text{т вд}}$	0,89	0,89
$\eta_{\text{т нд}}$	0,923	0,929
$\pi_{\text{с}}$	1,55	1,12
$a, \text{ м / с}$	295,07	340,28
$\sigma_{\text{вх}} = 0,985$	$\eta_{\text{м вд}} = 0,995$	$\nu_{\text{пл са вд}} = 0,955$
$\sigma_{\text{кс}} = 0,95$	$\varphi_{\text{с}} = 0,94$	$\nu_{\text{са вд}} = 0,985$
$\eta_{\text{г}} = 0,99$	$\eta_{\text{вв}} = 0,8$	$\nu_{\text{рк вд}} = 0,97$
$\eta_{\text{м нд}} = 1,0$	$\eta_{\text{ред}} = 0,995$	$\nu_{\text{ут вд}} = 0,98$
$\nu_{\text{пл са нд}} = 1,0$	$\nu_{\text{са нд}} = 0,99$	$\nu_{\text{рк нд}} = 1,0$
		$\nu_{\text{ут нд}} = 1,0$

^{*)} Значения величин в этой колонке получены путем пересчета соответствующих проектных данных по рекомендациям учебного пособия [1], см. раздел табл. 3.2 "Предварительная оценка исходных данных ТВВД (ТВД) для расчета взлетного режима. с.81...82.

3.2. Проектный расчет ТВВД (ТВД)

для условий крейсерского полета

В принятой в данном пособии постановке термогазодинамический расчет ТВВД двухвальной схемы с приводом компрессора НД и винтовентилятора от турбины НД ничем не отличается от расчета ТВД аналогичной схемы, кроме различия в условиях полета и расчетной величины $\eta_{вв}$. Располагая данной методикой, не сложно самостоятельно составить методику расчета одновального ТВД классической схемы (турбина приводит воздушный винт и компрессор). Для этого необходимо изъять каскад высокого давления.

Проектный расчет выполняется при $G_v = 1 \text{ кг/с}$.

Таблица 3.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Входное устройство		
$V_n = M_n \cdot a$	0,8·295,07 = 236,1 м/с	
T_n	216,7 К	МСА [5, с.170] или прилож 2.
P_n	22,766 кПа	МСА [5, с. 170]
i_n	216,9 кДж/кг	$\pi - i - T^{(1)}$,
$\pi(T_n)$	0,447	по величине T_n
$i_n^* = i_n + \frac{V_n^2}{2000}$	$216,9 + \frac{236,1^2}{2000} = 244,77 \text{ кДж / кг}$	

¹⁾ Здесь и далее $\pi - i - T$ – диаграммы термодинамических функций для воздуха $\alpha = \infty$ и газа $\alpha = 4$ (см. Приложение 1)

Продолжение табл.3.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\pi(T_n^*)$	0,6811	$\pi - i - T$, по значению i_n^*
$P_n^* = P_n \cdot \frac{\pi(T_n^*)}{\pi(T_n)}$	$22,766 \cdot \frac{0,6811}{0,447} = 34,69$ кПа	
T_n^*	244,77 К	$\pi - i - T$, по значению i_n^*
G'_B ¹⁾	1 кг/с	принимается для проектного расчета
$\bar{G}_B$ пр	1,0	принимается для проектного расчета
Компрессор низкого давления		
$\bar{n}_{кнд}$ пр	1,0	принимается для проектного расчета
$\pi_{кнд}$	4	табл. 3.1
$\eta_{кнд}$	0,867	табл. 3.1
$P_{кнд}^* = P_n^* \cdot \sigma_{вх} \cdot \pi_{кнд}$	$34,69 \cdot 0,985 \cdot 4 = 136,36$ кПа	
$\pi(T_{кнд(s)}^*) = \pi(T_n^*) \cdot \pi_{кнд}$	$0,6811 \cdot 4 = 2,7244$	
$i_{кнд(s)}^*$	364,27 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{кнд(s)}^*)$
$L_{кнд} = \frac{i_{кнд(s)}^* - i_n^*}{\eta_{кнд}}$	$\frac{364,27 - 244,77}{0,867} = 137,49$ кДж/кг	
$i_{кнд}^* = i_n^* + L_{кнд}$	$244,77 + 137,49 = 382,26$ кДж/кг	
$T_{кнд}^*$	381,33 К	$\pi - i - T$ по $i_{кнд}^*$

¹⁾ Верхний индекс "*" означает, что данный параметр определен для $G'_B = 1$ кг/с.

Продолжение табл.3.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\pi(T_{кНД}^*)$	3,22	$\pi-i-T$ по $i_{кНД}^*$
$N_{кНД} = G'_в \cdot L_{кНД}$	$1 \cdot 137,49 = 137,49$ кВт	
Компрессор высокого давления		
$\bar{G}_{в пр кВД}$	1,0	принимается для проектного расчета
$\pi_{кВД}$	7,5	табл. 3.1
$\eta_{кВД}$	0,869	табл. 3.1
$P_k^* = P_{кНД}^* \cdot \pi_{кВД}$	$136,36 \cdot 7,5 = 1022,7$ кПа	
$\pi(T_{кс}^*) = \pi(T_{кНД}^*) \cdot \pi_{кВД}$	$3,22 \cdot 7,5 = 24,15$	
$i_{кс}^*$	678,6 кДж/кг	$\pi-i-T$ по $\pi(T_{кВДs}^*)$
$L_{кВД} = \frac{i_{кс}^* - i_{кНД}^*}{\eta_{кВД}}$	$\frac{678,6 - 382,26}{0,869} = 340,89$ кДж/кг	
$i_k^* = i_{кНД}^* + L_{кВД}$	$382,26 + 340,89 = 723,15$ кДж/кг	
T_k^*	709,04 К	$\pi-i-T$ по i_k^*
$\pi(T_k^*)$	30,25	$\pi-i-T$ по i_k^*
$N_{кВД} = G'_в \cdot L_{кВД}$	$1 \cdot 340,89 = 340,89$ кВт	
$i_{ка=1}^*$	766,85 кДж/кг	[4, с.50] или прилож. 3 по T_k^*

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Камера сгорания		
η_{Γ}	0,99	табл.3.1
$\sigma_{\text{КС}}$	0,95	табл.3.1
T_{Γ}^*	1500 К	табл.3.1
$i_{\Gamma}^* \alpha=4$	1672,3 кДж/кг	$\pi-i-T$ по T_{Γ}^*
$i_{\Gamma}^* \alpha=1$	1783,4 кДж/кг	[4, с.50] или прилож.3 по T_{Γ}^*
$i_{\Gamma}^* \alpha=\infty$	1636,2 кДж/кг	$\pi-i-T$ по T_{Γ}^* $\alpha=\infty$
$i_{293}^* \alpha=1$	302,93 кДж/кг	[4, с.50] или прилож.3 по $T=293\text{К}$
$i_{293}^* \alpha=\infty$	293,32 кДж/кг	$\pi-i-T$ по $T=293\text{К}$, $\alpha=\infty$
$\pi(T_{\Gamma}^*)_{\alpha=4}$	700,6	$\pi-i-T$ по T_{Γ}^*
$H_u = H_{u0} + L_0(i_{\text{к}}^* - i_{293}^*)_{\alpha=\infty} - (1 + L_0)(i_{\text{к}}^* - i_{293}^*)_{\alpha=1}$	$42900 + 14,78(723,15 - 293,32) - (1 + 14,78)(766,85 - 302,93) = 41932,23$ кДж/кг	
$q_m = \frac{(i_{\Gamma}^* - i_{\text{к}}^*)_{\alpha=\infty}}{H_u \cdot \eta_{\Gamma} - (1 + L_0)(i_{\Gamma}^* - i_{\text{к}}^*)_{\alpha=1} + (i_{\Gamma}^* - i_{\text{к}}^*)_{\alpha=\infty}} =$		проверить по номограмме $q_m = f(T_{\Gamma}^*, T_{\text{к}}^*)$ [1, с.43] [4, с.124...126]
$= \frac{1636,2 - 723,15}{41932,23 \cdot 0,99 - (1 + 14,78)(1783,4 - 766,85) + 14,78(1636,2 - 723,15)} =$	0,02343	

Продолжение табл. 3.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$v_{\text{охл } \Sigma \text{ ВД}} = 1 - \left[(1 - v_{\text{пл са вД}}) + (1 - v_{\text{са вД}}) + (1 - v_{\text{рк вД}}) + (1 - v_{\text{ут вД}}) \right] =$ $= 1 - [(1 - 1) + (1 - 0,985) + (1 - 0,97) + (1 - 0,98)] =$	0,935	При расчете этой величины принимается $v_{\text{пл са вД}} = 1$
$v_{\text{охл } \Sigma \text{ НД}} = 1 - \left[(1 - v_{\text{пл са нД}}) + (1 - v_{\text{охл са нД}}) + (1 - v_{\text{рк нД}}) + (1 - v_{\text{ут нД}}) \right] =$ $= 1 - [(1 - 1) + (1 - 0,99) + (1 - 1) + (1 - 1)] =$	0,99	
$v_{\text{охл } \Sigma} = 1 - \left[(1 - v_{\text{охл } \Sigma \text{ ВД}}) + (1 - v_{\text{охл } \Sigma \text{ НД}}) \right] =$ $= 1 - [(1 - 0,935) + (1 - 0,99)] =$	0,925	
$G'_{\text{в кс}} = G'_{\text{в}} - (1 - v_{\text{охл } \Sigma}) \cdot G'_{\text{в}} =$ $= 1 - (1 - 0,925) \cdot 1 =$	0,925 кг/с	
$G'_{\text{мс}} = q_m \cdot G'_{\text{в кс}} = 0,02343 \cdot 0,925 =$	0,021625 кг/с	
$G'_{\text{м ч}} = 3600 \cdot G'_{\text{мс}} = 3600 \cdot 0,021625 =$	77,85 кг/с	
$G'_{\text{г кс}} = G'_{\text{в кс}} + G'_{\text{мс}} = G'_{\text{г вД}} = 0,925 + 0,021625 =$	0,9467 кг/с	
$i_{\text{кс}}^* = \frac{G'_{\text{г кс}} \cdot i_{\text{г}}^* \alpha = 4 - i_{\text{к}}^* \alpha = \infty (1 - v_{\text{пл са вД}}) \cdot G'_{\text{в 1}}}{G'_{\text{г кс}} - G'_{\text{в 1}} (1 - v_{\text{пл са вД}})} =$ $= \frac{0,9467 \cdot 1672,3 - 723,15 (1 - 0,955) \cdot 1}{0,9467 - 1 (1 - 0,955)} =$	1719,7 кДж/кг	определяется при наличии пленочного охлаждения ($v_{\text{пл са нД}} \neq 1$)

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
T_{KC}^*	1536 К	
$i_{CA}^* = \frac{G'_{ГКС} \cdot i_{Г\alpha=4}^* + i_{К\alpha=\infty}^* (1 - \nu_{CAВД}) \cdot G'_B}{G'_{ГКС} + (1 - \nu_{CAВД}) \cdot G'_B} =$ $= \frac{0,9467 \cdot 1672,3 + 723,15 (1 - 0,985) \cdot 1}{0,9467 + (1 - 0,985) \cdot 1} =$	1657,5 кДж/кг	
T_{CA}^*	1486,4 К	$\pi - i - T$ по i_{CA}^*
$\alpha_{KC} = \frac{1}{q_m L_0}$	$\frac{1}{0,02343 \cdot 14,78} = 2,89$	
$P_{Г}^* = P_{К}^* \cdot \sigma_{KC}$	1022,7·0,95 = 971,6 кПа	
Турбина высокого давления		
$N_{ТВД} = N_{КВД} / \eta_{мВД}$	340,89 / 0,995 = 342,263кВт	
$G'_{ГТВД} = G'_{ГКС} + G'_B \left[(1 - \nu_{CAВД}) + (1 - \nu_{РКВД}) + \right.$ $\left. + (1 - \nu_{УГВД}) + (1 - \nu_{ПСАВД}) \right] = G'_{ГВД} =$ $= 0,9467 + 1 \cdot [(1 - 0,985) + (1 - 0,97) +$ $+ (1 - 0,98) + (1 - 1)] =$	1,0117 кг/с	
$\eta_{ТВД}$	0,89	табл. 3.1
$L_{ТВД} = \frac{N_{ТВД}}{G'_{ГВД}}$	$\frac{342,63}{0,9467} = 361,92$ кДж/кг	
$i_{ТВДС}^* = i_{Г}^* - \frac{L_{ТВД}}{\eta_{ТВД}} = 1672,3 - \frac{361,92}{0,89} =$	1265,6 кДж/кг	

Продолжение табл.3.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\pi(T_{\text{ТВД}}^*)$	239,75	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$
$\pi_{\text{ТВД}} = \frac{\pi(T_{\text{Г}}^*)}{\pi(T_{\text{ТВД}}^*)}$	$\frac{700,6}{239,75} = 2,897$	
$P_{\text{ТВД}}^* = P_{\text{Г}}^* / \pi_{\text{ТВД}}$	$971,6 / 2,897 = 335,41 \text{ кПа}$	
$i_{\text{ТВД}}^* = \frac{(i^* - L_{\text{ТВД}}) \cdot G'_{\text{ГКС}} + i_{\text{К}}^* \cdot G'_{\text{В}} \left[(1 - v_{\text{СА ВД}}) + (1 - v_{\text{РК ВД}}) + (1 - v_{\text{УТ ВД}}) + \right. \\ \left. + (1 - v_{\text{ПЛ СА НД}}) \right]}{G'_{\text{Г ТВД}}} = \frac{(1672,3 - 361,92) \cdot 0,9467 + 723,15 \cdot 1 \cdot [(1 - 0,985) + \\ 1,0117 + (1 - 0,97) + (1 - 0,98) + (1 - 1)]}{1,0117} = 1280,7 \text{ кДж/кг}$		
$T_{\text{ТВД}}^*$	1179,9 К	
$\pi(T_{\text{ТВД}}^*)$	250,7	
$A'_{\text{ТВД}} = \frac{G'_{\text{ГКС}} \cdot \sqrt{R_{\text{Г}} \cdot 10^3 \cdot T_{\text{Г}}^*}}{P_{\text{Г ВД}}^* \cdot 10^3}$	$\frac{0,9467 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1500}}{971,6 \cdot 10^3} = 6,413 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\bar{n}_{\text{ТВД}} = \sqrt{T_{\text{Г}}^* / T_{\text{ГР}}^*}$	$\sqrt{1500 / 1500} = 1,0$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Турбина низкого давления		
π_c	1,55	табл. 3.1
$p_T^* = p_H \cdot \pi_c$	$22,766 \cdot 1,55 = 35,18 \text{ кПа}$	
$\pi_{ТНД} = p_{ТВД}^* / p_T^*$	$335,41 / 35,18 = 9,533$	
$\eta_{ТНД}$	0,923	табл. 3.1
$\pi(T_{ТС}^*) = \frac{\pi(T_{ТВД}^*)}{\pi_T}$	$\frac{250,7}{9,533} = 26,14$	
$i_{ТС}^*$	692,51 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{ТС}^*)$
$L_{ТНД} = (i_{ТВД}^* - i_{ТС}^*) \cdot \eta_{ТНД}$	$(1280,7 - 693,8) \cdot 0,923 = 542,9 \text{ кДж / кг}$	
$N_{ТНД} = L_{ТНД} \cdot G'_{ТНД}$	$542,9 \cdot 1,0117 = 549,25 \text{ кВт}$	
$G'_{ГТ} = G'_B (1 + q_m \cdot v_{охл \Sigma}) = G'_{ГС}$	$1 \cdot (1 + 0,02343) = 1,0217 \text{ кг/с}$	
$i_T^* = \frac{(i_{ТВД}^* - L_{ТНД}) \cdot G'_{ТНД} + i_K^* \cdot G'_B \left[(1 - v_{сЛНД}) + (1 - v_{рКНД}) + (1 - v_{уТНД}) \right]}{G'_{ГТ}}$ $\frac{(1280,7 - 542,9) \cdot 1,0117 + 723,15 \cdot 1 \cdot [(1 - 0,99) + (1 - 1) + (1 - 1)]}{1,0217} = 741,39 \text{ кДж/кг}$		
T_T^*	715 К	$\pi - i - T$ по i_T^*
$\pi(T_T^*)$	33,42	$\pi - i - T$ по i_T^*

Продолжение табл. 3.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$A'_{\text{тнд}} = \frac{G'_{\text{тнд}} \cdot \sqrt{R_{\text{т}} \cdot 10^3 \cdot T_{\text{твд}}^*}}{P_{\text{твд}}^* \cdot 10^3}$	$\frac{1,0117 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1179,9}}{335,41 \cdot 10^3} = 17,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\bar{n}_{\text{тнд}} = \bar{n}_{\text{кнд}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{н}}^*}{T_{\text{нр}}^*}}$	$1 \cdot \sqrt{\frac{244,77}{244,77}} = 1$	
Выходное устройство		
Φ_c	0,94	табл. 3.1
$\pi(T_c) = \frac{\pi(T_{\text{т}}^*)}{\pi_c}$	$\frac{33,42}{1,55} = 21,56$	
i_c	656,19 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_c)$
$C_c = \Phi_c \cdot \sqrt{2 \cdot (i_{\text{т}}^* - i_c) \cdot 10^3}$	$0,94 \cdot \sqrt{2 \cdot (741,39 - 656,19) \cdot 10^3} = 388,02 \text{ м/с}$	
$a_{\text{кр}} = 18,1 \cdot \sqrt{T_{\text{т}}^*}$	$18,1 \cdot \sqrt{715} = 484 \text{ м/с}$	
$\lambda_c = C_c / a_{\text{кр}}$	$388,02 / 484 = 0,8017$	
$q(\lambda_c)$	0,9534	табл. ГДФ ¹⁾ $\kappa = 1,33$
$\lambda_{cs} = \lambda_c / \Phi_c$	$0,8017 / 0,94 = 0,8528$	
$\pi(\lambda_c)$	0,6808	табл. ГДФ по $\lambda_c, \kappa = 1,33$
$\pi(\lambda_{cs})$	0,6452	табл. ГДФ по $\lambda_{cs}, \kappa = 1,33$

¹⁾ Здесь и далее "табл. ГДФ" – таблицам газодинамических функций для воздуха $\kappa = 1,4$ и газа $\kappa = 1,33$ (см. Приложение 4)

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\sigma_c = \frac{\pi(\lambda_{Cs})}{\pi(\lambda_c)}$	$\frac{0,6452}{0,6808} = 0,948$	
$\mu F'_c = \frac{G'_{гс} \cdot \sqrt{T_{тнд}^*}}{m_{гп} \cdot p_{тнд}^* \cdot \sigma_c \cdot q(\lambda_c)}$	$\frac{1,0217 \cdot \sqrt{715}}{39,7 \cdot 35,18 \cdot 0,948 \cdot 0,953} = 215,86 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
Удельные параметры двигателя		
$N_{в\text{ уд}} = (N_{тнд} \cdot \eta_{мнд} - N_{кнд}) \cdot \eta_{ред}$	$(542,9 \cdot 1 - 137,49) \cdot 0,995 = 409,7 \text{ кВт} \cdot \text{с} / \text{кг}$	
$P_{рс\text{ уд}} = (G'_{гс} \cdot C_c - G'_в \cdot V_{п}) \cdot 10^{-3}$	$(1,0217 \cdot 388,02 - 236,1) \cdot 10^{-3} = 0,1603 \text{ кН} \cdot \text{с} / \text{кг}$	
$N_{рс\text{ уд}} = \frac{P_{рс\text{ уд}} \cdot V_{п}}{\eta_{вв}}$	$\frac{0,1603 \cdot 236,1}{0,8} = 47,3 \text{ экВт} \cdot \text{с} / \text{кг}$	
$N_{э\text{ уд}} = N_{в\text{ уд}} + N_{рс\text{ уд}}$	$409,7 + 47,3 = 457 \text{ экВт} \cdot \text{с} / \text{кг}$	
$P_{твд\text{ уд}} = \frac{N_{в\text{ уд}} \cdot \eta_{в}}{V_{п}} + P_{рс\text{ уд}}$	$\frac{403,7 \cdot 0,8}{236,1} + 0,1603 = 1,548 \text{ кН} \cdot \text{с} / \text{кг}$	
$C_э = G'_{мч} / N_{э\text{ уд}}$	$77,85 / 457 = 0,1704 \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$ (0,1254 кг/эл.с. · ч)	
$C_{уд} = G'_{мч} / P_{твд\text{ уд}}$	$77,85 / 1,548 = 50,29 \text{ кг/кН} \cdot \text{ч}$ (0,493 кг/кгс · ч)	

Продолжение табл.3.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Основные проектные данные двигателя при $N_s = 6600$ э кВт		
$G_{вр} = \frac{N_s}{N_{эуд}}$	$\frac{6600}{457} = 14,44 \text{ кг/с}$	
$G_{мч} = C_3 \cdot N_s$	$0,1704 \cdot 6600 = 1124 \text{ кг/ч}$	
$F_{вх} = \frac{G_{вр} \cdot \sqrt{T_v^* = T_n^*}}{40,4 \cdot p_n^* \cdot q(\lambda_{вх})}$	$\frac{14,44 \cdot \sqrt{244,02}}{40,4 \cdot 34,69 \cdot 0,875} = 0,19 \text{ м}^2$	$q(\lambda_{вх}) = 0,875$ принята по табл. 2.1 [1]
$A_{ТВД} = A'_{ТВД} \cdot G_{вр}$	$6,413 \cdot 10^{-4} \cdot 14,44 = 92,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$A_{ТНД} = A'_{ТНД} \cdot G_{вр}$	$17,6 \cdot 10^{-4} \cdot 14,44 = 254,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$F_c = F'_c \cdot G_{вр}$	$215,86 \cdot 10^{-4} \cdot 14,44 = 0,3117 \text{ м}^2$	
$G_{ГВД} = G'_{ГВД} \cdot G_{вр}$	$0,9467 \cdot 14,44 = 13,67 \text{ кг/с}$	
$G_{ГНД} = G'_{ГНД} \cdot G_{вр}$	$1,0117 \cdot 14,44 = 14,609 \text{ кг/с}$	
$G_{Гс} = G'_{Гс} \cdot G_{вр}$	$1,0217 \cdot 14,44 = 14,75 \text{ кг/с}$	
$N_v = N_{вуд} \cdot G_{вр}$	$409,7 \cdot 14,44 = 5916 \text{ кВт}$	
$P_{рс} = P_{рсуд} \cdot G_{вр}$	$0,1603 \cdot 14,44 = 2,315 \text{ кН}$	
$P_{ТВД} = P_{ТВДуд} \cdot G_{вр}$	$1,548 \cdot 14,44 = 22,35 \text{ кН}$	
$D_{\text{дв}} = \bar{D} \left[\frac{4F_{вх}}{\pi(1-\bar{d}_{1к}^2)} \right]^{-0,5}$	$1,9 \left[\frac{4 \cdot 0,19}{3,14 \cdot (1-0,5^2)} \right]^{-0,5} = 1,08 \text{ м}$	$\bar{D}=1,9$ $\bar{d}_{1к}=0,5$ рекомендации [1, с. 121]

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Предварительная оценка исходных параметров ТВВД (ТВД) для расчета взлетного режима		
$\bar{N}_э кр = N_э кр / N_э взл$	6600 / 11000 = 0,6	в табл. 3.1
$\bar{T}_г^* = T_{г взл}^* / T_{г кр}^*$	1,033	рис. 5.4 [1, с.114] по $\bar{N}_э$
$\bar{\pi}_с = \pi_{с взл} / \pi_{с кр}$	0,722	там же
$\bar{\pi}_{к НД} = \pi_{к ВД взл} / \pi_{к ВД кр}$	0,975	там же
$\bar{\pi}_{к НД} = \pi_{к НД взл} / \pi_{к НД кр}$	0,73	[1, с.114]
$\bar{\eta}_{к НД} = \eta_{к НД взл} / \eta_{к НД кр}$	1,0	там же
$\bar{\eta}_{т НД} = \eta_{т НД взл} / \eta_{т НД кр}$	0,99	там же
$\bar{G}_{в пр} = G_{в пр взл} / G_{в пр кр}$	0,75	там же
$\bar{G}_{в пр к ВД} = \frac{\bar{G}_{в пр к НД}}{\bar{\pi}_{к НД}^{0,857}}$	$\frac{0,75}{0,74^{0,857}} = 0,97$	
$\bar{\eta}_{к ВД} = f(\bar{G}_{в пр к ВД} \text{ и } \pi_{к ВД})$	1,0034	[1, рис.2.1] по $\bar{G}_{в пр}$ и $\pi_{к ВД}$
$\bar{n}_{пр ВД} = n_{пр ВД взл} / n_{пр ВД кр}$	0,975	[1, рис.2.1] по $\bar{G}_{в пр}$ и $\pi_{к ВД}$
$T_{г взл} = T_{г кр}^* \cdot \bar{T}_г^*$	1500 · 1,033 = 1550 К	В случае, если проектный расчет выполняется при Н = 0, М = 0,
$\pi_{с взл} = \pi_{с кр} \cdot \bar{\pi}_с$	1,55 · 0,72 = 1,12	эти величины задаются преподавателем
$\pi_{к ВД взл} = \pi_{к ВД} \cdot \bar{\pi}_{к ВД}$	7,5 · 0,975 = 7,31	либо выбираются самостоятельно
$\pi_{к НД взл} = \pi_{к НД} \cdot \bar{\pi}_{к НД}$	4 · 0,73 = 2,92	[1, глава 2]

Окончание табл.3.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\eta_{к\text{ НД взл}} = \eta_{к\text{ НД}} \cdot \bar{\eta}_{к\text{ НД}}$	$0,867 \cdot 1,0 = 0,867$	
$\eta_{к\text{ ВД взл}} = \eta_{к\text{ ВД}} \cdot \bar{\eta}_{к\text{ ВД}}$	$0,869 \cdot 1,0034 = 0,872$	
$\eta_{т\text{ ВД взл}} = \eta_{т\text{ ВД кр}} = \text{const}$	0,89	
$\eta_{т\text{ ЦД взл}} = (\eta_{т\text{ НД р}} + \Delta\eta_{т\text{ Rc}}) \cdot \bar{\eta}_{т\text{ НД}}$	$(0,923 + 0,015) \cdot 0,99 = 0,929$	$\Delta\eta_{т\text{ Rc}} = 0,015$ [1, с.50]
$G_{в\text{ взл}} = G_{в\text{ р}} \cdot \frac{101,33}{p_{н}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_{н}^*}{288,16}} \cdot G_{в\text{ пр}} =$ $= 14,44 \cdot \frac{101,33}{34,62} \cdot \sqrt{\frac{244,72}{288,16}} \cdot 0,75 = 29,01 \text{ кг / с}$		Если расчет ТВВД (ТВД) при $H = 0$, $M = 0$ проводится после проектного, то он выполняется для $G_{в\text{ взл}}$ Если же проводится проектный расчет ТРДД при $H = 0$, $M = 0$, то он выполняется для $G_{в} = 1 \text{ кг/с}$

3.3. Расчет ТВВД (ТВД) на взлетном режиме

Таблица 3.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Входное устройство		
$V_{п} = M_{п} \cdot a$	$0 \cdot 340,28 = 0$	$a = 340,28$ [5, с.169]
$T_{н},$	288,16 К	там же
$p_{н},$	101,33 кПа	там же
$i_{н},$	288,4 кДж / кг	табл. $\pi - i - T$,
$\pi(T_{н})$	1,207	по величине $T_{н}$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$i_H^* = i_H$, т.к. $V_{II} = 0$	288,4 кДж/кг	
$p_H^* = p_H$, т.к. $V_{II} = 0$	101,33 кПа	
$\pi(T_H^*) = \pi(T_H)$	1,207	
$T_H^* = T_H$	288,16 К	
Компрессор низкого давления		
$\bar{G}_{в пр}$	0,75	
$\pi_{к НД}$	2,96	табл. 3.1
$\bar{n}_{пр к НД} = \sqrt{\frac{T_{Н кр}^*}{T_{Н вкл}^*}}$	$\sqrt{\frac{244,72}{288,16}} = 0,92$	
$\eta_{к НД}$	0,867	табл. 3.1
$p_{к НД}^* = p_H^* \cdot \sigma_{вх} \cdot \pi_{к НД}$	$101,33 \cdot 0,985 \cdot 2,92 = 291,42$ кПа	
$\pi(T_{к НДс}^*) = \pi(T_H^*) \cdot \pi_{к НД}$	$1,207 \cdot 2,92 = 3,5244$	
$i_{к НДс}^*$	392,22 кДж/кг	$\pi-i-T$ по $\pi(T_{к НДс}^*)$
$L_{к НД} = \frac{i_{к НДс}^* - i_H^*}{\eta_{к НД}}$	$\frac{392,22 - 288,4}{0,867} = 119,67$ кДж/кг	
$i_{к НД}^* = i_H^* + L_{к НД}$	$288,4 + 119,67 = 408,48$ кДж/кг	
$T_{к НД}^*$	406,9 К	$\pi-i-T$ по $i_{к НД}^*$
$\pi(T_{к НД}^*)$	4,031	$\pi-i-T$ по $T_{к НД}^*$
$N_{к НД} = G_{в вкл} \cdot L_{к НД}$	$29,01 \cdot 119,67 = 3180,16$ кВт	

Продолжение табл. 3.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Компрессор высокого давления		
$\bar{G}_{\text{в пр к ВД}}$	0,97	
$\pi_{\text{к ВД}}$	7,31	табл. 3.1
$\eta_{\text{к ВД}}$	0,872	табл. 3.1
$P_{\text{к}}^* = P_{\text{к ВД}}^* = P_{\text{к НД}}^* \cdot \pi_{\text{к ВД}}$	$291,42 \cdot 7,31 = 2130,3$ кПа	
$\pi(T_{\text{к с}}^*) = \pi(T_{\text{к НД}}^*) \cdot \pi_{\text{к ВД}}$	$4,031 \cdot 7,31 = 29,47$	
$i_{\text{к с}}^*$	717,82 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{\text{к НД}}^*)$
$L_{\text{к ВД}} = \frac{i_{\text{к с}}^* - i_{\text{к НД}}^*}{\eta_{\text{к ВД}}}$	$\frac{718,7 - 408,07}{0,872} = 355,22$ кДж/кг	
$i_{\text{к}}^* = i_{\text{к НД}}^* + L_{\text{к ВД}}$	$408,48 + 355,22 = 763,7$ кДж/кг	
$T_{\text{к}}^*$	746,7 К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{к}}^*$
$i_{\text{к } \alpha=1}^*$	810,46 кДж/кг	[4, с. 50] или прилож 3 по $T_{\text{к}}^*$
$N_{\text{к ВД}} = G_{\text{в вкл}} \cdot L_{\text{к ВД}}$	$29,01 \cdot 355,22 = 10319$ кВт	
Камера сгорания		
$T_{\text{г}}^*$	1550 К	табл. 3.1
$i_{\text{г } \alpha=4}^*$	1737,3 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $T_{\text{г}}^*$
$\pi(T_{\text{г}}^*) \alpha = 4$	808,4	$\pi - i - T$ по $T_{\text{г}}^*$
$i_{\text{г } \alpha=1}^*$	1851,8 кДж/кг	[4, с. 50] или прилож 3 по $T_{\text{г}}^*$
$i_{\text{г } \alpha=\infty}^*$	1696,8 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $T_{\text{г}}^* \alpha = \infty$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$H_u = H_{u0} + L_0(i_{\kappa}^* - i_{293})_{\alpha=\infty} - (1 + L_0)(i_{\kappa}^* - i_{293})_{\alpha=1} = 42900 + 14,78(763,7 - 293,32) -$ $- (1 + 14,78)(810,4 - 302,93) = 41843,4 \text{ кДж/кг}$		
$q_m = \frac{(i_{\Gamma}^* - i_{\kappa}^*)_{\alpha=\infty}}{H_u \cdot \eta_{\Gamma} - (1 + L_0)(i_{\Gamma}^* - i_{\kappa}^*)_{\alpha=1} + L_0(i_{\Gamma} - i_{\kappa})_{\alpha=\infty}} =$ $= \frac{1696,8 - 763,7}{41843,4 - (1 + 14,78)(1851,8 - 810,46) + 14,78(1696,8 - 763,7)} = 0,024$		проверить по номограмме $q_m = f(t_{\Gamma}^*, T_{\kappa}^*)$ [1, с.43] [4, с.124...126]
$v_{\text{охл}} \Sigma \text{ВД}$	0,935	см. проектный расчет
$v_{\text{охл}} \Sigma \text{НД}$	0,99	см. проектный расчет
$v_{\text{охл}} \Sigma$	0,925	см. проектный расчет
$G_{\text{в КС}} = G_{\text{в}} - (1 - v_{\text{охл}} \Sigma) \cdot G_{\text{в}} = 29,01 - (1 - 0,925) \cdot 29,01 = 26,33 \text{ кг/с}$		
$G_{\text{м с}} = q_m \cdot G_{\text{в КС}} = 0,024 \cdot 26,33 =$	0,644 кг/с	
$G_{\text{м ч}} = 3600 \cdot G_{\text{м с}} = 3600 \cdot 0,644 =$	2318,4 кг/ч	
$G_{\text{Г КС}} = G_{\text{Г ВД}} = G_{\text{в КС}} + G_{\text{м с}} = 26,83 + 0,644 =$	27,48 кг/с	
$i_{\text{КС}}^* = \frac{G_{\text{Г КС}} \cdot i_{\Gamma}^* - i_{\kappa}^* (1 - v_{\text{пл СА ВД}}) \cdot G_{\text{в}}}{G_{\text{Г КС}} - G_{\text{в}} (1 - v_{\text{пл СА ВД}})} =$ $= \frac{27,48 \cdot 1737,3 - 763,7 (1 - 0,955) \cdot 29,01}{27,48 - 29,01 (1 - 0,955)} = 1785,6 \text{ кДж/кг}$		определяется при наличии пленочного охлаждения $(v_{\text{пл СА НД}} \neq 1)$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
T_{KC}^*	1587,7 К	$\pi - i - T$ по i_{KC}^*
$i_{CA}^* = \frac{G_{ГKC} \cdot i_{Г\alpha=4}^* - i_{К\alpha=\infty}^* (1 - v_{CAВД}) \cdot G_B}{G_{ГKC} + G_B \cdot (1 - v_{CAВД})}$ $= \frac{27,48 \cdot 1737,3 + 763,7 (1 - 0,985) \cdot 29,01}{27,48 + 29,01 \cdot (1 - 0,985)} =$	1722 кДж/кг	
T_{CA}^*	1538 К	$\pi - i - T$ по i_{CA}^*
$\alpha_{KC} = \frac{1}{q_m L_0}$	$\frac{1}{0,024 \cdot 14,78} = 2,82$	
$P_{Г}^* = P_{К}^* \cdot \sigma_{KC}$	2130,3 · 0,95 = 2023,8 кПа	
Турбина высокого давления		
$N_{ТВД} = N_{кВД} / \eta_{мВД}$	10319 / 0,995 = 10370,9 кВт	
$G_{Г_{ТВД}} = G_{Г_{KC}} + G_B \left[(1 - v_{CAВД}) + (1 - v_{РКВД}) + (1 - v_{УТ}) + (1 - v_{плCAНД}) \right] =$ $= G_{ГНД} = 27,48 + 29,01 \left[(1 - 0,985) + (1 - 0,97) + (1 - 0,98) + (1 - 1) \right] = 29,36 \text{ кг/с}$		
$\eta_{ТВД}$	0,89	табл. 3.1
$L_{ТВД} = \frac{N_{ТВД}}{G_{ГВД}}$	$\frac{10370,9}{27,48} = 377,45 \text{ кДж/кг}$	
$i_{ТВДс}^* = i_{Г}^* - \frac{L_{ТВД}}{\eta_{ТВД}} = 1737,3 - \frac{377,45}{0,89} =$	1313,2 кДж/кг	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\pi(T_{\text{ТВД}}^*)$	264,9	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$
$\pi_{\text{ТВД}} = \frac{\pi(T_{\text{г}}^*)}{\pi(T_{\text{ТВД}}^*)}$	$\frac{808,4}{264,9} = 2,927$	
$p_{\text{ТВД}}^* = p_{\text{г}}^* / \pi_{\text{ТВД}}$	2023,8 / 2,927 = 691,47 кПа	
$i_{\text{ТВД}}^* = \frac{\left(i_{\text{г}}^* \alpha_{\text{г}} - L_{\text{ТВД}} \right) \cdot G_{\text{г}} + i_{\text{к}}^* \alpha_{\text{к}} \cdot G_{\text{в}} \left[(1 - v_{\text{СА}}) + (1 - v_{\text{РК}}) + (1 - v_{\text{УГ}}) + (1 - v_{\text{ИД}}) \right]}{G_{\text{г}} + G_{\text{в}}} = \frac{(1737,3 - 377,45) \cdot 27,48 + 763,7 \cdot 29,01(1 - 0,985) + 29,36}{29,36} = 1328 \text{ кДж/кг}$		
$T_{\text{ТВД}}^*$	1219 К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$
$\pi(T_{\text{ТВД}}^*)$	288,55	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$
$A_{\text{ТВД}} = \frac{G_{\text{г}} \cdot \sqrt{R \cdot 10^3 \cdot T_{\text{г}}^*}}{p_{\text{г}}^* \cdot 10^3}$	$\frac{27,48 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1550}}{2023,8 \cdot 10^3} = 90,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной $A_{\text{ТВД}}$, определенной в проектном расчете
$\bar{n}_{\text{ТВД}} = \sqrt{T_{\text{г}}^* / T_{\text{гР}}^*}$	$\sqrt{1550 / 1500} = 1,016$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Турбина низкого давления		
π_c	1,12	табл. 3.1
$P_T^* = P_H \cdot \pi_c$	$101,33 \cdot 1,12 = 113,48$ кПа	
$\pi_{ТНД} = P_{ТВД}^* / P_T^*$	$691,47 / 113,48 = 6,093$	
$\eta_{ТНД}$	0,929	табл. 3.1
$\pi(T_{ТС}^*) = \frac{\pi(T_{ТВД}^*)}{\pi_T}$	$\frac{288,55}{6,093} = 47,36$	
$i_{ТС}^*$	814,73	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{ТНДС}^*)$
$L_{ТНД} = (i_{ТВД}^* - i_{ТС}^*) \cdot \eta_{ТНД}$	$(1328 - 814,73) \cdot 0,929 = 476,82$ кДж/кг	
$N_{ТНД} = L_{ТНД} \cdot G_{ТНД}$	$476,82 \cdot 29,36 = 14000$ кВт	
$G_{ГТ} = G_B (1 + q_m \cdot v_{охл \Sigma}) = G_{Гс} = 29,01 (1 + 0,024 \cdot 0,925) = 29,65$ кг/с		
$i_{ТНД}^* = \frac{(i_{ТВД}^* - L_{ТНД}) \cdot G_{ТНД} + i_K^* \cdot G_B [(1 - v_{сАНД}) + (1 - v_{РКНД}) + (1 - v_{УТНД})]}{G_{ГТ}}$ $= \frac{(1328 - 476,82) \cdot 29,36 + 763,7 \cdot 29,01 [(1 - 0,99) + (1 - 1) + (1 - 1)]}{29,65} = 856,66$ кДж/кг		
T_T^*	816 К	$\pi - i - T$ по i_T^*
$\pi(T_T^*)$	55,9	$\pi - i - T$ по i_T^*

Продолжение табл. 3.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$A_{т\text{нд}} = \frac{G_{г\text{нд}} \cdot \sqrt{R_{г} \cdot 10^3 \cdot T_{г\text{вд}}^*}}{P_{г\text{вд}}^* \cdot 10^3}$	$29,36 \frac{\sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1219}}{691,47 \cdot 10^3} = 251,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной $A_{т\text{нд}}$ определенной в проектном расчете
$\bar{n}_{т\text{нд}} = \bar{n}_{к\text{нд}} \cdot \sqrt{\frac{T_{г}^*}{T_{г\text{нр}}}}$	$1,0 \cdot \sqrt{\frac{288,16}{244,77}} = 1,085$	
Выходное устройство		
φ_c	0,94	табл. 3.1
$\pi(T_c) = \frac{\pi(T_T^*)}{\pi_c}$	$\frac{55,9}{1,12} = 49,91$	
i_c	830,43 кДж/кг	
$C_c = \varphi_c \cdot \sqrt{2 \cdot (i_T^* - i_c) \cdot 10^3}$	$0,94 \cdot \sqrt{2 \cdot (856,66 - 830,43) \cdot 10^3} = 215,3 \text{ м/с}$	
$a_{кр} = 18,1 \cdot \sqrt{T_T^*}$	$18,1 \cdot \sqrt{816} = 517,04 \text{ м/с}$	
$\lambda_c = C_c / a_{кр}$	$215,3 / 517,04 = 0,4164$	
$q(\lambda_c)$	0,6136	табл. ГДФ ¹⁾ κ = 1,33
$\pi(\lambda_c)$	0,9046	табл. ГДФ по λ_c κ = 1,3
$\lambda_{cs} = \lambda_c / \varphi_c$	$0,4164 / 0,94 = 0,443$	
$q(\lambda_{cs})$	0,6461	табл. ГДФ κ = 1,33

¹⁾ Здесь и далее "табл. ГДФ" – таблицы газодинамических функций для воздуха κ = 1,4 и газа κ = 1,33 (см. Приложение 4).

Продолжение табл.3.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
$\pi(\lambda_{cs})$	0,8926	табл. ГДФ по λ_{cs} $k = 1,33$
$\sigma_c = \frac{\pi(\lambda_{cs})}{\pi(\lambda_c)}$	$\frac{0,8926}{0,9046} = 0,987$	
Определение мощности, тяги и удельного расхода топлива двигателя		
$N_B = (N_{TНД} \cdot \eta_{мНД} - N_{кНД}) \cdot \eta_{ред} = (14000 \cdot 1 - 3480,16) \cdot 0,995 = 10467,24 \text{ кВт}$		
$P_{pc} = C_{г} \cdot C_c \cdot 10^{-3}$	$29,65 \cdot 215,3 \cdot 10^{-3} = 6,383 \text{ кН}$	
$N_{pc} = \left(\frac{N_B}{P_B} \right)_0 \cdot P_{pc}$	$83,5 \cdot 6,383 = 533,03 \text{ кВт}$ $\left(\frac{N_B}{P_B} \right)_0 = 83,5 \text{ [1, с.122]}$	
$N_{э} = N_B + N_{pc}$	$10467,24 + 533,03 = 11000,3 \text{ кВт}$ (14960 л.с.)	
$P_B = N_B / \left(\frac{N_B}{P_B} \right)$	$10467,24 / 83,5 = 125,4 \text{ кН}$	
$P_{ТВД\text{ вэл}} = P_B + P_{pc}$	$124,4 + 6,383 = 131,74 \text{ кН}$ (13429,5 кгс)	
$C_{э} = G_{мч} / N_{э\text{ вэл}}$	$2318,3 / 11000,3 = 0,2107 \text{ кг / кВт} \cdot \text{ч}$ (0,155 кг/ э л.с. · ч)	
$C_{уд} = G_{мч} / P_{ТВД\text{ вэл}}$	$2318,3 / 125,4 = 18,49 \text{ кг/кН} \cdot \text{ч}$ (0,1592 кг/кгс · ч)	

Продолжение табл.3.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Расчет проектной величины массы двигателя		
$M_{дв} = M_{ГТД} + M_{ред} = B \cdot G_{0\text{ вкл}}^{m_1} \left(\pi_{к\text{ вкл}}^{0,286} - 1 \right)^{m_2} \cdot K_{T_r} \cdot K_c \cdot K_{рес} + M_{ред}$		
$K_{T_r} = 1 + 2 \cdot 10^{-4} \left(T_{г\text{ вкл}}^* - 1200 \right) = 1 + 2 \cdot 10^{-4} (1550 - 1200) = 1,07$		
B	66	[8, с.31,]
m_1	0,74	[8, с.31,]
m_2	0,16	[8, с.31,]
K_c	0,95	[1, с.78]
$K_{рес}$	1,05	[1, с.78]
$M_{ред} = A \cdot \frac{N_{в\text{ вкл}}}{n_{в}} \left(1 + \frac{1}{i_{ред}} \right) \cdot K_{рес}$	$56 \cdot \frac{10467,24}{1100} \left(1 + \frac{1}{8,5} \right) \cdot 1,05 = 625,35 \text{ кг}$ $A = 56; n_{в} = 1100; i_{ред} = 8,5 [1, с.124]$	
$M_{ГТД} = 66 \cdot 29,01^{0,74} \cdot \left(21,64^{0,286} - 1 \right)^{0,16} \cdot 1,07 \cdot 0,95 \cdot 1,05 = 899,42 \text{ кг}$		
$M_{дв} = 829,42 + 625,35 = 1,525 \text{ кг}$		
$\gamma_{дв} = M_{дв} / N_{э\text{ вкл}}$	$\frac{1525}{11000,3} = 0,1386 \text{ кг/э.кВт}$ (0,1019 кг/э.л.с)	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
<i>Оценка показателей эффективности проектируемого ТВВД в системе ДПС</i>		
Масса силовой установки		
$n_{дв}$	2	задается преподавателем по прототипу ЛА
$K_{су}$	1,45	[1, с.125]
$M_{ВВ} = C_1 \cdot P_{взл}$	$6 \cdot 125,4 = 752,4$ кг	$C_1 = 6$ кг/кН [1, с.125]
$M_{су} = n_{дв} (M_{ГТД} \cdot K_{су} + M_{ВВ} + M_{ред})$	$2 (899,42 \cdot 1,45 + 752,4 + 625,35) = 5364$ кг	
Необходимое количество топлива на борту самолета		
$L_{п}$	3500 км	задается или выбирается по прототипу ЛА
$\bar{V}_T$	0,93	[1, с.28, рис. 1.5] по $L_{п}$
$V_T = \bar{V}_T \cdot 3,6 \cdot a \cdot M_{п} = \bar{V}_T \cdot 3,6 \cdot 20,05 \cdot \sqrt{T_{п}} \cdot M_{п} = 0,93 \cdot 3,6 \cdot 20,05 \cdot \sqrt{216,7} \cdot 0,8 = 790$ км/ч		
$\bar{G}_{мон}$	1,06	[1, с.28, рис. 1.5] по $L_{п}$
$t_{нз}$	1 ч	[1, с.28]
$M_{мЛА} = n_{дв} \cdot \bar{G}_{мон} \cdot C_{уд} \cdot P_{твд} \cdot k_p \left(\frac{L_{п}}{V_T} + t_{нз} \right) = 2 \cdot 1,06 \cdot 50,29 \cdot 22,35 \cdot \left(\frac{3500}{790} + 1 \right) = 12940$ кг		
Суммарная масса силовой установки и топлива		
$\bar{M}_{мс}$	1,05	[1, с.27]
$M_{су+т} = M_{су} + \bar{M}_{мс} \cdot M_{мЛА}$	$5364 + 1,05 \cdot 12940 = 18951$ кг	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример [1]	Примечания
Взлетная масса самолета		
$\bar{M}_{пл}^*$	0,55	[1, с.27, табл.1.1]
$\bar{M}_{кн}$	0,2	[1, с.27, табл.1.1]
$M_0 = \frac{M_{сy+m}}{1 - \bar{M}_{пл}^* - \bar{M}_{кн}}$	$\frac{18951}{1 - 0,55 - 0,2} = 75803 \text{ кг}$	Необходимо сопоставить с прототипом ЛА
Проверка величины стартовой тяговооруженности самолета		
$\mu_{взл} = \frac{P_{твд \text{ взл}} \cdot n_{дв}}{M_0 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{131,74 \cdot 2}{75803 \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}} = 0,3543$	Сопоставить с табл. 1.2 [1, с.29]
Расчет удельных затрат топлива ЛА на 1 т.км		
$M_{кн} = M_0 \cdot \bar{M}_{кн}$	$75803 \cdot 0,2 = 15161 \text{ кг}$	
$M_{mL} = n_{дв} \cdot \bar{G}_{мон} \cdot C_{уд} \cdot P_{твд} \cdot \frac{L_{п}}{V_{т}}$	$2 \cdot 1,06 \cdot 50,29 \cdot 22,35 \cdot \frac{3500}{790} = 10557 \text{ кг}$	
$C_{ткм} = \frac{M_{mL}}{M_{кн} \cdot L_{п} \cdot 10^{-3}} = \frac{10557}{15161 \cdot 3500 \cdot 10^{-3}} = 0,1989 \text{ кг/ т.км}$		полученная величина должна быть лучше записанной в задании

4. РАСЧЕТ ТВаД

Схема турбовального (ТВаД) двигателя с двухкаскадным турбокомпрессором со свободной турбиной приведена на рис. 4. 1.

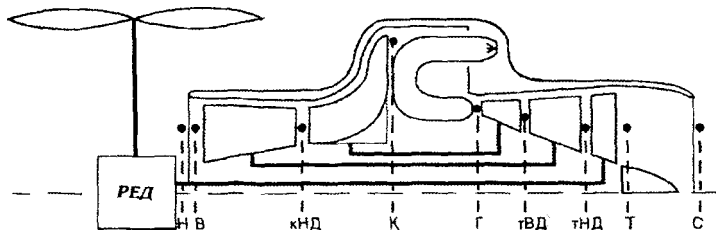


Рис.4.1. Схема вертолетного ГТД с двухвальным турбокомпрессором и со свободной турбиной (вывод вала вперед)

4.1. Исходные данные к расчету

Вертолетные ГТД (как и другие ТВаД) бывают со встроенным редуктором и без редуктора. В последнем случае (как и на рис. 4) редуктор является принадлежностью вертолета (потребителя мощности). Это отличие необходимо учитывать при проведении термогазодинамического расчета и расчета проектного значения массы двигателя.

Пример задания на курсовую (дипломную) работу по разделу проектирования ТВаД:

Заданные режимы работы двигателя:

$N_{э\text{ вкл}} = 823 \text{ кВт (1120 л.с.)}$ при $H_{п} = 0$, $M_{п} = 0$, САУ;

$N_{э\text{ кр}} = 494 \text{ кВт}$ при $H_{п} = 0,5 \text{ км}$, $V_{п} = 260 \text{ км/ч}$, САУ.

Заданный прототип двигателя – ТВаД “Джем-41” фирмы Роллс-Ройс.

Заданный прототип ЛА – вертолет WG.В или WG.30 “Линкс”.

Расчетная дальность полета ЛА – 630 км.

Ограничения:

максимальная температура газа в горле 1-го СА турбины $T_{г\text{ max}}^* \leq 1415 \text{ К}$;

удельные затраты топлива ЛА $C_{т.км} \leq 1,1 \text{ кг / т} \cdot \text{км}$.

Таблица 4.1

Вариант исходных данных к расчету ТВаД

Параметры	Значения параметров	
	$H_{\Pi} = 0, V_{\Pi} = 0, \text{САУ};$ $N_{\text{э вкл}} = 823 \text{ кВт}$	$H_{\Pi} = 0,5 \text{ км}, V_{\Pi} = 0,$ $\text{САУ}^*) N_{\text{э кр}} = 494 \text{ кВт}$
$T_{\Gamma}^*, \text{ К}$	1415	1231
$\pi_{\text{к}\Sigma}$	13,02	10,48
$\pi_{\text{к нд}}$	4,2	3,654
$\eta_{\text{к нд}}$	0,805	0,815
$\pi_{\text{к вд}}$	3,1	2,86
$\eta_{\text{к вд}}$	0,775	0,775
$\eta_{\text{т вд}}$	0,855	0,855
$\eta_{\text{т нд}}$	0,88	0,88
$\eta_{\text{т св}}$	0,91	0,917
$\pi_{\text{с}}$	1,04	1,0244
$a, \text{ м / с}$	340,28	338,36
$\sigma_{\text{вх}} = 0,985$	$\eta_{\text{м вд}} = 1,0$	$v_{\text{пл са вд}} = 1,0$
$\sigma_{\text{кс}} = 0,955$	$\eta_{\text{м т св}} = 0,98$	$v_{\text{са вд}} = 0,985$
$\eta_{\Gamma} = 0,99$	$v_{\text{пл са нд}} = 1,0$	$v_{\text{рк вд}} = 1,0$
$\eta_{\text{м нд}} = 0,98$	$v_{\text{са нд}} = 0,98$	$v_{\text{ут вд}} = 0,97$
$v_{\text{пл са нд}} = 1,0$	$v_{\text{рк нд}} = 1,0$	$v_{\text{ут нд}} = 1,0$
		$v_{\text{са т св}} = 0,99$

* Значения величин в этой колонке получены путем пересчета соответствующих проектных данных по рекомендации учебного пособия [1], см. раздел табл. 4.2 "Предварительная оценка исходных данных ТВаД для расчета крейсерского режима", с. 106....107.

4.2. Проектный расчет ТВаД для условий взлетного режима

В качестве расчетного режима для проектируемого вертолетного ГТД обычно принимается взлетный режим при $H_{\text{п}} = 0$, $V_{\text{п}} = 0$, САУ. Это объясняется тем обстоятельством, что в обычных для вертолета условиях эксплуатации, максимальные значения приведенного расхода воздуха ($G_{\text{в пр}}$) и степени повышения давления в компрессоре ($\pi_{\text{к}}$) реализуются именно на взлетном режиме. Как и в случае двухвального ТВВД (см. главу 3), от методики расчета ТВаД с двухкаскадным турбокомпрессором, легко перейти к методике расчета ТВаД с однокаскадным турбокомпрессором. Для этого необходимо изъять каскад высокого давления как из компрессора, так и из турбины.

Таблица 4.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Входное устройство		
$V_{\text{п}}$	0	
$T_{\text{н}}$	288,16 К	МСА (прилож. 2)
$P_{\text{н}}$	101,33 кПа	или [5, с.170]
$i_{\text{н}}$	288,4 кДж/кг	$\pi - i - T^{11}$,
$\pi(T_{\text{н}})$	1,207	по величине $T_{\text{н}}$
$i_{\text{н}}^* = i_{\text{н}}, \text{ т.к. } V=0$	288,4 кДж/кг	
$P_{\text{н}}^* = P_{\text{н}}, \text{ т.к. } V=0$	101,33 кПа	

¹¹ Здесь и далее " $\pi - i - T$ " – диаграммы термодинамических функций для воздуха $\alpha = \infty$ и газа $\alpha = 4$ (см. Приложение 1)

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$\pi(T_n^*) = \pi(T_n)$	1,207	$\pi - i - T$, по значению i_n^*
$T_n^* = T_n$	288,16 К	
Компрессор низкого давления		
$\bar{G}_{в пр}$	1,0	принимается
$\pi_{к нд}$	4,2	табл. 4 1
$\eta_{к нд}$	0,805	табл. 4 1
$P_{к нд}^* = P_n^* \cdot \sigma_{вх} \cdot \pi_{к нд}$	$101,33 \cdot 0,985 \cdot 4,2 = 419,2$ кПа	
$\pi(T_{к нд s}^*) = \pi(T_n^*) \cdot \pi_{к нд}$	$1,207 \cdot 4,2 = 5,0694$	
$i_{к нд s}^*$	435,159 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{к нд s}^*)$
$L_{к нд} = \frac{i_{к нд s}^* - i_n^*}{\eta_{к нд}}$	$\frac{435,159 - 288,4}{0,805} = 182,36$ кДж/кг	
$i_{к нд}^* = i_n^* + L_{к нд}$	$288,4 + 182,36 = 470,76$ кДж/кг	
$T_{к нд}^*$	468,5 К	$\pi - i - T$ по $i_{к нд}^*$
$\pi(T_{к нд}^*)$	6,669	$\pi - i - T$ по $i_{к нд}^*$
$N_{к нд}' = G_{в}^{'1)} \cdot L_{к нд}$	$1 \cdot 182,36 = 182,36$ кВт	

1) Верхний индекс "1)" означает, что данный параметр определен для $G_{в} = 1$ кг/с.

Продолжение табл. 4.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Компрессор высокого давления		
$\bar{G}_в$ пр кВД	1,0	принимается
$\pi_{кВД}$	3,1	табл. 4.1
$\eta_{кВД}$	0,775	табл. 4.1
$P_k^* = P_k' = P_{кНД}^* \cdot \pi_{кВД}$	$419,2 \cdot 3,1 = 1299,5$ кПа	
$\pi(T_{кс}^*) = \pi(T_{кНД}^*) \cdot \pi_{кВД}$	$6,669 \cdot 3,1 = 20,667$	
$i_{кс}^*$	649,5 кДж/кг	$\pi-i-T$ по $\pi(T_{кс}^*)$
$L_{кВД} = \frac{i_{кс}^* - i_{кНД}^*}{\eta_{кВД}}$	$\frac{649,5 - 470,76}{0,775} = 230,62$ кДж/кг	
$i_k^* = i_{кНД}^* + L_{кВД}$	$470,7 + 230,45 = 701,38$ кДж/кг	
T_k^*	688,8 К	$\pi-i-T$ по i_k^*
$N'_{кВД} = G'_в \cdot L_{кВД}$	$1 \cdot 230,45 = 230,62$ кВт	
$i_{к\alpha=1}^*$	743,07 кДж/кг	[4, с.50] или прилож. 3 по T_k^*
Камера сгорания		
T_Γ^*	1415 К	табл. 4.1

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$i_{г\alpha=4}^*$	1568,6 кДж/кг	$\pi - i - T$ по T_g^*
$\pi(T_g^*)_{\alpha=4}$	543,9	$\pi - i - T$ по T_g^*
$i_{г\alpha=1}^*$	1667,15 кДж/кг	[4, с.50] или прилож. 3 по T_g^*
$i_{г\alpha=\infty}^*$	1533 кДж/кг	$\pi - i - T$ по T_g^* $\alpha = \infty$
$i_{293\alpha=1}^*$	302,93 кДж/кг	[4, с.50] или прилож. 3
$i_{293\alpha=\infty}^*$	293, 32 кДж/кг	$\pi - i - T$ по T_g^* $\alpha = \infty$
$H_u = H_{u_0} + L_0(i_k^* - i_{293}^*)_{\alpha=\infty} - (1 + L_0)(i_k^* - i_{293}^*)_{\alpha=1} =$ $= 42900 + 14,78(701,38 - 293,32) - (1 + 14,78) \cdot (743,07 -$ $- 302,93) = 41985,7 \text{ кДж/кг}$		для стандартного авиационного керосина $H_{u_0} = 42900 \text{ кДж/кг}$
$q_m = \frac{(i_g^* - i_k^*)_{\alpha=\infty}}{H_u \cdot \eta_g - (1 + L_0)(i_g^* - i_k^*)_{\alpha=1} + L_0(i_g^* - i_k^*)_{\alpha=\infty}} =$ $= \frac{1533 - 701,38}{41985,7 \cdot 0,99 - (1 + 14,78)(1667,15 - 743,07) + 14,78(1533 - 701,38)} = 0,02117$		проверить по номограмме $q_m = f(T_g^*, T_k^*)$ [1, с.43] [4, с.124...126]
$v_{охл \Sigma \text{ вД}} = 1 - \left[(1 - v_{пл \text{ СА вД}}) + (1 - v_{СА \text{ вД}}) + (1 - v_{РК \text{ вД}}) + (1 - v_{УТ \text{ вД}}) \right] =$ $= 1 - [(1 - 1) + (1 - 0,985) + (1 - 1) + (1 - 0,97)] = 0,955$		
$v_{охл \Sigma \text{ нД}} = 1 - \left[(1 - v_{пл \text{ СА нД}}) + (1 - v_{охл \text{ СА нД}}) + (1 - v_{РК \text{ нД}}) + (1 - v_{УТ \text{ нД}}) \right] =$ $= 1 - [(1 - 1) + (1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1)] = 0,98$		
$v_{охл \Sigma \text{ т св}} = 1 - \left[(1 - v_{пл \text{ СА св}}) + (1 - v_{СА \text{ св}}) + (1 - v_{РК \text{ св}}) + (1 - v_{УТ \text{ св}}) \right] =$ $= 1 - [(1 - 1) + (1 - 0,99) + (1 - 1) + (1 - 1)] = 0,99$		

Продолжение табл. 4.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$v_{\text{охл } \Sigma} = 1 - \left[(1 - v_{\text{охл } \Sigma \text{ ВД}}) + (1 - v_{\text{охл } \Sigma \text{ НД}}) + (1 - v_{\text{охл } \Sigma \text{ Т.СВ}}) \right] =$ $= 1 - [(1 - 0,935) + (1 - 0,99)] = 0,925$		
$G'_{\text{В КС}} = G'_{\text{В}} - (1 - v_{\text{охл } \Sigma}) \cdot G'_{\text{В}} =$ $= 1 - (1 - 0,925) \cdot 1 =$	0,925 кг/с	
$G'_{\text{м с}} = q_{\text{м}} \cdot G'_{\text{В КС}} = 0,02117 \cdot 0,925 =$	0,01959 кг/с	
$G'_{\text{м ч}} = 3600 \cdot G'_{\text{м с}} = 3600 \cdot 0,01959 =$	70,53 кг/с	
$G'_{\text{Г КС}} = G'_{\text{В КС}} + G'_{\text{м с}} = G'_{\text{Г ВД}} = 0,925 + 0,01959 =$	0,9446 кг/с	
$i_{\text{КС}}^* = i_{\text{Г}}^*$	1568,6 кДж/кг	отсутствует плоскостное охлаждение СА Упл. СА НД = 1
$T_{\text{КС}}^* = T_{\text{Г}}^*$	1415 К	
$i_{\text{СА}}^* = \frac{G'_{\text{Г КС}} \cdot i_{\text{Г } \alpha=4}^* + i_{\text{К } \alpha=\infty}^* (1 - v_{\text{СА ВД}}) \cdot G'_{\text{В}}}{G'_{\text{Г КС}} + (1 - v_{\text{СА ВД}}) \cdot G'_{\text{В}}} =$ $= \frac{0,9446 \cdot 1568,6 + 701,15 (1 - 0,985) \cdot 1}{0,9446 + (1 - 0,985) \cdot 1} = 1555 \text{ кДж/кг}$		
$T_{\text{СА}}^*$	1404 К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{СА}}^*$
$\alpha_{\text{КС}} = \frac{1}{q_{\text{м}} L_0}$	$\frac{1}{0,02117 \cdot 14,78} = 3,196$	
$p_{\text{Г}}^* = p_{\text{К}}^* \cdot \sigma_{\text{КС}}$	1299,5 - 0,955 = 1241 кПа	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Турбина высокого давления		
$N'_{\text{ТВД}} = N'_{\text{КВД}} / \eta_{\text{м ВД}}$	$230,45 / 1,0 = 230,62 \text{ кВт}$	
$G'_{\text{ГВД}} = G'_{\text{ГКС}} + G'_{\text{в}} \left[(1 - v_{\text{СА ВД}}) + (1 - v_{\text{РК ВД}}) + (1 - v_{\text{УТ ВД}}) + (1 - v_{\text{ПЛ СА ИД}}) \right] =$ $= G'_{\text{ГИД}} = 0,9446 + 1 \cdot [(1 - 0,985) + (1 - 1) + (1 - 0,97) + (1 - 1)] = 0,9896 \text{ кг / с}$		
$\eta_{\text{ТВД}}$	0,855	табл 4 1
$L_{\text{ТВД}} = \frac{N'_{\text{ТВД}}}{G'_{\text{ГВД}}}$	$\frac{230,62}{0,9446} = 244,2 \text{ кДж / кг}$	
$i_{\text{ТВДС}}^* = i_{\text{Г}}^* - \frac{L_{\text{ТВД}}}{\eta_{\text{ТВД}}} =$ $1568,6 - \frac{244,2}{0,855} =$	1283 кДж / кг	
$\pi(T_{\text{ТВДС}}^*)$	252,45	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВДС}}^*$
$\pi_{\text{ТВД}} = \frac{\pi(T_{\text{Г}}^*)}{\pi(T_{\text{ТВДС}}^*)}$	$\frac{544,2}{252,45} = 2,156$	
$p_{\text{ТВД}}^* = p_{\text{Г}}^* / \pi_{\text{ТВД}}$	$1241 / 2,156 = 575,69 \text{ кПа}$	
$i_{\text{ТВД}}^* = \frac{(i_{\text{Г}}^* - L_{\text{ТВД}}) \cdot G'_{\text{ГКС}} + i_{\text{К}}^* \cdot G'_{\text{в}} \left[(1 - v_{\text{СА ВД}}) + (1 - v_{\text{РК ВД}}) + (1 - v_{\text{УТ ВД}}) + (1 - v_{\text{ПЛ СА ИД}}) \right]}{G'_{\text{ГВД}}}$ $= \frac{(1568,6 - 244,2) \cdot 0,9446 + 701,38 \cdot 1 \cdot [(1 - 0,985) + (1 - 1) + (1 - 0,97) + (1 - 1)]}{0,9896} = 1296 \text{ кДж / кг}$		

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$T_{\text{ТВД}}^*$	1192,6 К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$
$\pi(T_{\text{ТВД}}^*)$	262,3	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$
$A'_{\text{ТВД}} = \frac{G'_{\text{ГКС}} \cdot \sqrt{R \cdot 10^3 \cdot T_{\text{Г}}^*}}{P_{\text{ГВД}}^* \cdot 10^3}$	$\frac{0,9446 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1415}}{1241 \cdot 10^3} =$ $= 4,852 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\bar{n}_{\text{ТВД}} = \sqrt{T_{\text{Г}}^* / T_{\text{ГР}}^*}$	$\sqrt{1415 / 1415} = 1,0$	
Турбина низкого давления		
$N'_{\text{ТНД}} = N'_{\text{КНД}} / \eta_{\text{МНД}}$	182,36 / 0,98 = 186,08 кВт	
$G'_{\text{ГТНД}} = G'_{\text{ГТВД}} + G'_{\text{В}} \left[(1 - v_{\text{СА НД}}) + (1 - v_{\text{РК НД}}) + (1 - v_{\text{УТ НД}}) + (1 - v_{\text{ПЛ СА Т СВ}}) \right] = G'_{\text{ГСВ}} = 0,9896 +$ $+ 1 \cdot [(1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1) + (1 - 1)] = 1,0096 \text{ кг/с}$		
$\eta_{\text{ТНД}}$	0,88	табл. 4.1
$L_{\text{ТНД}} = N'_{\text{ТНД}} / G'_{\text{ГТВД}}$	186,03 / 0,9896 = 88,04 кДж/кг	
$i_{\text{ТНДС}}^* = i_{\text{ТВД}}^* - L'_{\text{ТНД}} / \eta_{\text{ТНД}}$	1296 - 188,04 / 0,88 = 1082,3 кДж/кг	
$\pi(T_{\text{ТНДС}}^*)$	133,48	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТНДС}}^*$
$\pi_{\text{ТНД}} = \frac{\pi(T_{\text{ТВД}}^*)}{\pi(T_{\text{ТНДС}}^*)}$	$\frac{262,3}{133,48} = 1,965$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$P_{ТНД}^* = P_{ТВД}^* / \pi_{ТВД}$	575,69 / 1,965 = 293,11 кПа	
$i_{ТНД}^* = \frac{(i_{ВД}^* - L_{ТНД}) \cdot G_{ГТВД} + i_K^* \cdot G_B \left[(1 - v_{СА НД}) + (1 - v_{РК ВН}) + (1 - v_{УТ НД}) + (1 - v_{ПЛ СА Т.СВ}) \right]}{G_{ТНД}}$ $= \frac{(1296 - 188,04) \cdot 0,9896 + 701,38 \cdot 1 \cdot [(1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1) + (1 - 1)]}{1,0096} = 1099,9 \text{ кДж/кг}$		
$T_{ТНД}^*$	1028,4 К	$\pi - i - T$ по $i_{ТНД}^*$
$\pi(T_{ТНД}^*)$	141,67	$\pi - i - T$ по $i_{ТНД}^*$
$A_{ТНД} = \frac{G_{ТНД} \cdot \sqrt{R_T \cdot 10^3 \cdot T_{ТНД}^*}}{P_{ТНД}^* \cdot 10^3}$	$\frac{0,9896 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1192,6}}{575,69 \cdot 10^3} = 10,06 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$\bar{n}_{ТНД} = \bar{n}_{КНД} \cdot \sqrt{\frac{T_{Н}^*}{T_{НР}^*}}$	1,0	
Свободная турбина		
π_c	1,04	табл. 4.1
$P_T^* = P_H \cdot \pi_c$	101,33 · 1,04 = 105,383 кПа	
$\pi_{ТСВ} = P_{ТНД}^* / P_T^*$	293,11 / 105,38 = 2,7	
$\pi(T_{ТС}^*) = \frac{\pi(T_{ТНД}^*)}{\pi_{ТСВ}}$	$\frac{141,67}{2,78} = 50,96$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
i_{TS}^*	832,96 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{TS}^*)$
$L_{ТСВ} = (i_{ТНД}^* - i_{TS}^*) \cdot \eta_{ТСВ}$	$(1099 - 832,96) \cdot 0,91 = 242,1$ кДж/кг	
$N'_{ТСВ} = L_{ТСВ} \cdot G'_{ГТНД}$	$242,1 \cdot 1,0096 = 244,42$ кВт	
$G'_{ГТ} = G'_B (1 + q_m \cdot v_{охл. \Sigma}) = G'_{ГС}$	$1 \cdot (1 + 0,02118 \cdot 0,925) = 1,0196$ кг/с	
$i_T^* = \frac{(i_{ТНД}^* - L_{ТСВ}) \cdot G'_{ГТНД} + i_K^* \cdot G'_B [(1 - v_{сатсв}) + (1 - v_{кТсв}) + (1 - v_{ут.ТСВ})]}{G'_{ГТ}} =$ $= \frac{(1099,9 - 242,1) \cdot 1,0096 + 701,38 \cdot 1 \cdot [(1 - 0,99) + (1 - 1) + (1 - 1)]}{1,0196} = 856,26 \text{ кДж/кг}$		
T_T^*	817,7 К	$\pi - i - T$ по i_T^*
$\pi(T_T^*)$	33,42	$\pi - i - T$ по i_T^*
$A'_{ТСВ} = \frac{G'_{сНД} \cdot \sqrt{R_T \cdot 10^3 \cdot T_{ТНД}^*}}{p_{ТНД}^* \cdot 10^3}$	$\frac{1,0096 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1028,4}}{293,11 \cdot 10^3} = 18,72 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
Выходное устройство		
$\sigma_{вых.р}$	0,987	принимается [1, с.62]
$\pi(T_c) = \frac{\pi(T_T^*)}{\pi_c \cdot \sigma_{вых}}$	$\frac{56,33}{1,04 \cdot 0,987} = 54,88$	
i_c	850,17 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_c)$

Продолжение табл. 4.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$C_c = \sqrt{2 \cdot 10^3 (i_{т св}^* - i_c)}$	$\sqrt{2 \cdot 10^3 \cdot (856,26 - 850,17)} = 109,8 \text{ м/с}$	
$a_{кр} = 18,1 \cdot \sqrt{T_{т св}^*}$	$18,1 \cdot \sqrt{817,7} = 517,58 \text{ м/с}$	
$\lambda_c = C_c / a_{кр}$	$109,8 / 517,58 = 0,2121$	
$q(\lambda_c)$	0,33	табл. ГДФ ¹¹ к = 1,33
$\mu F'_c = \frac{G'_{гс} \cdot \sqrt{T_{гс}^*}}{m_{гп} P_{т св}^* \cdot \sigma_c \cdot q(\lambda_c)}$	$\frac{1,0196 \cdot \sqrt{817,7}}{39,7 \cdot 105,383 \cdot 0,987 \cdot 0,33} = 213,96 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$N_{е уд} = L_{т св} \cdot G'_{г т н д} \cdot \eta_{м св}$	$242,1 \cdot 1,0096 \cdot 0,98 = 239,53 \text{ кВт с/кг}$	
$C_e = G'_{т ч} / N_{е уд}$	$70,53 / 239,53 = 0,294 \text{ кг/кВт ч}$	
Основные проектные данные двигателя при $N_e = 823 \text{ кВт}$		
$G_{в р} = \frac{N_e}{N_{е уд}}$	$\frac{823}{239,53} = 3,44 \text{ кг/с}$	
$G_{т ч} = C_e \cdot N_e$	$0,294 \cdot 823 = 241,96 \text{ кг/ч}$	
$F_{в х} = \frac{G_{в р} \cdot \sqrt{T_{гс}^*}}{40,4 \cdot p_{гс}^* \cdot q(\lambda_g)}$	$\frac{3,44 \cdot \sqrt{288,16}}{40,4 \cdot 101,33 \cdot 0,865} = 0,0165 \text{ м}^2$	$q(\lambda_g) = 0,865$ принята по табл. 2.1 [1]
$A_{т в д} = A'_{т в д} \cdot G_{в р}$	$4,852 \cdot 10^{-4} \cdot 3,44 = 16,69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	

¹¹ Здесь и далее "табл. ГДФ" – таблицы газодинамических функций для воздуха $K = 1,4$ и газа $K = 1,33$ (см. приложение 4)

Продолжение табл. 4.2

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$A_{\text{тнд}} = A'_{\text{тнд}} \cdot G_{\text{в пр}}$	$10,06 \cdot 10^{-4} \cdot 3,44 = 34,606 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$A_{\text{тсв}} = A'_{\text{тсв}} \cdot G_{\text{в пр}}$	$18,72 \cdot 10^{-4} \cdot 3,44 = 64,397 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
$G_{\text{гвд}} = G'_{\text{гвд}} \cdot G_{\text{в пр}}$	$0,9446 \cdot 3,44 = 3,249 \text{ кг/с}$ <i>2,5499 кг/с</i>	
$G_{\text{гнд}} = G'_{\text{гнд}} \cdot G_{\text{в пр}}$	$0,9896 \cdot 3,44 = 3,404 \text{ кг/с}$ <i>2,6829 кг/с</i>	
$G_{\text{гсв}} = G'_{\text{гсв}} \cdot G_{\text{в пр}}$	$1,0096 \cdot 3,44 = 3,473 \text{ кг/с}$	
$G_{\text{гс}} = G'_{\text{гс}} \cdot G_{\text{в пр}}$	$1,0196 \cdot 3,44 = 3,507 \text{ кг/с}$	
$\mu F_{\text{с}} = \mu F'_{\text{с}} \cdot G_{\text{в пр}}$	$213,96 \cdot 10^{-4} \cdot 3,44 = 736 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	
Предварительная оценка исходных параметров ТВаД для расчета крейсерского режима		
$\bar{N}_{\text{е кр}} = N_{\text{е кр}} / N_{\text{е вкл}}$	$494 / 823 = 0,6$	$N_{\text{е вкл}}, N_{\text{е кр}}$ задаются в табл. 4.1
$\bar{T}_{\text{г}}^* = T_{\text{г кр}}^* / T_{\text{г вкл}}^*$	0,87	рис. 6.4 [1, с. 133]
$\bar{\pi}_{\text{с}} = \pi_{\text{с кр}} / \pi_{\text{с вкл}}$	0,985	там же
$\bar{\pi}_{\text{к вл}} = \pi_{\text{к вл кр}} / \pi_{\text{к вл вкл}}$	0,925	там же
$\bar{\pi}_{\text{к нд}} = \pi_{\text{к нд кр}} / \pi_{\text{к нд вкл}}$	0,87	там же
$\bar{\eta}_{\text{тсв}} = \eta_{\text{тсв кр}} / \eta_{\text{тсв вкл}}$	1,008	там же
$\bar{G}_{\text{в пр}} = G_{\text{в пр кр}} / G_{\text{в пр вкл}}$	0,87	там же
$\bar{\eta}_{\text{тнд}} = \eta_{\text{тнд кр}} / \eta_{\text{тнд вкл}}$	1,0	[1, с. 135]

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$\bar{G}_{в пр} = G_{в пр кр} / G_{в пр взл}$	0,87	[1, с. 133]
$\bar{\eta}_{к вл}$	1,0	[1, с. 135]
$\bar{\eta}_{к нд} = f(\bar{G}_{в пр} \text{ и } \pi_{к нд})$	1,0034	[1, рис 2.1]
$T_{г кр}^* = T_{г взл} \cdot \bar{T}_g^*$	$1415 \cdot 0,87 = 1231 \text{ K}$	
$\pi_{с кр} = \pi_{с взл} \cdot \bar{\pi}_с$	$1,04 \cdot 0,985 = 1,0244$	
$\pi_{к вл кр} = \pi_{к вл} \cdot \bar{\pi}_{к вл}$	$3,1 \cdot 0,925 = 2,868$	
$\pi_{к нд кр} = \pi_{к нд} \cdot \bar{\pi}_{к нд}$	$4,2 \cdot 0,87 = 3,654$	
$\eta_{т св кр} = \eta_{т св взл} \cdot \bar{\eta}_{т св}$	$0,91 \cdot 1,008 = 0,917$	
$G_{в пр кр} = G_{в пр взл} \cdot \bar{G}_{в пр}$	$3,44 \cdot 0,87 = 2,99 \text{ кг/с}$	
$\eta_{к нд кр} = \eta_{к нд взл} \cdot \bar{\eta}_{к нд}$	$0,805 \cdot 1,012 = 0,815$	
$\eta_{к вл кр} = \bar{\eta}_{к вл взл}$	0,775	
$\eta_{т нд кр} = \eta_{т нд взл}$	0,855	
$\eta_{т нд кр} = \eta_{т нд взл}$	0,88	
$G_{в кр} = G_{в пр кр} \cdot \frac{p_n^*}{101,33} \cdot \sqrt{\frac{T_n^*}{288,16}}$	$2,99 \cdot \frac{95,472}{101,33} \cdot \sqrt{\frac{284,91}{288,16}} = 2,8 \text{ кг/с}$	

4.3. Расчет ТВаД на крейсерском режиме

Таблица 4.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
Входное устройство		
$V_n/3,6$	$260 / 3,6 = 72,22 \text{ м/с}$	
T_n	284,91 К	[5, с. 169]
P_n	95,472 кПа	[5, с. 169]
i_n $\pi(T_n)$	285,176 кДж/кг 1,1535	табл. $\pi - i - T$, по T_n
$i_n^* = i_n + \frac{V_n^2}{2000}$	$285,176 + \frac{72,22^2}{2000} = 287,78 \text{ кДж/кг}$	
$\pi(T_n^*)$	1,1895	табл. $\pi - i - T$, по i_n^*
T_n^*	287,5 К	табл. $\pi - i - T$, по i_n^*
$P_n^* = P_n \cdot \frac{\pi(T_n^*)}{\pi(T_n)}$	$95,472 \cdot 1,1895 / 1,1535 = 98,45 \text{ кПа}$	
G_v	2,8 кг/с	
$\bar{G}_v \text{ пр}$	0,87	
Компрессор низкого давления		
$\pi_{к \text{ НД}}$	3,654	табл. 4.1
$\bar{n}_{\text{пр к НД}} = \sqrt{\frac{288,16}{T_{н \text{ кр}}^*}}$	$\sqrt{\frac{288,16}{287,5}} = 1,001$	
$\eta_{к \text{ НД}}$	0,815	табл. 4.1

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$P_{кНД}^* = P_H^* \cdot \sigma_{вх} \cdot \pi_{кНД}$	$98,45 \cdot 0,985 \cdot 3,654 = 354,35 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{кНДs}^*) = \pi(T_H^*) \cdot \pi_{кНД}$	$1,1895 \cdot 3,654 = 4,346$	
$i_{кНДs}^*$	416,44 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_{кНДs}^*)$
$L_{кНД} = \frac{i_{кНДs}^* - i_H^*}{\eta_{кНД}}$	$\frac{416,44 - 287,78}{0,815} = 157,86 \text{ кДж/кг}$	
$i_{кНД}^* = i_H^* + L_{кНД}$	$287,5 + 157,86 = 445,36 \text{ кДж/кг}$	
$T_{кНД}^*$	443,6 К	$\pi - i - T$ по $i_{кНД}^*$
$\pi(T_{кНД}^*)$	5,496	$\pi - i - T$ по $i_{кНД}^*$
$N_{кНД} = G_{вкр} \cdot L_{кНД}$	$2,8 \cdot 157,86 = 442,008 \text{ кВт}$	
Компрессор высокого давления		
$\bar{G}_{впркВД} = \frac{\bar{G}_{впркНД}}{\pi_{кНД}}$	$\frac{0,87}{0,815} = 1,067$	
$\pi_{кВД}$	2,868	табл. 4.1
$\eta_{кВД}$	0,775	табл. 4.1
$P_{к}^* = P_{кНД}^* \cdot \pi_{кВД}$	$354,35 \cdot 2,868 = 1016,28 \text{ кПа}$	
$\pi(T_{кс}^*) = \pi(T_{кНД}^*) \cdot \pi_{кВД}$	$5,496 \cdot 2,868 = 15,762$	
$i_{кс}^*$	601,462 кДж/кг	
$L_{кВД} = \frac{i_{кс}^* - i_{кНД}^*}{\eta_{кВД}}$	$\frac{601,462 - 445,36}{0,775} = 201,42 \text{ кДж/кг}$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$i_k^* = i_{кнд}^* + L_{квд}$	$445,36 + 201,42 = 646,78$ кДж/кг	
T_k^*	637,6 К	$\pi - i - T$ по i_k^*
$\pi(T_k^*)$	20,375	$\pi - i - T$ по i_k^*
$i_k^* \alpha=1$	683,942 кДж/кг	[4, с. 50]или прилож.3 по T_k^*
$N_{квд} = G_v \cdot L_{квд}$	$2,8 \cdot 201,42 = 563,976$ кВт	
Камера сгорания		
η_r	0,99	табл. 4.1
$\sigma_{кс}$	0,955	табл. 4.1
T_r^*	1231 К	табл. 4.1
$i_r^* \alpha=4$	1342,6 кДж/кг	$\pi - i - T$ по T_r^*
$\pi(T_r^*) \alpha=4$	289,8	$\pi - i - T$ по T_r^*
$i_r^* \alpha=1$	1442 кДж/кг	[4, с. 50]или прилож.3 по T_r^*
$i_r^* \alpha=\infty$	1314,37 кДж/кг	$\pi - i - T$ по T_r^* $\alpha=\infty$
$i_{293}^* \alpha=\infty$	293,32 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $T=293K \alpha=\infty$
$i_{293}^* \alpha=1$	302,93 кДж/кг	[4, с.50] или прилож. 3 по $T=293K$
$H_u = H_{u0} + L_0(i_k^* - i_{293}^*)_{\alpha=\infty} - (1 + L_0)(i_k^* - i_{293}^*)_{\alpha=1} =$ $= 42900 + 14,78(646,78 - 293,32) - (1+14,78)(683,942 - 302,93)$ $= 42111,77 \text{ кДж/кг}$		

Продолжение табл 4.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$q_m = \frac{(i_{\Gamma}^* - i_{\kappa}^*)_{\alpha=\infty}}{H_u \cdot \eta_{\Gamma} - (1 + L_0)(i_{\Gamma}^* - i_{\kappa}^*)_{\alpha=1} + L_0(i_{\Gamma}^* - i_{\kappa}^*)_{\alpha=\infty}} =$ $= \frac{1314,37 - 646,78}{42111,77 \cdot 0,99 - (1 + 14,78)(1442 - 683,942) + 14,78(1314,37 - 646,78)} =$ $= 0,01686$		проверить по номограмме $q_m = f(T_{\Gamma}^*, T_{\kappa}^*)$ [1, с.43] [4, с.124-126]
$V_{охл \Sigma ВД}$	0,955	см. проектный расчет
$V_{охл \Sigma НД}$	0,98	см. проектный расчет
$V_{охл \Sigma т св}$	0,99	см. проектный расчет
$V_{охл \Sigma}$	0,925	см. проектный расчет
$G_{в \kappa \kappa} = G_{в} - (1 - v_{охл \Sigma}) \cdot G_{в} =$ $= 2,8 - (1 - 0,925) \cdot 2,8 =$	2,59 кг/с	
$G_{m \kappa} = q_m \cdot G_{в} = 0,01686 \cdot 2,8 =$	0,0472 кг/с	
$G_{m \kappa} = 3600 \cdot G_{m \kappa} = 3600 \cdot 0,0472 =$	169,92 кг/ч	
$G_{\Gamma \kappa \kappa} = G_{\Gamma ВД} = G_{в \kappa \kappa} + G_{m \kappa} = 2,59 + 0,0472 =$	2,6572 кг/с	
$i_{\kappa \kappa}^* = i_{\Gamma}^*$	1342,6 кДж/кг	отсутствует пленочное охлаждение
$T_{\kappa \kappa}^* = T_{\Gamma}^*$	1231 К	$\pi - i - T$ по $i_{\kappa \kappa}^*$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$i_{CA}^* = \frac{G_{ГКС} \cdot i_{Г\alpha=4}^* + i_{К\alpha=\infty}^* (1 - v_{CAВД}) \cdot G_B}{G_{ГКС} + G_B \cdot (1 - v_{CAВД})} =$ $= \frac{2,6372 \cdot 1342,6 + 646,78 (1 - 0,985) \cdot 2,8}{2,6372 + 2,8 \cdot (1 - 0,985)} =$	1331,7 кДж/кг	
T_{CA}^*	1222 К	$\pi - i - T$ по i_{CA}^*
$\alpha_{КС} = \frac{1}{q_m L_0}$	$\frac{1}{0,01636 \cdot 14,78} = 4,013$	
$p_r^* = p_k^* \cdot \sigma_{КС}$	$1016,28 \cdot 0,955 = 970,54$ кПа	
Турбина высокого давления		
$N_{ТВД} = N_{КВД} / \eta_{МВД}$	$663,976 / 1,0 = 563,976$ кВт	
$G_{ГТВД} = G_{ГКС} + G_B [(1 - v_{CAВД}) + (1 - v_{РКВД}) + (1 - v_{УТ}) +$ $+ (1 - v_{ПЛСАНД})] = G_{ГНД} = 2,6372 + 2,8 [(1 - 0,985) + (1 - 1) +$ $+ (1 - 0,97) + (1 - 1)] = 2,7632$ кг/с		
$\eta_{ТВД}$	0,855	табл. 4.1
$L_{ТВД} = \frac{N_{ТВД}}{G_{ГВД}}$	$\frac{563,976}{2,6372} = 213,354$ кДж/кг	
$i_{ТВДС}^* = i_r^* - \frac{L_{ТВД}}{\eta_{ТВД}} = 1342,6 - \frac{213,854}{0,855} =$	1092,48 кДж/кг	
$\pi(T_{ТВДС}^*)$	138,14	$\pi - i - T$ по $i_{ТВДС}^*$

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$\pi_{\text{ТВД}} = \frac{\pi(T_{\text{Г}}^*)}{\pi(T_{\text{ТВД}}^*)}$	$\frac{289,8}{138,14} = 2,098$	
$P_{\text{ТВД}}^* = P_{\text{Г}}^* / \pi_{\text{ТВД}}$	$9703548 / 2,098 = 462,6 \text{ кПа}$	
$i_{\text{ТВД}}^* = \frac{(i_{\text{Г}}^* \alpha=4 - L_{\text{ТВД}}) \cdot G_{\text{ТВД}} + i_{\text{К}}^* \alpha=\infty \cdot G_{\text{В}} [(1 - v_{\text{САВД}}) + (1 - v_{\text{РКВД}}) + (1 - v_{\text{УТ}}) + (1 - v_{\text{ПЛСАНД}})]}{G_{\text{ТВД}}} = \frac{(1342,6 - 213,854) \cdot 2,6372 + 646,78 \cdot 2,8[(1 - 0,985) + (1 - 1) + (1 - 0,97) + (1 - 1)]}{2,7632} = 1106,72 \text{ кДж/кг}$		
$T_{\text{ТВД}}^*$	1034,2 К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$
$\pi(T_{\text{ТВД}}^*)$	145	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТВД}}^*$
$A_{\text{ТВД}} = \frac{G_{\text{ГКС}} \cdot \sqrt{R_{\text{Г}} \cdot 10^3 \cdot T_{\text{Г}}^*}}{P_{\text{Г}}^* \cdot 10^3}$	$\frac{2,6372 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1231}}{970,54 \cdot 10^3} = 16,156 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной $A_{\text{ТВД}}$ определенной в проектном расчете
$\bar{n}_{\text{ТВД}} = \sqrt{T_{\text{Г}}^* / T_{\text{ГР}}^*}$	$\sqrt{1231 / 1415} = 0,9327$	
Турбина низкого давления		
$N_{\text{ТНД}} = N_{\text{КНД}} / \eta_{\text{мНД}}$	$442,008 / 0,98 = 451,03 \text{ кВт}$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$G_{г\text{ТНД}} = G_{г\text{ТВД}} + G_{в} \left[(1 - v_{сА\text{НД}}) + (1 - v_{рК\text{НД}}) + (1 - v_{у\text{Т}}) + (1 - v_{пл\text{САТ\text{СВ}}}) \right] = G_{г\text{СВ}} = 2,7632 + 2,8 \left[(1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1) + (1 - 1) \right] = 2,8192 \text{ кг/с}$		
$\eta_{\text{ТНД}}$	0,88	табл. 4.1
$L_{\text{ТВД}} = \frac{N_{\text{ТНД}}}{G_{г\text{ТВД}}}$	$\frac{451,03}{2,7632} = 163,23 \text{ кДж/кг}$	
$i_{\text{ТНДС}}^* = i_{\text{ТВД}}^* - \frac{L_{\text{ТНД}}}{\eta_{\text{ТНД}}} = 1106,77 - \frac{163,23}{0,88} = 921,284 \text{ кДж/кг}$		
$\pi(T_{\text{ТНДС}}^*)$	73,625	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТНДС}}^*$
$\pi_{\text{ТНД}} = \frac{\pi(T_{\text{ТВД}}^*)}{\pi(T_{\text{ТНДС}}^*)}$	$\frac{145}{73,625} = 1,969$	
$p_{\text{ТНД}}^* = p_{\text{ТВД}}^* / \pi_{\text{ТНД}}$	$462,6 / 1,969 = 234,94 \text{ кПа}$	
$i_{\text{ТНД}}^* = \frac{(i_{\text{ТВД}}^* - L_{\text{ТНД}}) \cdot G_{г\text{ТВД}} + i_{\text{к}}^* \cdot G_{в} \left[(1 - v_{сА\text{НД}}) + (1 - v_{рК\text{НД}}) + (1 - v_{у\text{Т}}) + (1 - v_{пл\text{САТ\text{СВ}}}) \right]}{G_{г\text{ТНД}}} =$ $= \frac{(1106,77 - 163,23) \cdot 2,7632 + 646,78 \cdot 2,8 \left[(1 - 0,98) + (1 - 1) + (1 - 1) + (1 - 1) \right]}{2,8192} = 937,645 \text{ кДж/кг}$		
$T_{\text{ТНД}}^*$	889,1 К	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТНД}}^*$
$\pi(T_{\text{ТНД}}^*)$	78,55	$\pi - i - T$ по $i_{\text{ТНД}}^*$

Продолжение табл. 4.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$A_{\text{ТНД}} = \frac{G_{\text{ГТНД}} \cdot \sqrt{R_{\text{г}} \cdot 10^3 \cdot T_{\text{ТВД}}^*}}{P_{\text{ТВД}}^* \cdot 10^3}$	$\frac{2,7632 \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 1034,2}}{462,6 \cdot 10^3} = 32,85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной $A_{\text{ТНД}}$, определенной в проектном расчете
$\bar{n}_{\text{ТНД}} = \bar{n}_{\text{КНД}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{Н}}^*}{T_{\text{НР}}}}$	$1,001 \cdot \sqrt{\frac{287,5}{288,16}} = 1,0$	
Свободная турбина		
$\pi_{\text{с}}$	1,0244	табл. 4.1
$P_{\text{Т}}^* = P_{\text{Н}} \cdot \pi_{\text{с}}$	$95,472 \cdot 1,0244 = 97,8 \text{ кПа}$	
$\pi_{\text{ТСВ}} = P_{\text{ТНД}}^* / P_{\text{Т}}^*$	$234,94 / 97,8 = 2,4$	
$\pi(T_{\text{ТС}}^*) = \frac{\pi(T_{\text{ТНД}}^*)}{\pi_{\text{ТСВ}}}$	$\frac{78,55}{2,4} = 32,7$	
$i_{\text{ТС}}^*$	736,912 кДж/кг	
$L_{\text{ТСВ}} = (i_{\text{ТНД}}^* - i_{\text{ТС}}^*) \cdot \eta_{\text{ТСВ}}$	$(937,645 - 736,912) \cdot 0,917 = 184,072 \text{ кДж / кг}$	
$N_{\text{ТСВ}} = L_{\text{ТСВ}} \cdot G_{\text{ГТНД}}$	$184,072 \cdot 2,8192 = 518,9 \text{ кВт}$	
$G'_{\text{ГТ}} = G_{\text{В}} (1 + q_m \cdot v_{\text{охл}} \Sigma) = G_{\text{ГС}}$	$2,8 \cdot (1 + 0,01686 \cdot 0,925) = 2,844 \text{ кг/с}$	

Продолжение табл.4.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$i_{\tau}^* = \frac{(i_{\tau \text{ НД}}^* - L_{\tau \text{ СВ}}) \cdot G_{\tau \text{ НД}} + i_{\kappa}^* \cdot G_{\text{В}} \left[(1 - v_{\text{СА} \tau \text{ СВ}}) + (1 - v_{\text{ПК} \tau \text{ СВ}}) + (1 - v_{\text{УТ} \tau \text{ СВ}}) \right]}{G_{\tau}}$ $(937,645 - 184,072) \cdot 2,8192 + 646,78 \cdot 2,8 \cdot [(1 - 0,99) + (1 - 1) + (1 - 1)] = 753,37 \text{ кДж/кг}$ $2,844$		
T_{τ}^*	725,9 К	$\pi - i - T$ по i_{τ}^*
$\pi(T_{\tau}^*)$	35,42	$\pi - i - T$ по i_{τ}^*
$A_{\tau \text{ СВ}} = \frac{G_{\tau \text{ НД}} \cdot \sqrt{R_{\tau} \cdot 10^3 \cdot T_{\tau \text{ НД}}^*}}{P_{\tau \text{ НД}}^* \cdot 10^3}$ $\frac{2,8192 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 889,1}}{234,94 \cdot 10^3} = 61,69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	$\frac{2,8192 \cdot \sqrt{0,2872 \cdot 10^3 \cdot 889,1}}{234,94 \cdot 10^3} = 61,69 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной $A_{\tau \text{ СВ}}$, определенной в проектном расчете	
Выходное устройство		
$M_{\tau \text{ р}}$ - число Маха за свободной турбиной на проектном режиме	0,38	принимается по рекомендации [1, с.62]
$q(\lambda_{\tau \text{ р}})$	0,5992	ГДФ по $M_{\tau \text{ р}}$ $\kappa = 1,33$
$q(\lambda_{\tau}) = q(\lambda_{\tau \text{ р}}) \cdot \frac{P_{\tau \text{ СВ.р}}^* \cdot G_{\tau \text{ СВ}}}{P_{\tau \text{ СВ}}^* \cdot G_{\tau \text{ СВ.р}}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\tau \text{ СВ}}^*}{T_{\tau \text{ СВ.р}}^*}} = 0,5992 \cdot \frac{105,383 \cdot 2,844}{97,8 \cdot 3,507} \cdot \sqrt{\frac{725,9}{817,7}} = 0,4933$		
M_{τ}	0,304	ГДФ по $q(\lambda_{\tau})$ $\kappa = 1,33$
$b = \frac{1 - \sigma_{\text{вых р}}}{M_{\tau \text{ р}}^2}$	$\frac{1 - 0,987}{0,38^2} = 0,09$	
$\sigma_{\text{вых}} = 1 - b \cdot M_{\tau}^2$	$1 - 0,09 \cdot 0,304^2 = 0,992$	

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$\pi(T_c) = \frac{\pi(T_T^*)}{\pi_c \cdot \sigma_{\text{вых}}}$	$\frac{35,42}{1,0244 \cdot 0,992} = 34,87$	
i_c	750,18 кДж/кг	$\pi - i - T$ по $\pi(T_c)$
$C_c = \sqrt{2 \cdot 10^3 (i_T^* - i_c)}$	$\sqrt{2 \cdot 10^3 \cdot (753,37 - 750,18)} = 80,0 \text{ м/с}$	
$a_{\text{кр}} = 18,1 \cdot \sqrt{T_T^*}$	$18,1 \cdot \sqrt{725,9} = 487,66 \text{ м/с}$	
$\lambda_c = C_c / a_{\text{кр}}$	$80 / 487,66 = 0,164$	
$q(\lambda_c)$	0,259	
$\mu F_c = \frac{G_{\text{гс}} \cdot \sqrt{T_T^*}}{m_{\text{г}} P_{\text{тсв}}^* \cdot \sigma_c \cdot q(\lambda_c)}$	$\frac{2,844 \cdot \sqrt{725,9}}{39,7 \cdot 97,8 \cdot 0,992 \cdot 0,259} = 768,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ с точностью до 5% эта величина должна совпадать с величиной μF_c , определенной в проектном расчете	
$N_{\text{е кр}} = L_{\text{тсв}} \cdot G_{\text{г тнд}} \cdot \eta_{\text{мсв}}$	$184,072 \cdot 2,8192 \cdot 0,98 = 508,56 \text{ кВт}$	$N_{\text{е кр}} \geq N_{\text{е кр}}$
$C_e = G_{\text{мч}} / N_e$	$169,92 / 508,56 = 0,334 \text{ кг/кВт ч}$	
Расчет проектной величины массы двигателя (ТВаД без редуктора)		
$M_{\text{дв}} = B \cdot G_{\text{в вэл}}^{m_1} \left(\pi_{\text{к}}^{0,286} - 1 \right)^{m_2} \cdot K_{T_{\text{г}}} \cdot K_c \cdot K_{\text{рес}}$		
$K_{T_{\text{г}}} = 1 + 2 \cdot 10^{-4} (T_{\text{г вэл}}^* - 1200) = 1 + 2 \cdot 10^{-4} (1415 - 1200) = 1,043$		

Продолжение табл.4.3

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
B	36,9	[8, с.31,]
m_1	0,888	там же
m_2	0,541	там же
K_c	1,0	[1, с.78]
$K_{рес}$	1,0	[1, с.78]
$M_{дв} = 36,9 \cdot 3,44^{0,888} \cdot (13,02^{0,286} - 1)^{0,521} \cdot 1,043 \cdot 1 \cdot 1 = 120,4 \text{ кг}$		
$\gamma_{дв} = M_{дв} / N_{е \text{ взл}}$	$\frac{1525}{11000,3} = 0,1386 \text{ кг / кВт (0,1019 кг/ л.с)}$	
Оценка показателей эффективности проектируемого ТВаД в системе вертолета		
Масса силовой установки		
$n_{дв}$	2	задается преподавателем или выбирается по прототипу ЛА
$K_{су}$	1,75	[1, с.27]
$M_{су} = M_{дв} \cdot n_{дв} \cdot K_{су}$	$120,4 \cdot 2 \cdot 1,75 = 421,4 \text{ кг}$	
Необходимое количество топлива на борту самолета		
$L_{п}$	630 км	задается или выбирается по прототипу вертолета
$\bar{V}_T$	0,905	[1, с.28,]
$V_T = V_{кр} \cdot \bar{V}_T \cdot 3,6$	$72,22 \cdot 0,905 \cdot 3,6 = 235,3 \text{ км / ч}$	
$\bar{G}_{топ}$	1,01	[1, с.28,]
$t_{из}$	0,5 ч	[1, с.28]

Параметр и формула его расчета	Числовой пример	Примечания
$M_{тЛА} = n_{дв} \cdot \overline{G}_{топ} \cdot C_{е\text{кр}} \cdot N_{е\text{кр}} \left(\frac{L_{п}}{V_{т}} + t_{п} \right)$	$2 \cdot 1,01 \cdot 0,334 \cdot 508,56 \cdot \left(\frac{630}{235,3} + 0,5 \right) = 1090,25 \text{ кг}$	
Суммарная масса силовой установки и топлива		
$\overline{M}_{тс}$	1,045	[1, с.27]
$M_{су+т} = M_{су} + \overline{M}_{тс} \cdot M_{тЛА}$	$421,4 + 1,045 \cdot 1090,25 = 1560,7 \text{ кг}$	
Взлетная масса вертолета		
$M_{пл}^*$	0,4	[1, с.27, табл.1.1]
$\overline{M}_{кн}$	0,28	[1, с.27, табл.1.1]
$M_0 = \frac{M_{су+т}}{1 - \overline{M}_{пл}^* - \overline{M}_{кн}}$	$\frac{1560,7}{1 - 0,4 - 0,28} = 4877 \text{ кг}$	
Проверка величины стартовой тяговооруженности		
$\mu_{взл} = \frac{n_{дв} \cdot N_{с\text{взл}}}{M_0}$	$\frac{2 \cdot 823}{4877} = 0,337 \text{ кВт/кг}$	Сопоставить с табл. 1.2 [1, с.29]
Расчет удельных затрат топлива вертолетом на 1 т.км		
$M_{кн} = \overline{M}_{кн} \cdot M_0$	$0,28 \cdot 4877 = 1365 \text{ кг}$	
$M_{тЛ} = n_{дв} \cdot \overline{G}_{топ} \cdot C_{е\text{кр}} \cdot N_{е\text{кр}} \cdot \frac{L_{п}}{V_{т}}$	$2 \cdot 1,01 \cdot 0,334 \cdot 508,56 \cdot \frac{630}{235,3} = 918,7 \text{ кг}$	
$C_{ткм} = \frac{M_{тЛ}}{M_{кн} \cdot L_{п} \cdot 10^{-3}}$	$\frac{918,7}{1365 \cdot 630 \cdot 10^{-3}} = 1,07 \text{ кг/т.км}$	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МАСЛОВ В.Г., КУЗЬМИЧЕВ В.С., ГРИГОРЬЕВ В.А. Выбор параметров и проектный термогазодинамический расчет авиационных газотурбинных двигателей. – Куйбышев: КуАИ, 1984. – 176 с.
2. КУЛАГИН В.В. Теория газотурбинных двигателей: Учебник. В 2 кн. Кн. 1. Анализ рабочего процесса, выбор параметров и проектирование проточной части. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 264 с.
3. АБРАМОВИЧ Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1976. – 888 с.
4. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок / ДОРОФЕЕВ В.М., МАСЛОВ В.Г., ПЕРВЫШИН А.Н. и др. – М.: Машиностроение, 1973. – 144 с.
5. МАСЛОВ В.Г. Выбор параметров и термодинамический расчет авиационных ГТД. – Куйбышев: КуАИ, 1970. – 195 с.
6. Исследование состояния рабочего процесса 60-ти авиационных ГТД / МАСЛОВ В.Г., ДИДЕНКО А.А., МОРОЗОВ М.А. и др. – Куйбышев: КуАИ, 1986. – 65 с.
7. БОЧКАРЕВ С.К., КУЛАГИН В.В., КУЗЬМИЧЕВ В.С. и др. Выбор закона регулирования, анализ совместной работы узлов и расчет характеристик ГТД: Метод. указ. – Куйбышев: КуАИ, 1990. – 40 с.
8. Теория и методы начальных этапов проектирования авиационных ГТД: Учеб. пособие / В.Г. МАСЛОВ, В.С. КУЗЬМИЧЕВ, А.Н. КОВАРЦЕВ, В.А. ГРИГОРЬЕВ. – Самара: СГАУ, 1996. – 147 с.
9. Иностранные авиационные и ракетные двигатели. Справочники / Под ред. Т.В.СКВОРЦОВА. – М.: ЦИАМ, 1978 (324 с.); 1981 (298 с.); 1984 (319 с.); 1987 (312 с.).
10. TAYLOR I.W.R. Jane's all the World's aircraft. London. 1980...81.
11. Иностранные авиационные двигатели: Справочник /Под ред. Л.И. СОРКИНА. – М.: ЦИАМ, 1992. – 286 с.
12. Дополнение к справочнику “Иностранные авиационные двигатели” /Под ред. Л.И.СОРКИНА. – М.: ЦИАМ, 1997. – 127 с.
13. ЗРЕЛОВ В.А., МАСЛОВ В.Г. Основные данные отечественных авиационных ГТД и их применение при учебном проектировании. – Самара: СГАУ, 1999. – 160 с.
14. Таблицы газодинамических функций. – М.: ЦИАМ, 1956. – 164 с.

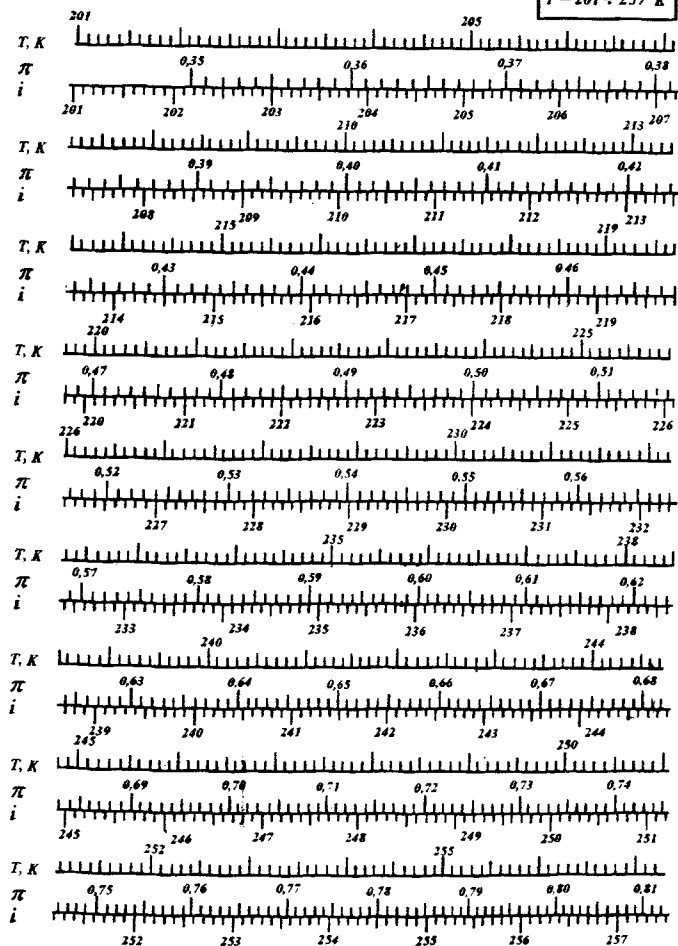
ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

π - i - T -диаграммы для сухого воздуха ($\alpha = \infty$, $d = 0$)

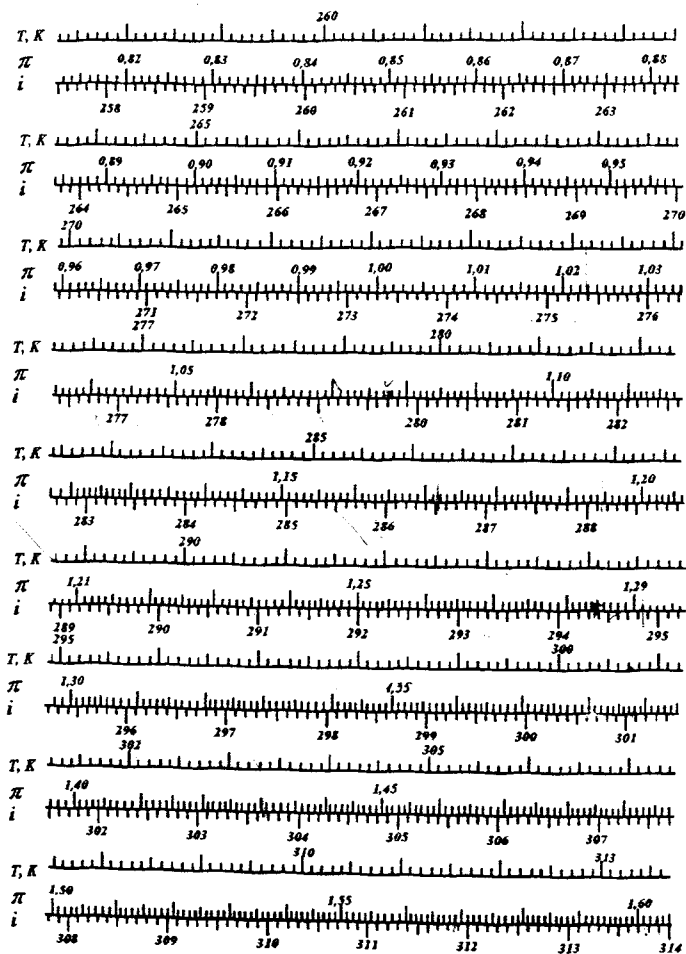
(Единица измерения энтальпии: кДж/кг)

$$T = 201 + 257 \text{ K}$$



Сухой воздух ($\alpha = \infty$, $d = 0$)

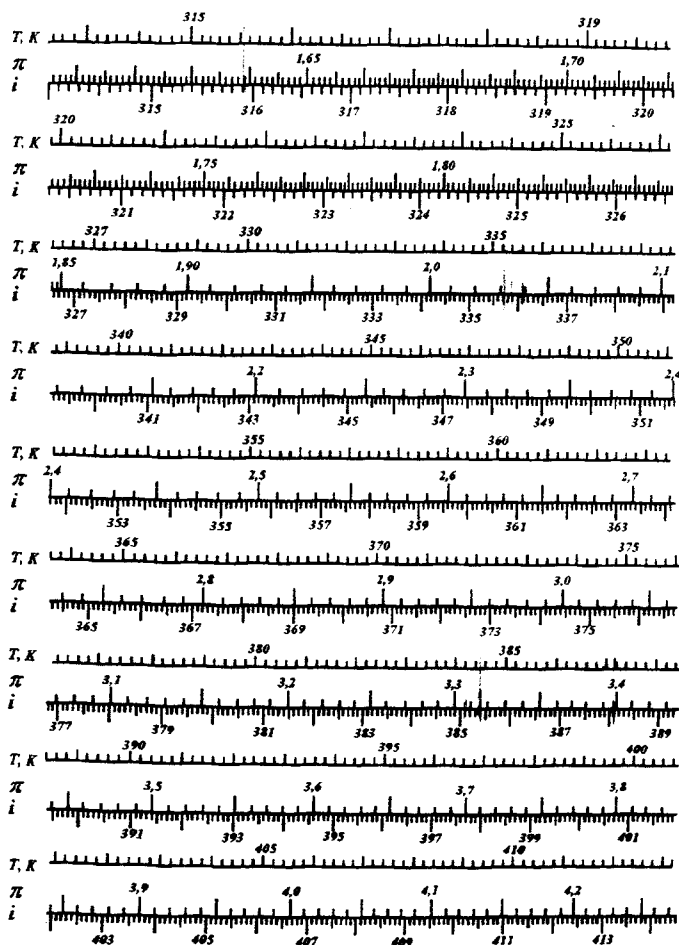
$T = 258 \div 313 \text{ K}$



Продолжение прил. 1

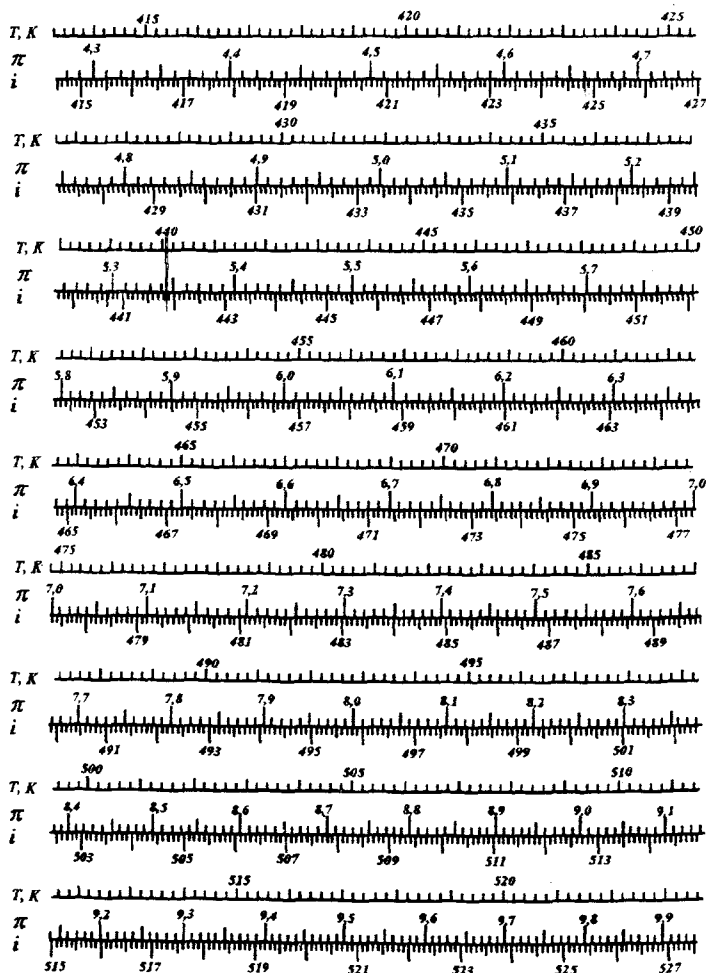
Сухой воздух ($\alpha = \infty$, $d = 0$)

$$T = 314 \div 413 \text{ K}$$



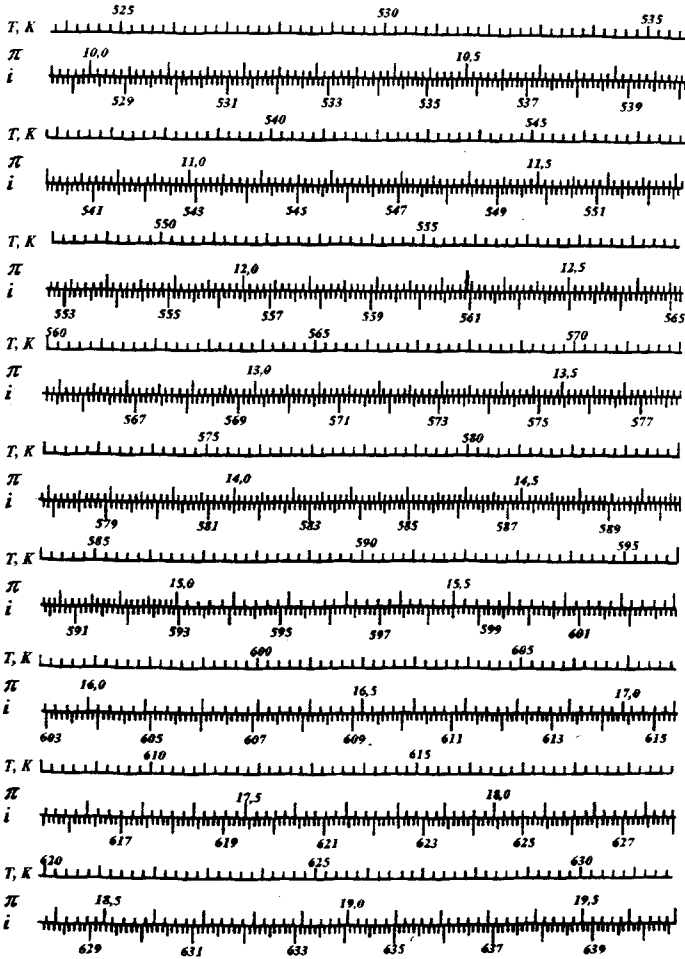
Сухой воздух ($\alpha = \infty$, $d = 0$)

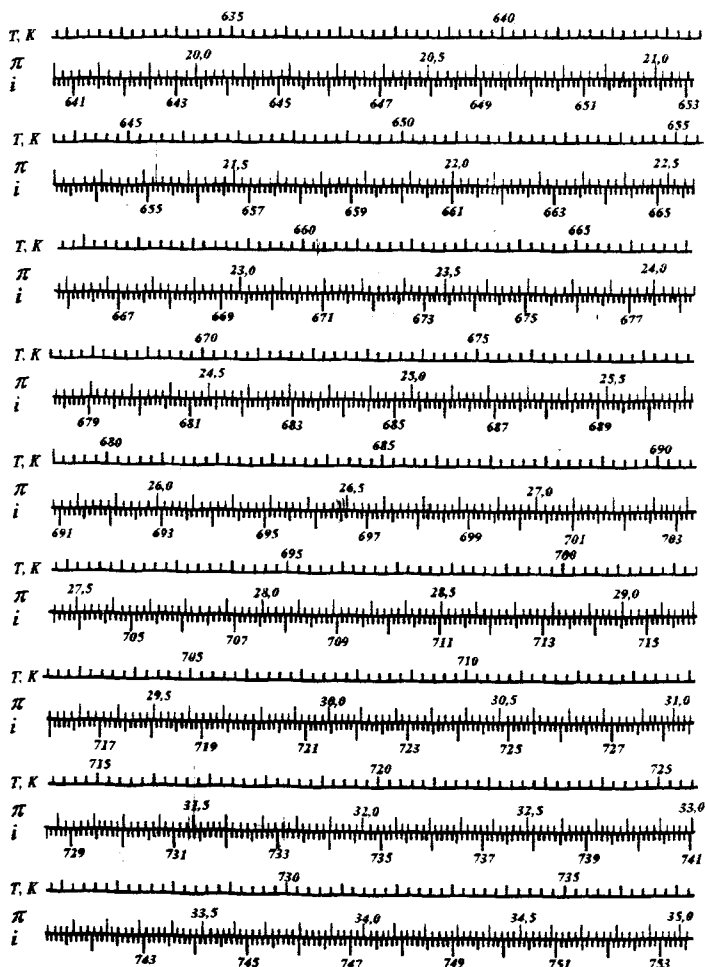
$$T = 414 \pm 523 \text{ K}$$

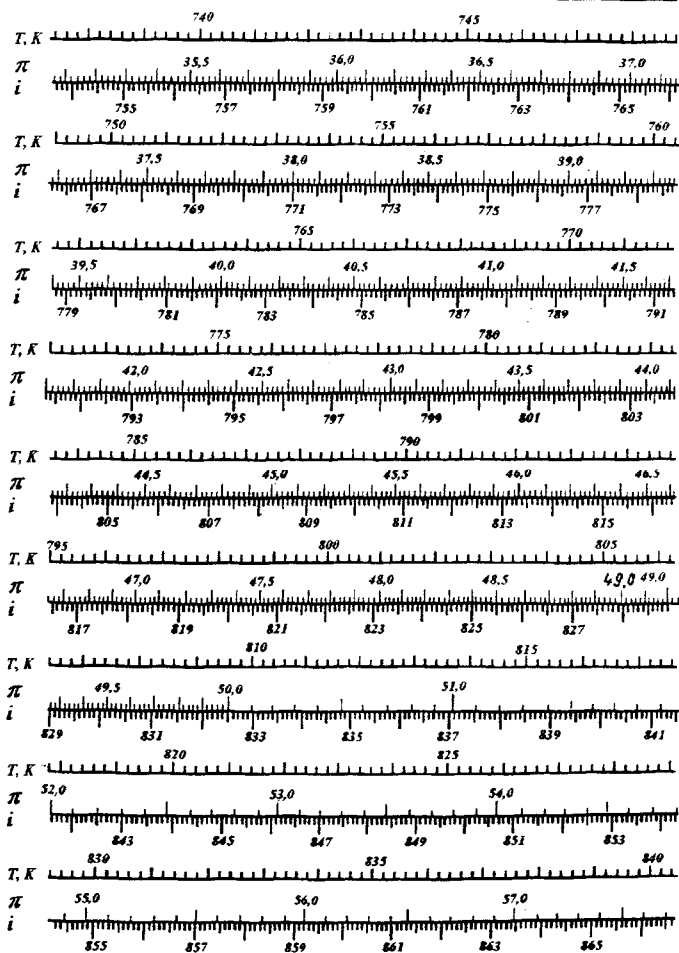


Сухой воздух ($\alpha = \infty$, $d = 0$)

$$T = 524 \div 631 \text{ K}$$

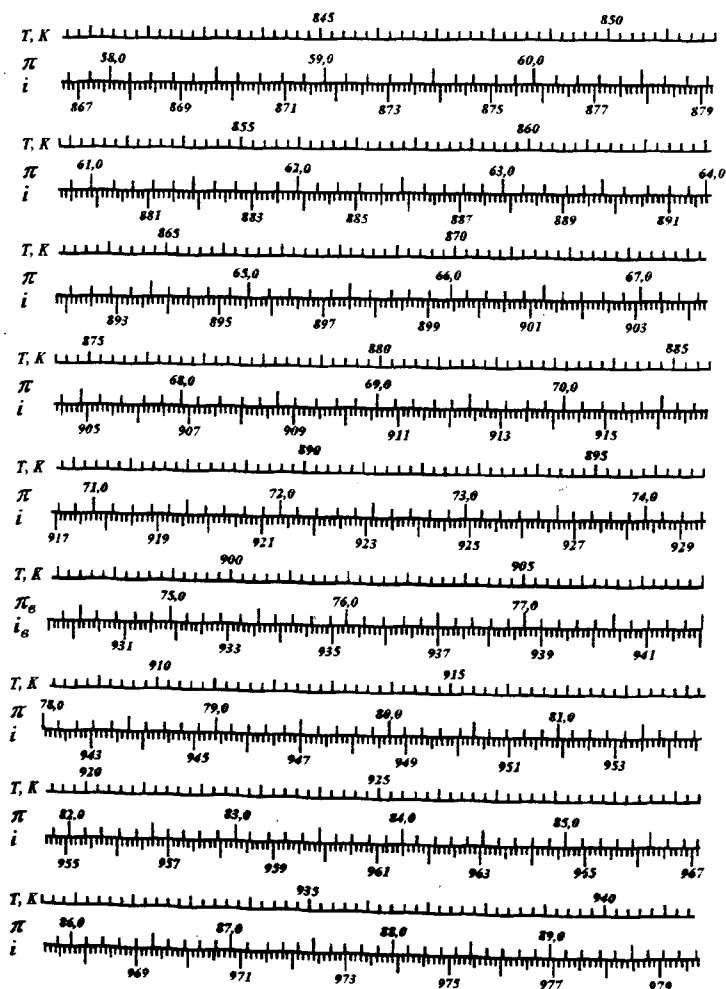


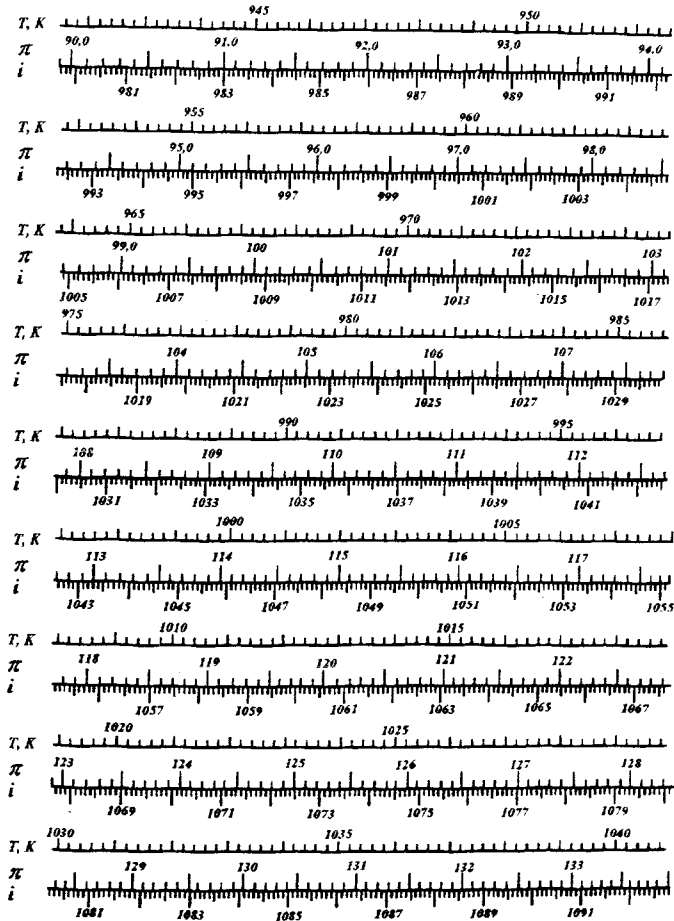
Сухой воздух ($\alpha = \infty$, $d = 0$) $T = 632 \div 737 \text{ K}$ 

Сухой воздух ($\alpha = \infty$, $d = 0$) $T = 738 \div 840 \text{ K}$ 

Сухой воздух ($\alpha = \infty$, $d = 0$)

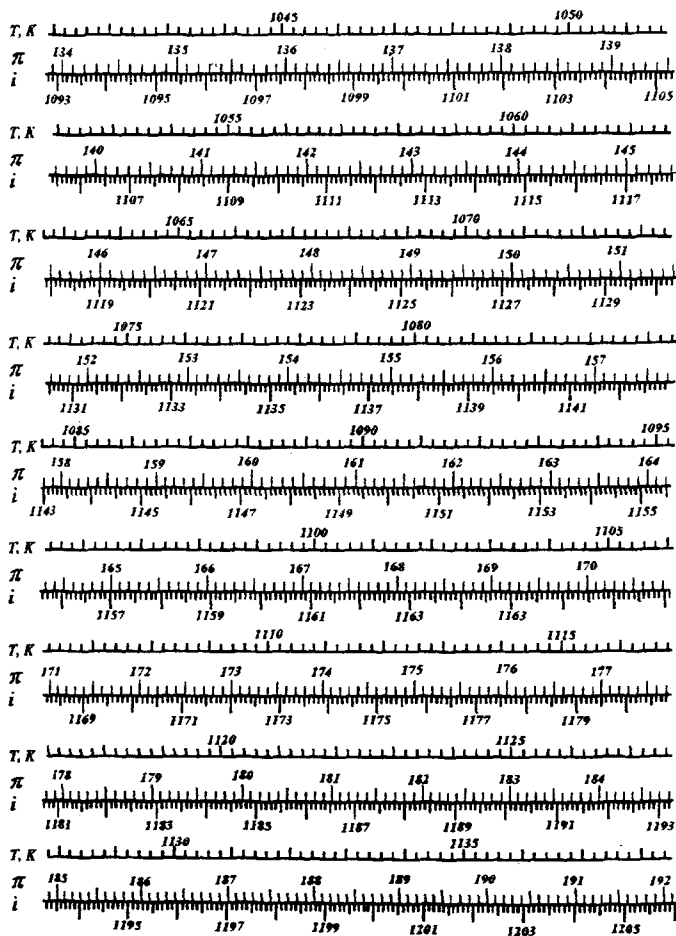
$$T = 841 \div 941 \text{ K}$$



Сухой воздух ($\alpha = \infty$, $d = 0$) $T = 942 \div 1040 \text{ K}$ 

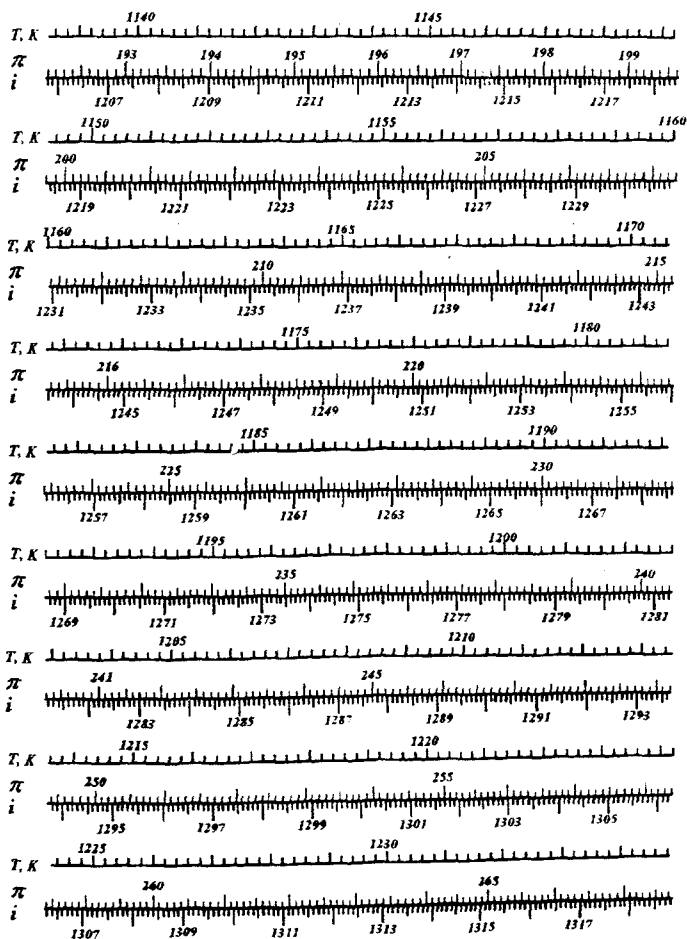
Сухой воздух ($\alpha = \infty$, $d = 0$)

$$T = 1041 \div 1138 \text{ K}$$



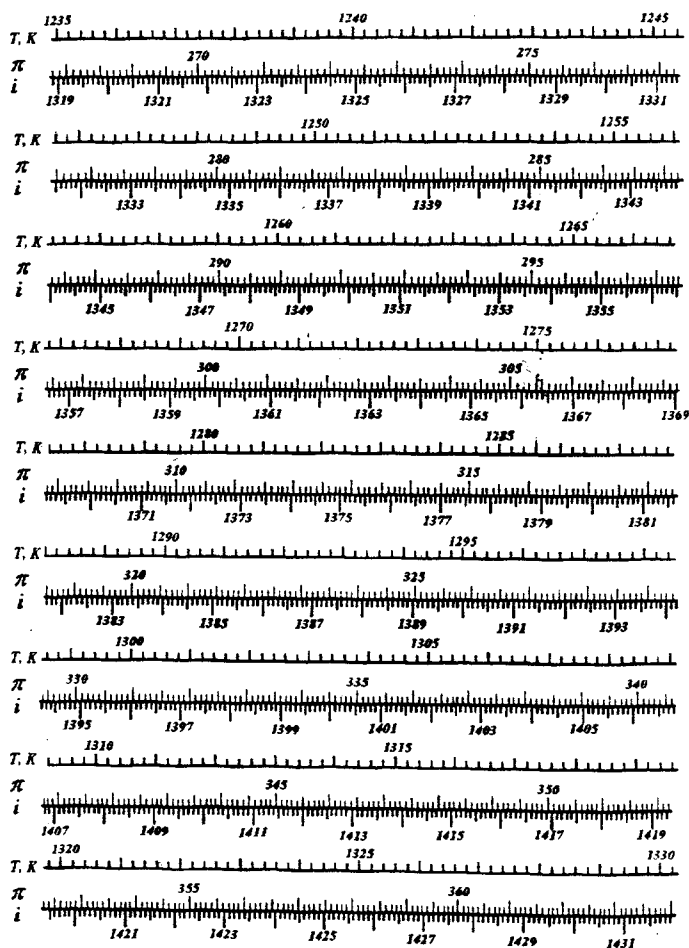
Сухой воздух ($\alpha = \infty$, $d = 0$)

$$T = 1139 + 1234 K$$



Сухой воздух ($\alpha=\infty$, $d=0$)

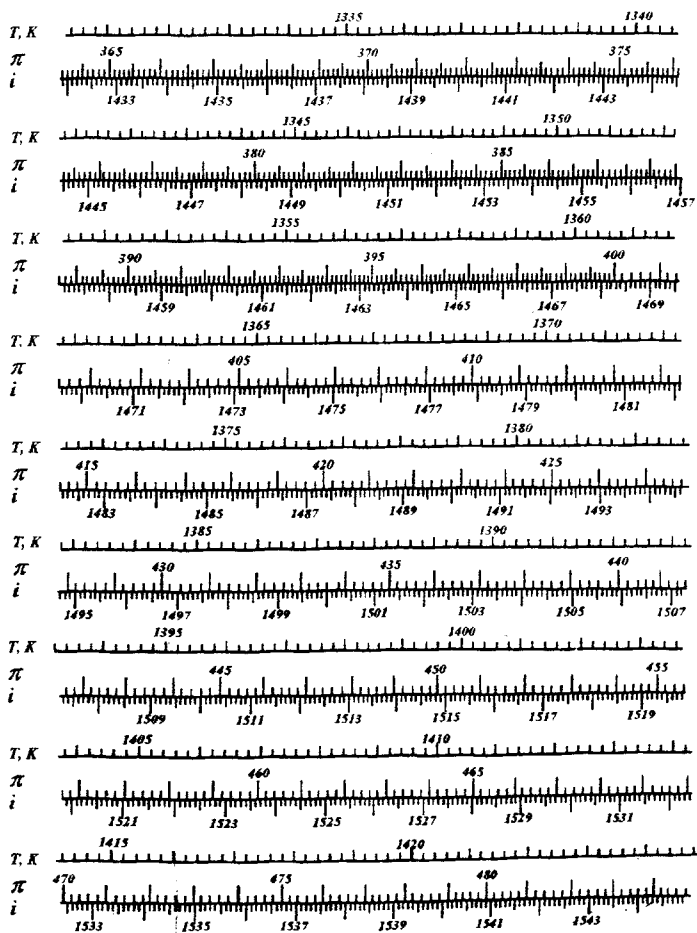
$T=1235 \div 1330$ K



Сухой воздух ($\alpha=\infty$, $d=0$)

Продолжение прил 1

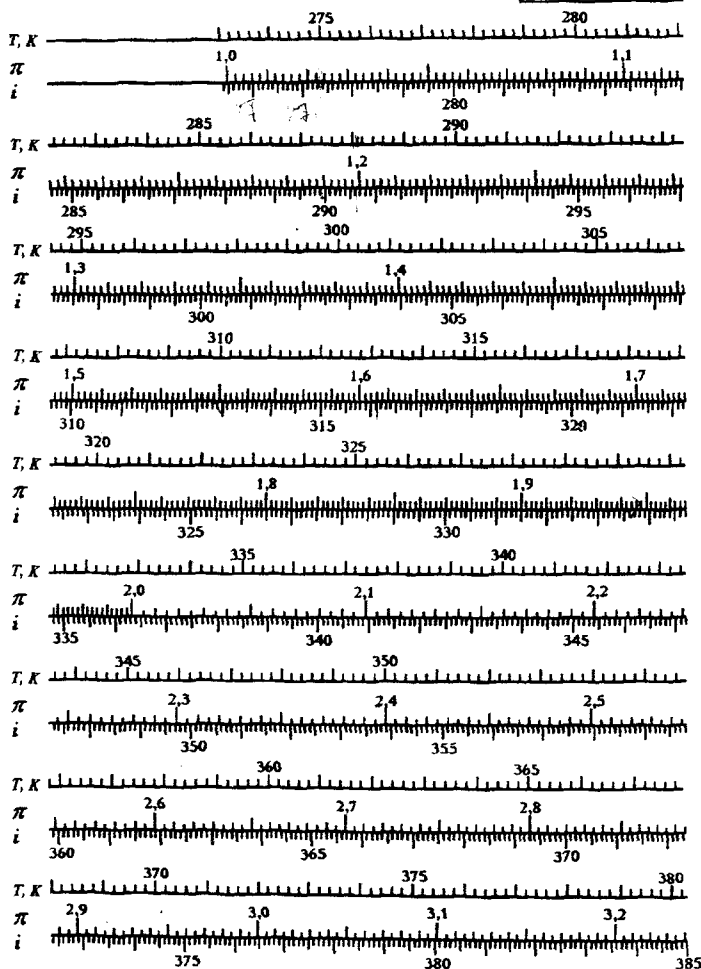
$$T = 1331 \div 1424 \text{ K}$$



Продолжение прил. I

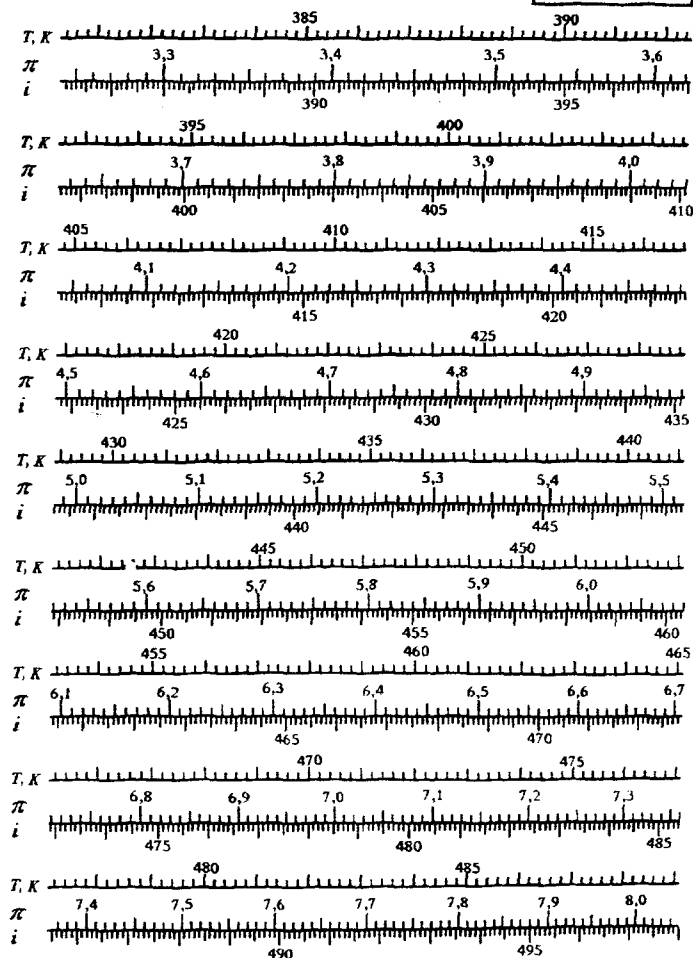
π - i - T - диаграммы для продуктов сгорания углеводородного топлива при $\alpha = 4$, $d = 0$
(Единица измерения энтальпии: кДж/кг)

$T = 273 \pm 380 \text{ K}$



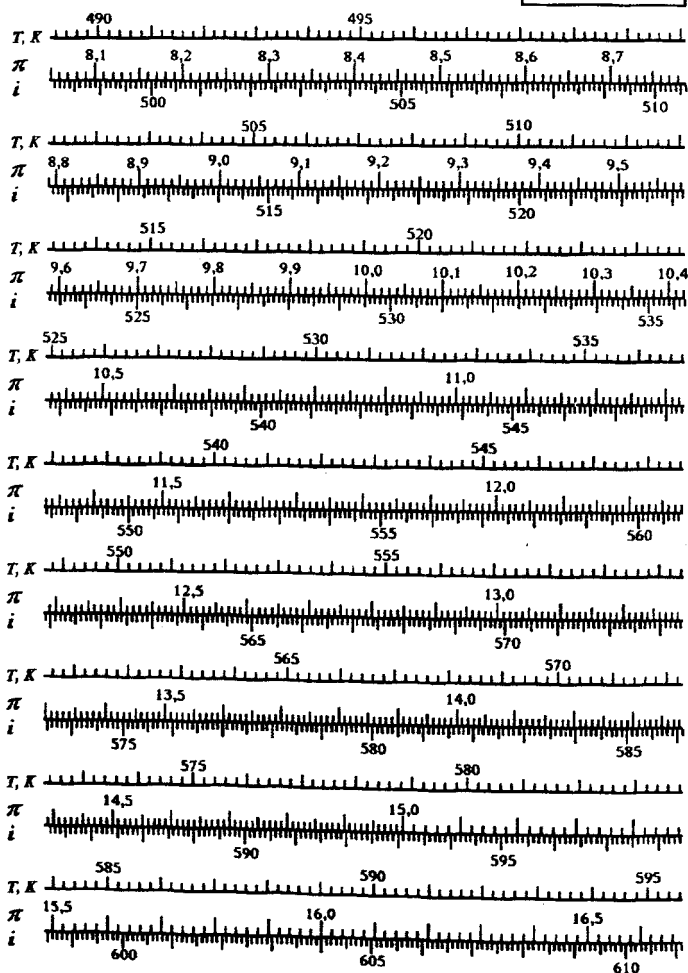
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

$$T = 381 \div 489 \text{ K}$$



Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

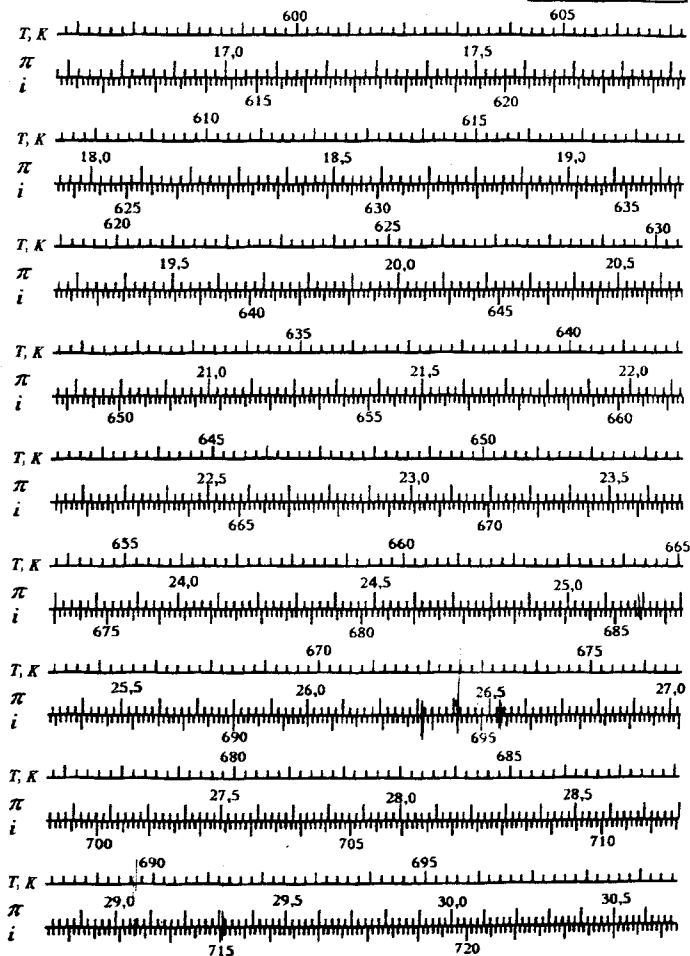
$$T = 490 \div 595 \text{ K}$$



Продолжение прил. I

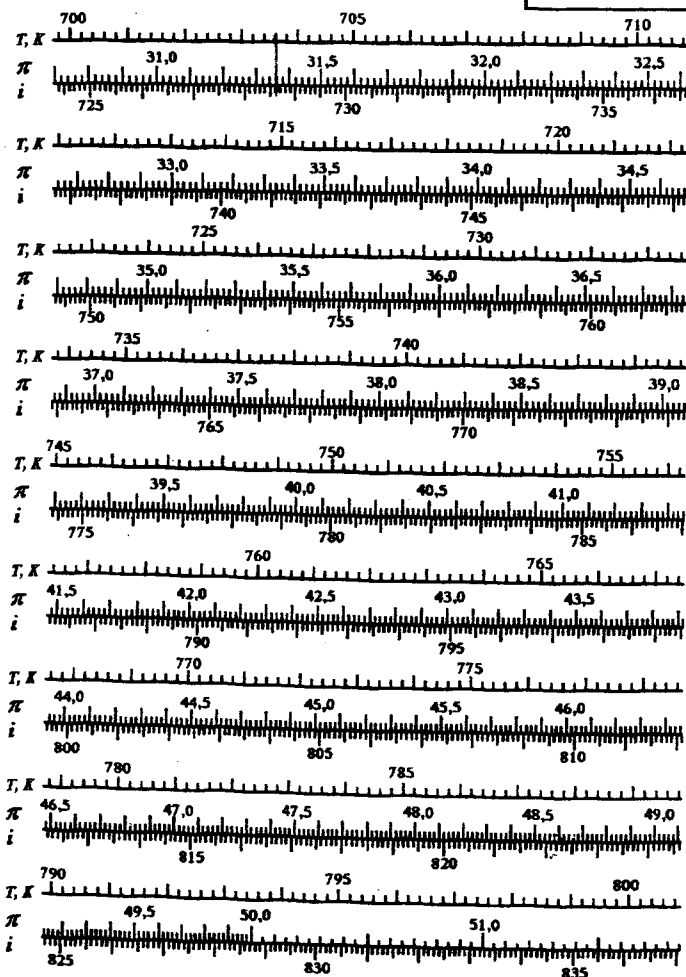
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

$T = 596 \div 699 \text{ K}$



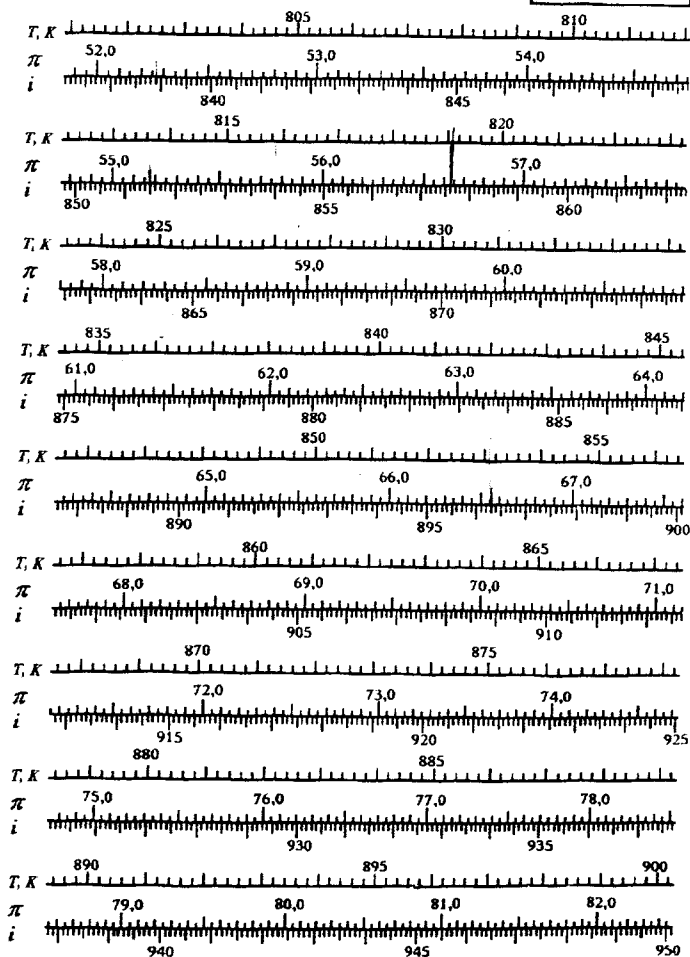
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

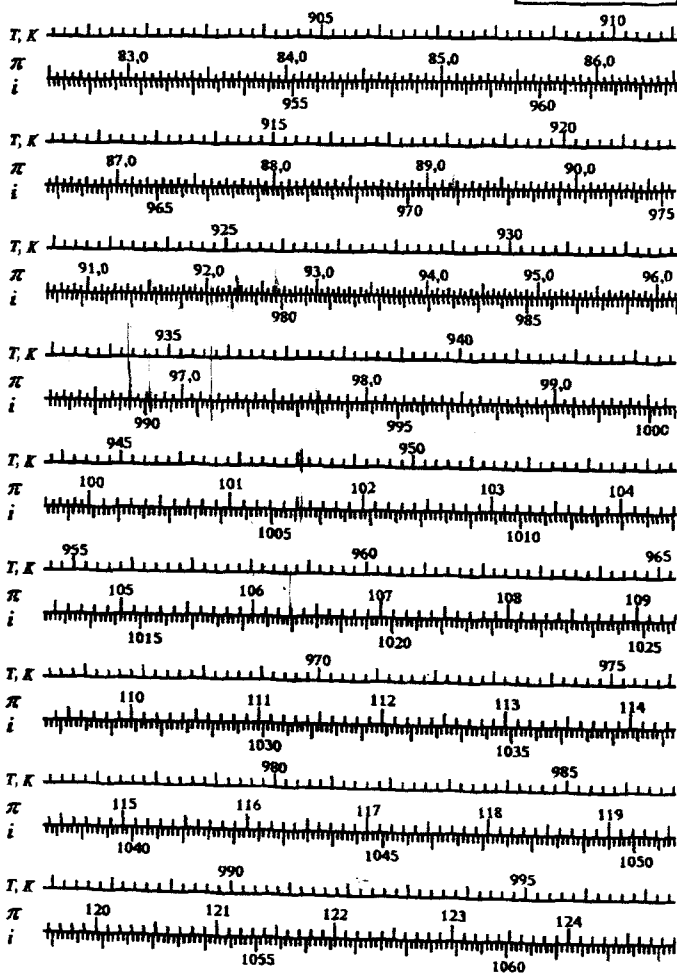
$T = 700 + 800 \text{ K}$



Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

T - 801 ÷ 900 K

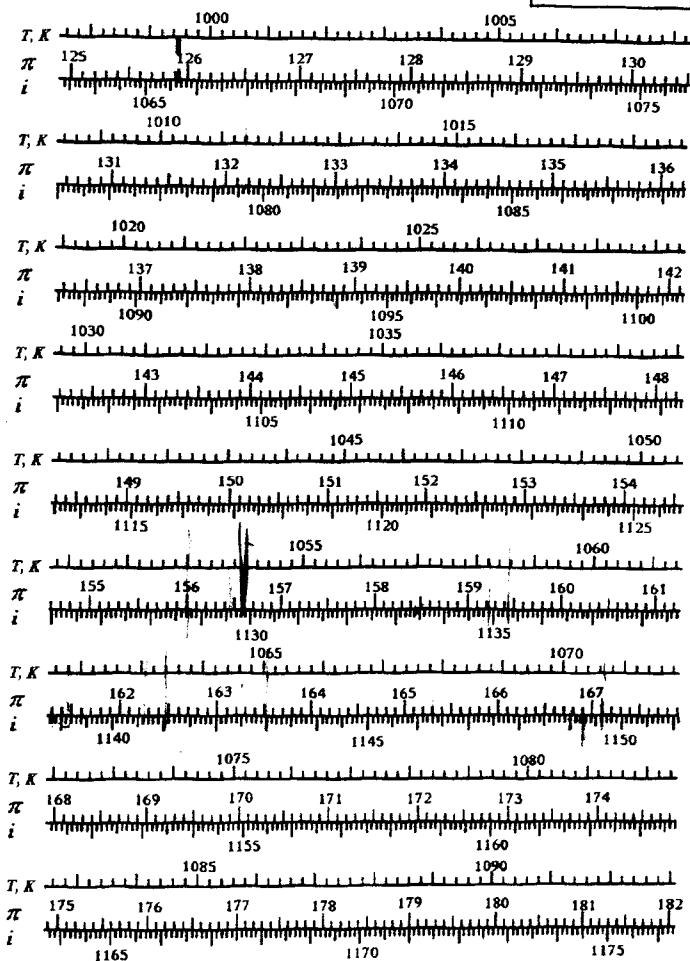


Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$) $T = 901 \pm 997 \text{ K}$ 

Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

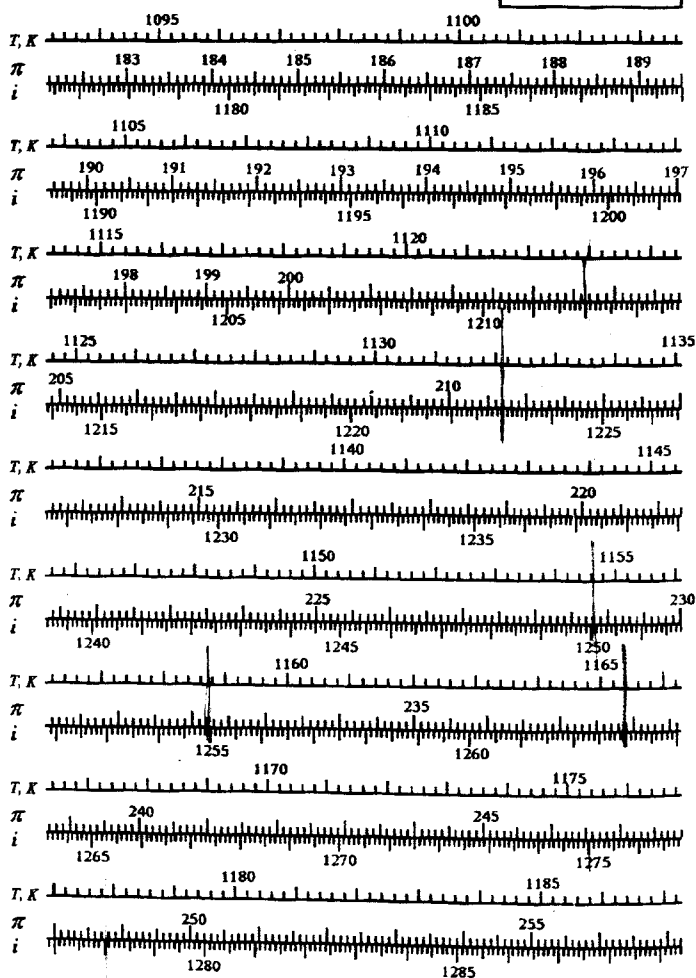
Продолжение прил. 1

$T = 998 \pm 1093 \text{ K}$



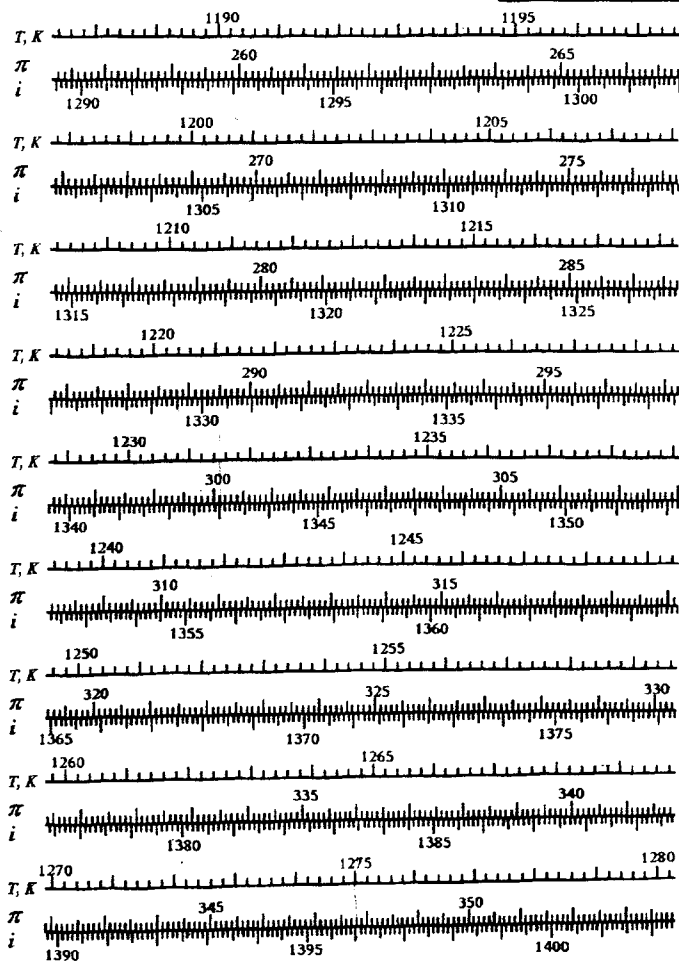
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

T = 1094 + 1187 K



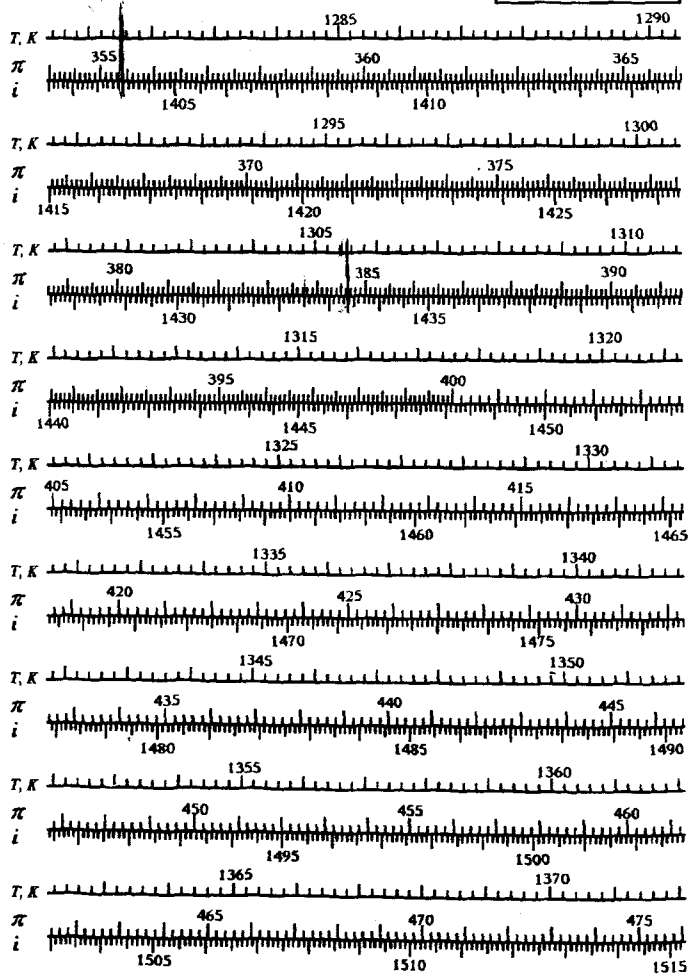
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

$$T = 1188 \div 1280 \text{ K}$$



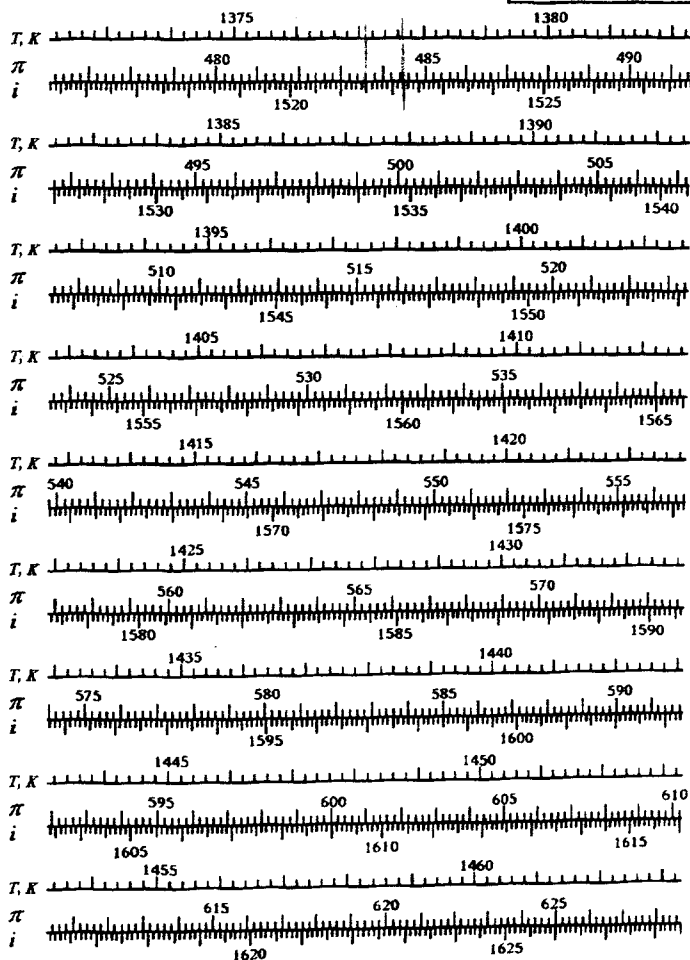
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

$T = 1281 \div 1372 \text{ K}$



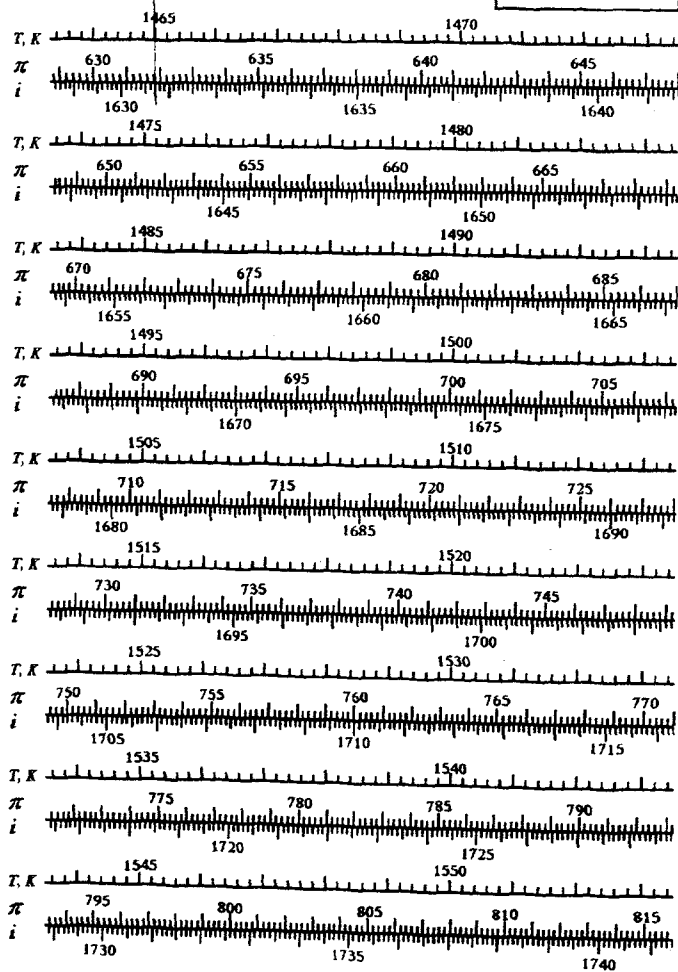
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

T = 1373 ÷ 1463 K



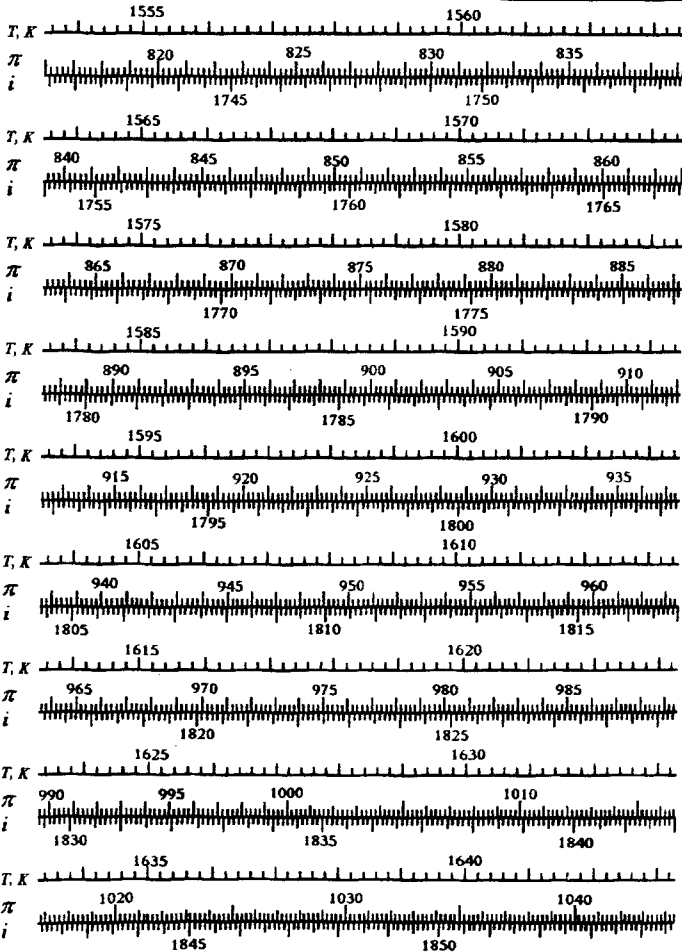
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

$$T = 1464 \pm 1553 \text{ K}$$



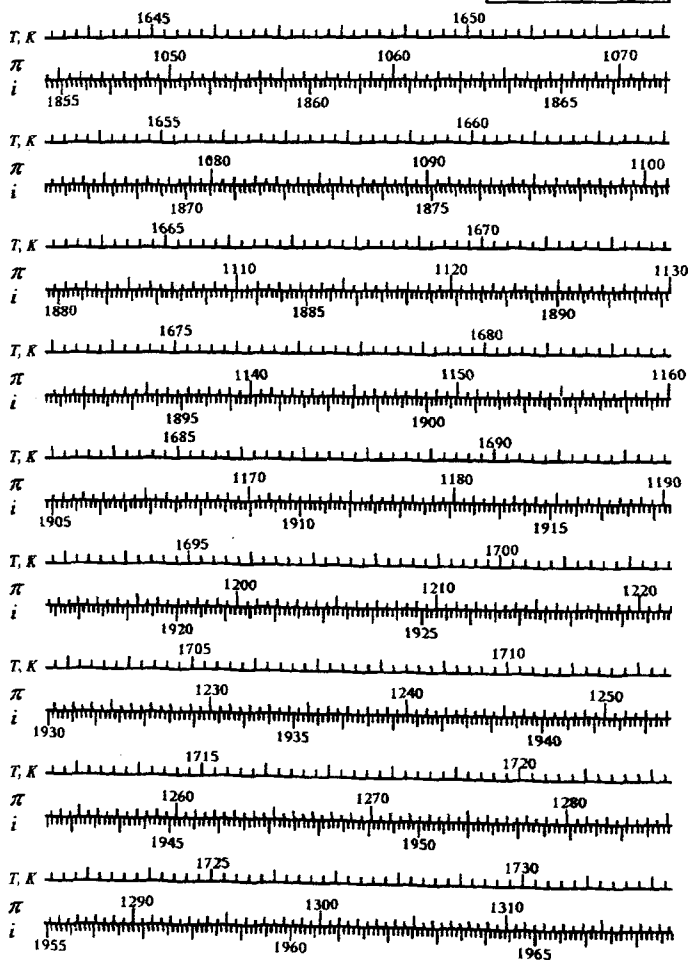
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

$$T = 1554 \div 1643 \text{ K}$$



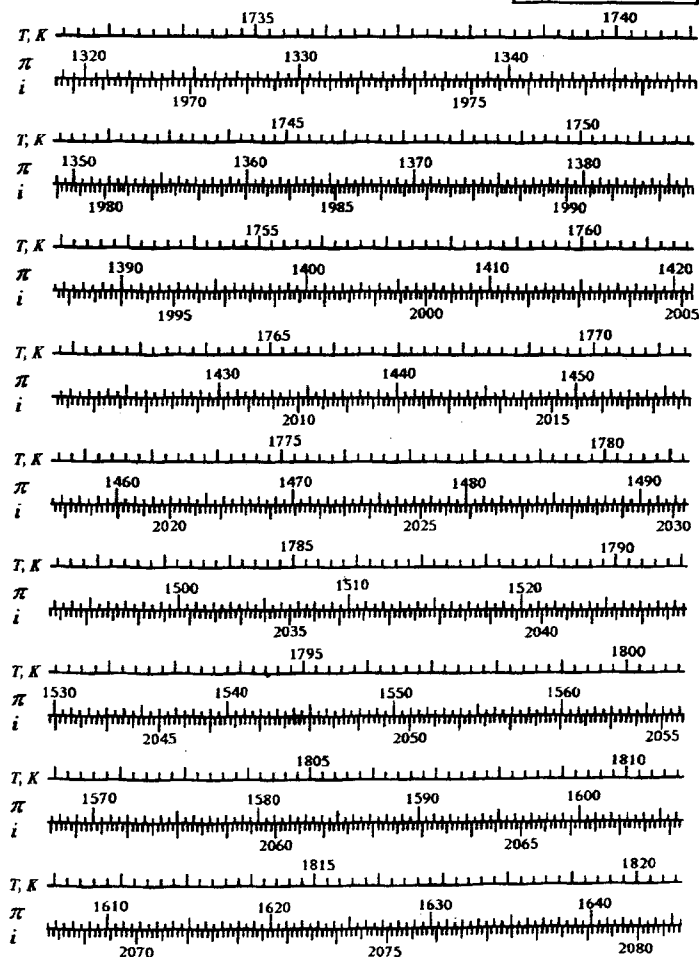
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

$$T = 1644 \div 1732 \text{ K}$$



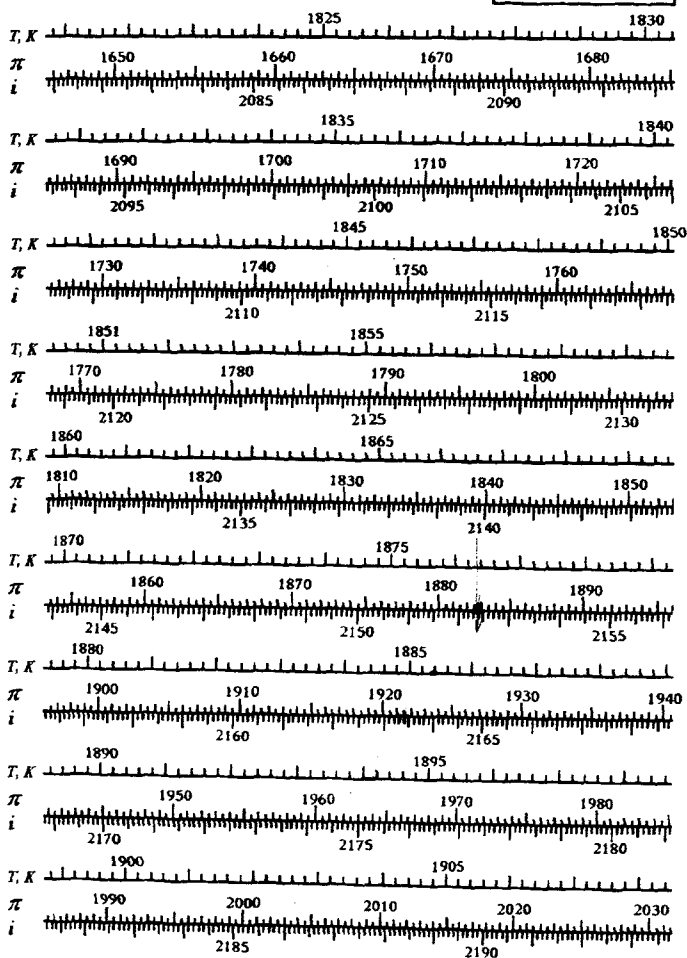
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

T = 1733 ÷ 1820 K



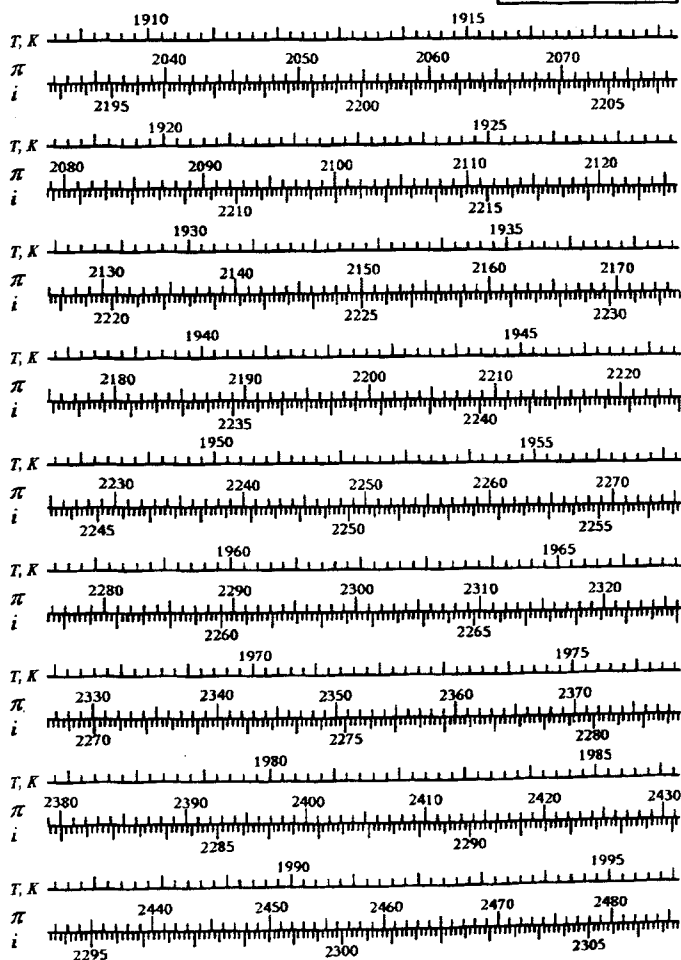
Продукты старения ($\alpha = 4$, $d = 0$)

$$T = 1821 \div 1908 \text{ K}$$



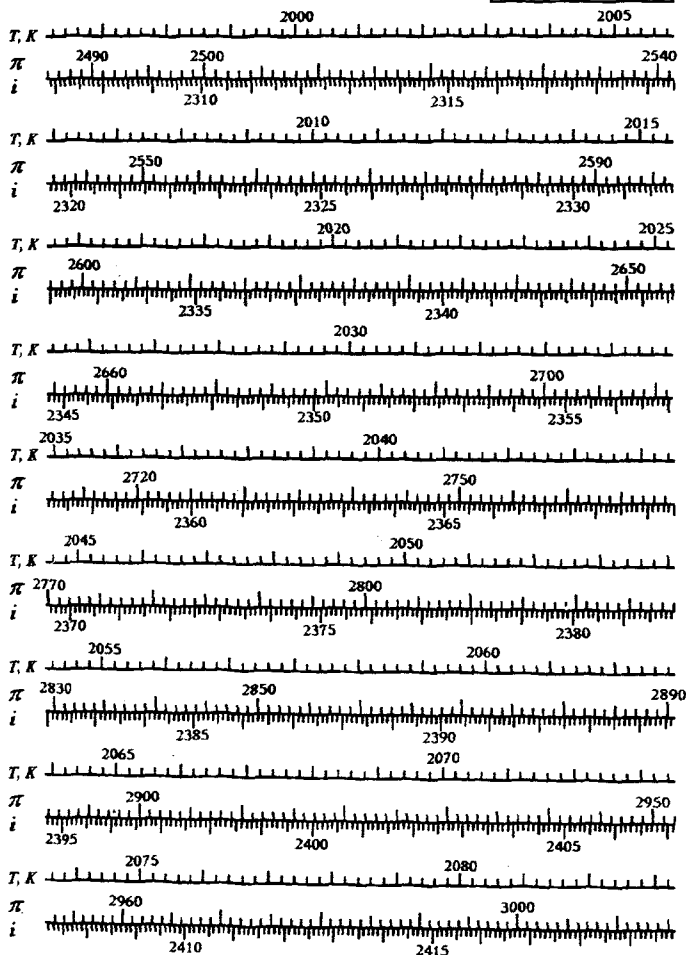
Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

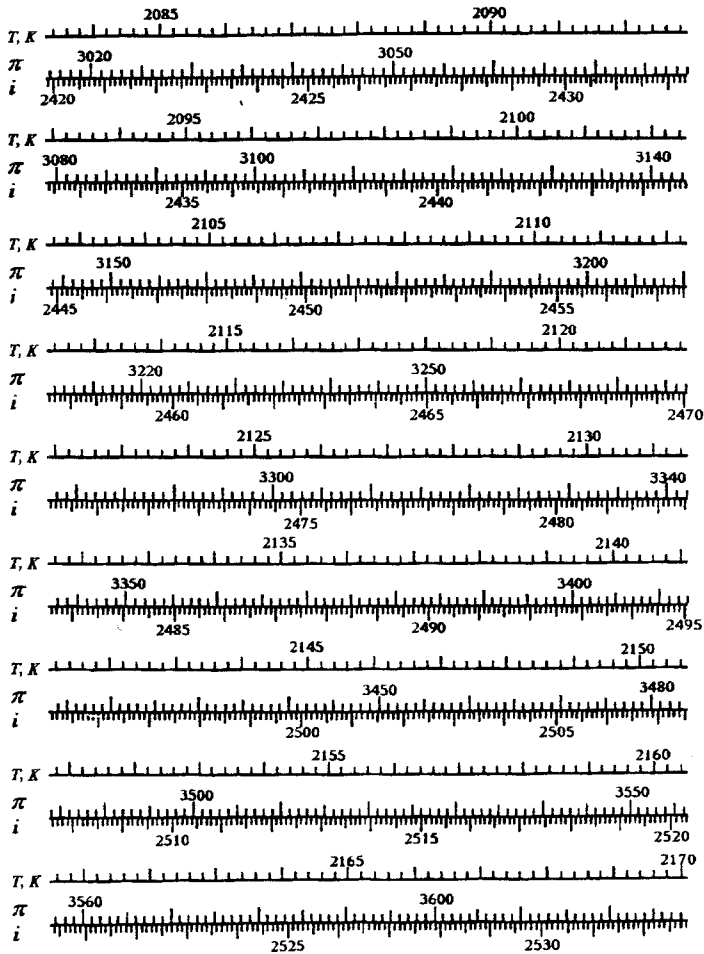
T = 1909 + 1996 K



Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

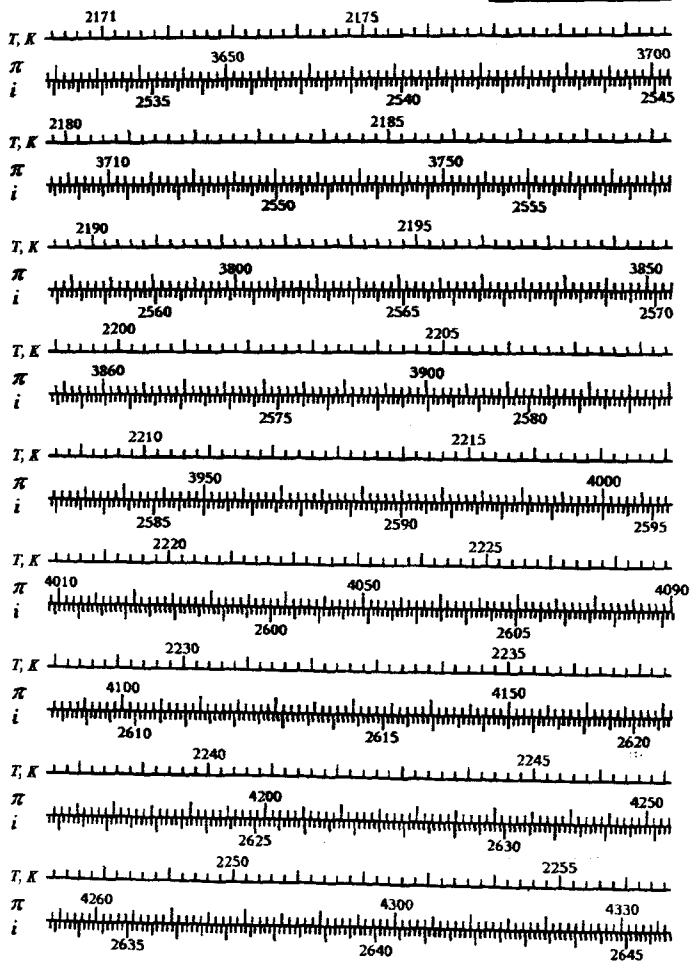
$T = 1997 \div 2083 \text{ K}$



Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$) $T = 2084 \pm 2170 \text{ K}$ 

Продукты сгорания ($\alpha = 4$, $d = 0$)

$$T = 2171 + 2256 \text{ K}$$



Приложение 2

Таблица стандартной атмосферы [4]

H , км	p_0 , кПа	ρ_0 , кгс/м ²	T_0 , К	a , м/с
-0,5	107,492	1,096	291,42	342,20
0	101,330	1,033	288,15	340,28
0,5	95,457	0,973	284,90	338,36
1	89,880	0,916	281,65	336,43
1,5	84,570	0,862	278,40	334,48
2	79,501	0,811	275,14	332,52
2,5	74,697	0,762	271,89	330,55
3	70,129	0,715	268,64	328,56
3,5	65,777	0,671	265,38	326,56
4	61,624	0,628	262,13	324,56
4,5	57,747	0,589	258,88	322,54
5	54,048	0,551	255,63	320,51
5,5	50,537	0,515	252,38	318,47
6	47,215	0,481	249,13	316,41
6,5	44,071	0,449	245,88	314,34
7	41,100	0,419	242,63	312,25
7,5	38,292	0,390	239,38	310,15
8	35,650	0,364	236,14	308,05
8,5	33,149	0,338	232,89	305,92
9	30,792	0,314	229,64	303,78
9,5	28,580	0,291	226,40	301,63
10	26,492	0,270	223,15	299,45
10,5	24,530	0,250	219,90	297,27
11	22,691	0,231	216,66	295,07
11,5	20,977	0,214	216,66	295,07
12	19,392	0,198	216,66	295,07
12,5	17,926	0,183	216,66	295,07
13	16,573	0,169	216,66	295,07
13,5	15,322	0,156	216,66	295,07
14	14,164	0,144	216,66	295,07
14,5	13,095	0,134	216,66	295,07
15	12,108	0,123	216,66	295,07
15,5	11,194	0,114	216,66	295,07
16	10,348	0,106	216,66	295,07
16,5	9,568	0,098	216,66	295,07
17	8,846	0,090	216,66	295,07
17,5	8,179	0,083	216,66	295,07
18	7,562	0,077	216,66	295,07
18,5	6,992	0,071	216,66	295,07
19	6,465	0,066	216,66	295,07
19,5	5,978	0,061	216,66	295,07
20	5,527	0,056	216,66	295,07
21	4,726	0,048	216,66	295,07
22	4,041	0,041	216,66	295,07
23	3,455	0,035	216,66	295,07
24	2,954	0,030	216,66	295,07
25	2,526	0,026	216,66	295,07
26	2,162	0,022	219,40	296,93
27	1,855	0,019	222,14	298,78
28	1,594	0,016	224,87	300,61
29	1,373	0,014	227,61	302,43
30	1,184	0,012	230,35	304,25

Таблица термодинамических функций π - Γ для продуктов сгоранияв сухом воздухе ($\alpha = 1$, $d = 0$) [4]

T, K	$i, \text{кДж/кг}$	π	T, K	$i, \text{кДж/кг}$	π	T, K	$i, \text{кДж/кг}$	π
360	374,339	2,774	860	949,032	87,119	1360	1593,328	623,505
370	385,121	3,081	870	961,360	91,536	1370	1606,750	629,947
380	395,928	3,402	880	973,664	96,109	1380	1620,194	636,421
390	406,760	3,745	890	985,949	100,860	1390	1633,658	642,929
400	417,616	4,116	900	998,209	105,800	1400	1647,135	649,471
410	428,501	4,516	910	1010,687	110,950	1410	1660,625	656,049
420	439,415	4,948	920	1023,101	116,307	1420	1674,131	662,664
430	450,356	5,414	930	1035,540	121,878	1430	1687,653	669,316
440	461,321	5,913	940	1048,005	127,668	1440	1701,192	676,006
450	472,322	6,449	950	1060,497	133,679	1450	1714,745	682,734
460	483,347	7,023	960	1073,016	139,930	1460	1728,310	689,508
470	494,396	7,635	970	1085,560	146,417	1470	1741,889	696,405
480	505,465	8,275	980	1098,138	153,114	1480	1755,495	703,427
490	516,559	8,952	990	1110,745	160,059	1490	1769,112	710,483
500	527,685	9,674	1000	1123,377	167,266	1500	1782,743	717,573
510	538,842	10,444	1010	1136,031	174,741	1510	1796,388	724,707
520	550,028	11,263	1020	1148,709	182,493	1520	1810,045	731,883
530	561,247	12,134	1030	1161,413	190,531	1530	1823,718	739,100
540	572,496	13,059	1040	1174,138	198,866	1540	1837,405	746,359
550	583,774	14,040	1050	1186,890	207,494	1550	1851,105	753,661
560	595,085	15,079	1060	1199,666	216,433	1560	1864,819	761,007
570	606,426	16,178	1070	1212,465	225,685	1570	1878,545	768,397
580	617,796	17,323	1080	1225,298	235,234	1580	1892,291	775,831
590	629,196	18,527	1090	1238,161	245,099	1590	1906,053	783,310
600	640,628	19,799	1100	1251,042	255,309	1600	1919,828	790,834
610	652,091	21,144	1110	1263,944	265,875	1610	1933,615	798,403
620	663,591	22,563	1120	1276,869	276,808	1620	1947,412	806,017
630	675,116	24,059	1130	1289,813	288,111	1630	1961,224	813,676
640	686,675	25,636	1140	1302,780	299,791	1640	1975,046	821,380
650	698,268	27,296	1150	1315,769	311,865	1650	1988,879	829,129
660	709,892	29,042	1160	1328,777	324,338	1660	2002,725	836,923
670	721,550	30,877	1170	1341,806	337,219	1670	2016,583	844,762
680	733,245	32,785	1180	1354,864	350,482	1680	2030,449	852,646
690	744,971	34,781	1190	1367,946	364,156	1690	2044,333	860,574
700	756,729	36,879	1200	1381,045	378,274	1700	2058,225	868,547
710	768,519	39,081	1210	1394,164	392,848	1710	2072,131	876,564
720	780,337	41,391	1220	1407,304	407,897	1720	2086,046	884,625
730	792,188	43,813	1230	1420,467	423,418	1730	2099,978	892,729
740	804,069	46,350	1240	1433,640	439,429	1740	2113,930	900,876
750	815,979	49,006	1250	1446,838	455,932	1750	2127,891	909,067
760	827,922	51,786	1260	1460,055	472,951	1760	2141,854	917,302
770	839,893	54,693	1270	1473,291	490,494	1770	2155,832	925,581
780	851,903	57,711	1280	1486,557	508,518	1780	2169,827	933,904
790	863,944	60,855	1290	1499,844	527,064	1790	2183,828	942,271
800	876,014	64,142	1300	1513,149	546,181	1800	2197,834	950,682
810	888,113	67,575	1310	1526,470	565,885	1810	2211,852	959,137
820	900,238	71,161	1320	1539,808	586,171	1820	2225,879	967,637
830	912,395	74,904	1330	1553,163	607,066	1830	2239,915	976,181
840	924,579	78,808	1340	1566,535	628,580	1840	2253,959	984,769
850	936,791	82,878	1350	1579,923	650,721	1850	2268,014	993,401

Таблицы газодинамических функций для воздуха [14]

 $\kappa=1.4$

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,250	0,96401	0,38417	2,12500	0,22942	0,295	0,95015	0,44865	1,84242	0,27127
0,251	0,96373	0,38563	2,11753	0,23034	0,296	0,94982	0,45006	1,83719	0,27220
0,252	0,96344	0,38708	2,11013	0,23127	0,297	0,94948	0,45147	1,83200	0,27314
0,253	0,96316	0,38853	2,10278	0,23220	0,298	0,94915	0,45288	1,82685	0,27407
0,254	0,96287	0,38999	2,09550	0,23313	0,299	0,94881	0,45428	1,82174	0,27500
0,255	0,96258	0,39144	2,08828	0,23405	0,300	0,94848	0,45569	1,81667	0,27594
0,256	0,96229	0,39289	2,08113	0,23498	0,301	0,94814	0,45709	1,81163	0,27687
0,257	0,96200	0,39434	2,07403	0,23591	0,302	0,94780	0,45849	1,80663	0,27781
0,258	0,96171	0,39579	2,06698	0,23684	0,303	0,94746	0,45989	1,80167	0,27874
0,259	0,96141	0,39723	2,06000	0,23777	0,304	0,94712	0,46129	1,79674	0,27967
0,260	0,96112	0,39868	2,05308	0,23869	0,305	0,94678	0,46269	1,79184	0,28061
0,261	0,96082	0,40013	2,04621	0,23962	0,306	0,94644	0,46408	1,78699	0,28154
0,262	0,96053	0,40157	2,03940	0,24055	0,307	0,94609	0,46548	1,78216	0,28248
0,263	0,96023	0,40301	2,03264	0,24148	0,308	0,94575	0,46687	1,77738	0,28341
0,264	0,95993	0,40446	2,02594	0,24241	0,309	0,94540	0,46827	1,77262	0,28435
0,265	0,95963	0,40590	2,01929	0,24334	0,310	0,94506	0,46966	1,76790	0,28528
0,266	0,95933	0,40734	2,01270	0,24427	0,311	0,94471	0,47105	1,76322	0,28622
0,267	0,95903	0,40878	2,00616	0,24520	0,312	0,94436	0,47244	1,75856	0,28715
0,268	0,95873	0,41022	1,99967	0,24613	0,313	0,94401	0,47383	1,75394	0,28809
0,269	0,95842	0,41165	1,99324	0,24706	0,314	0,94366	0,47522	1,74936	0,28903
0,270	0,95812	0,41309	1,98685	0,24799	0,315	0,94331	0,47660	1,74480	0,28996
0,271	0,95781	0,41453	1,98052	0,24892	0,316	0,94295	0,47799	1,74028	0,29090
0,272	0,95750	0,41596	1,97424	0,24985	0,317	0,94260	0,47937	1,73579	0,29183
0,273	0,95720	0,41739	1,96800	0,25078	0,318	0,94224	0,48076	1,73133	0,29277
0,274	0,95689	0,41882	1,96182	0,25171	0,319	0,94189	0,48214	1,72690	0,29371
0,275	0,95658	0,42026	1,95568	0,25264	0,320	0,94153	0,48352	1,72250	0,29464
0,276	0,95626	0,42169	1,94959	0,25357	0,321	0,94117	0,48490	1,71813	0,29558
0,277	0,95595	0,42312	1,94355	0,25450	0,322	0,94081	0,48628	1,71380	0,29652
0,278	0,95564	0,42454	1,93756	0,25543	0,323	0,94045	0,48765	1,70949	0,29745
0,279	0,95532	0,42597	1,93161	0,25636	0,324	0,94009	0,48903	1,70521	0,29839
0,280	0,95501	0,42740	1,92571	0,25729	0,325	0,93973	0,49040	1,70096	0,29933
0,281	0,95469	0,42882	1,91986	0,25822	0,326	0,93937	0,49178	1,69674	0,30027
0,282	0,95437	0,43024	1,91405	0,25915	0,327	0,93900	0,49315	1,69255	0,30120
0,283	0,95406	0,43167	1,90828	0,26008	0,328	0,93864	0,49452	1,68839	0,30214
0,284	0,95374	0,43309	1,90256	0,26102	0,329	0,93827	0,49589	1,68426	0,30308
0,285	0,95342	0,43451	1,89689	0,26195	0,330	0,93790	0,49726	1,68015	0,30402
0,286	0,95309	0,43593	1,89125	0,26288	0,331	0,93753	0,49862	1,67607	0,30496
0,287	0,95277	0,43735	1,88566	0,26381	0,332	0,93717	0,49999	1,67202	0,30590
0,288	0,95245	0,43876	1,88011	0,26474	0,333	0,93680	0,50135	1,66800	0,30683
0,289	0,95212	0,44018	1,87460	0,26568	0,334	0,93642	0,50272	1,66401	0,30777
0,290	0,95180	0,44160	1,86914	0,26661	0,335	0,93605	0,50408	1,66004	0,30871
0,291	0,95147	0,44301	1,86371	0,26754	0,336	0,93568	0,50544	1,65610	0,30965
0,292	0,95114	0,44442	1,85833	0,26847	0,337	0,93530	0,50680	1,65218	0,31059
0,293	0,95081	0,44583	1,85298	0,26941	0,338	0,93493	0,50816	1,64829	0,31153
0,294	0,95048	0,44725	1,84768	0,27034	0,339	0,93455	0,50951	1,64443	0,31247

$\kappa=1.4$

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,340	0,93418	0,51087	1,64059	0,31341	0,385	0,91617	0,57050	1,49120	0,35588
0,341	0,93380	0,51222	1,63678	0,31435	0,386	0,91575	0,57179	1,48834	0,35683
0,342	0,93342	0,51358	1,63299	0,31529	0,387	0,91533	0,57308	1,48549	0,35777
0,343	0,93304	0,51493	1,62923	0,31623	0,388	0,91490	0,57437	1,48266	0,35872
0,344	0,93266	0,51628	1,62549	0,31717	0,389	0,91448	0,57566	1,47985	0,35967
0,345	0,93227	0,51763	1,62178	0,31811	0,390	0,91405	0,57695	1,47705	0,36062
0,346	0,93189	0,51898	1,61809	0,31905	0,391	0,91362	0,57824	1,47427	0,36157
0,347	0,93151	0,52032	1,61442	0,31999	0,392	0,91320	0,57952	1,47151	0,36252
0,348	0,93112	0,52167	1,61078	0,32093	0,393	0,91277	0,58081	1,46876	0,36347
0,349	0,93073	0,52301	1,60716	0,32188	0,394	0,91234	0,58209	1,46604	0,36442
0,350	0,93035	0,52435	1,60357	0,32282	0,395	0,91191	0,58337	1,46332	0,36537
0,351	0,92996	0,52570	1,60000	0,32376	0,396	0,91147	0,58465	1,46063	0,36632
0,352	0,92957	0,52704	1,59645	0,32470	0,397	0,91104	0,58593	1,45795	0,36727
0,353	0,92918	0,52837	1,59293	0,32564	0,398	0,91061	0,58720	1,45528	0,36822
0,354	0,92879	0,52971	1,58943	0,32658	0,399	0,91017	0,58848	1,45263	0,36917
0,355	0,92840	0,53105	1,58595	0,32753	0,400	0,90974	0,58975	1,45000	0,37012
0,356	0,92800	0,53238	1,58249	0,32847	0,401	0,90930	0,59102	1,44738	0,37107
0,357	0,92761	0,53372	1,57906	0,32941	0,402	0,90886	0,59229	1,44478	0,37202
0,358	0,92721	0,53505	1,57565	0,33036	0,403	0,90842	0,59356	1,44219	0,37297
0,359	0,92682	0,53638	1,57226	0,33130	0,404	0,90798	0,59483	1,43962	0,37392
0,360	0,92642	0,53771	1,56889	0,33224	0,405	0,90754	0,59609	1,43707	0,37487
0,361	0,92602	0,53904	1,56554	0,33318	0,406	0,90710	0,59736	1,43453	0,37582
0,362	0,92562	0,54036	1,56222	0,33413	0,407	0,90666	0,59862	1,43200	0,37678
0,363	0,92522	0,54169	1,55891	0,33507	0,408	0,90622	0,59988	1,42949	0,37773
0,364	0,92482	0,54301	1,55563	0,33602	0,409	0,90577	0,60114	1,42699	0,37868
0,365	0,92442	0,54434	1,55236	0,33696	0,410	0,90533	0,60240	1,42451	0,37963
0,366	0,92402	0,54566	1,54912	0,33790	0,411	0,90488	0,60366	1,42205	0,38059
0,367	0,92361	0,54698	1,54590	0,33885	0,412	0,90443	0,60491	1,41959	0,38154
0,368	0,92321	0,54830	1,54270	0,33979	0,413	0,90399	0,60616	1,41715	0,38249
0,369	0,92280	0,54961	1,53951	0,34074	0,414	0,90354	0,60742	1,41473	0,38344
0,370	0,92239	0,55093	1,53635	0,34168	0,415	0,90309	0,60867	1,41232	0,38440
0,371	0,92199	0,55224	1,53321	0,34263	0,416	0,90264	0,60992	1,40992	0,38535
0,372	0,92158	0,55356	1,53009	0,34357	0,417	0,90219	0,61116	1,40754	0,38631
0,373	0,92117	0,55487	1,52698	0,34452	0,418	0,90173	0,61241	1,40517	0,38726
0,374	0,92076	0,55618	1,52390	0,34546	0,419	0,90128	0,61365	1,40282	0,38821
0,375	0,92034	0,55749	1,52083	0,34641	0,420	0,90083	0,61490	1,40048	0,38917
0,376	0,91993	0,55879	1,51779	0,34736	0,421	0,90037	0,61614	1,39815	0,39012
0,377	0,91952	0,56010	1,51476	0,34830	0,422	0,89991	0,61738	1,39583	0,39108
0,378	0,91910	0,56141	1,51175	0,34925	0,423	0,89946	0,61862	1,39353	0,39203
0,379	0,91869	0,56271	1,50876	0,35020	0,424	0,89900	0,61985	1,39125	0,39299
0,380	0,91827	0,56401	1,50579	0,35114	0,425	0,89854	0,62109	1,38897	0,39395
0,381	0,91785	0,56531	1,50284	0,35209	0,426	0,89808	0,62232	1,38671	0,39490
0,382	0,91743	0,56661	1,49990	0,35304	0,427	0,89762	0,62356	1,38446	0,39586
0,383	0,91701	0,56791	1,49698	0,35398	0,428	0,89716	0,62479	1,38222	0,39681
0,384	0,91659	0,56920	1,49408	0,35493	0,429	0,89670	0,62602	1,38000	0,39777

$\kappa=1.4$

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,430	0,89623	0,62724	1,37779	0,39873	0,475	0,87446	0,68082	1,29013	0,44200
0,431	0,89577	0,62847	1,37559	0,39968	0,476	0,87395	0,68197	1,28842	0,44297
0,432	0,89530	0,62969	1,37341	0,40064	0,477	0,87345	0,68312	1,28672	0,44394
0,433	0,89484	0,63092	1,37123	0,40160	0,478	0,87294	0,68427	1,28503	0,44491
0,434	0,89437	0,63214	1,36907	0,40256	0,479	0,87244	0,68542	1,28334	0,44587
0,435	0,89390	0,63336	1,36693	0,40351	0,480	0,87193	0,68656	1,28167	0,44684
0,436	0,89343	0,63458	1,36479	0,40447	0,481	0,87142	0,68771	1,28000	0,44781
0,437	0,89296	0,63579	1,36266	0,40543	0,482	0,87091	0,68885	1,27834	0,44878
0,438	0,89249	0,63701	1,36055	0,40639	0,483	0,87040	0,68999	1,27670	0,44975
0,439	0,89202	0,63822	1,35845	0,40735	0,484	0,86989	0,69113	1,27506	0,45072
0,440	0,89155	0,63943	1,35636	0,40830	0,485	0,86938	0,69227	1,27343	0,45168
0,441	0,89108	0,64064	1,35429	0,40926	0,486	0,86887	0,69340	1,27181	0,45265
0,442	0,89060	0,64185	1,35222	0,41022	0,487	0,86835	0,69453	1,27019	0,45362
0,443	0,89013	0,64306	1,35017	0,41118	0,488	0,86784	0,69567	1,26859	0,45459
0,444	0,88965	0,64426	1,34813	0,41214	0,489	0,86732	0,69680	1,26699	0,45556
0,445	0,88917	0,64547	1,34610	0,41310	0,490	0,86681	0,69792	1,26541	0,45653
0,446	0,88869	0,64667	1,34408	0,41406	0,491	0,86629	0,69905	1,26383	0,45751
0,447	0,88822	0,64787	1,34207	0,41502	0,492	0,86577	0,70018	1,26226	0,45848
0,448	0,88774	0,64907	1,34007	0,41598	0,493	0,86526	0,70130	1,26070	0,45945
0,449	0,88726	0,65027	1,33809	0,41694	0,494	0,86474	0,70242	1,25915	0,46042
0,450	0,88677	0,65146	1,33611	0,41790	0,495	0,86422	0,70354	1,25760	0,46139
0,451	0,88629	0,65266	1,33415	0,41887	0,496	0,86370	0,70466	1,25606	0,46236
0,452	0,88581	0,65385	1,33219	0,41983	0,497	0,86317	0,70577	1,25454	0,46333
0,453	0,88533	0,65504	1,33025	0,42079	0,498	0,86265	0,70689	1,25302	0,46431
0,454	0,88484	0,65623	1,32832	0,42175	0,499	0,86213	0,70800	1,25150	0,46528
0,455	0,88435	0,65742	1,32640	0,42271	0,500	0,86160	0,70911	1,25000	0,46625
0,456	0,88387	0,65860	1,32449	0,42368	0,501	0,86108	0,71022	1,24850	0,46723
0,457	0,88338	0,65979	1,32259	0,42464	0,502	0,86055	0,71133	1,24702	0,46820
0,458	0,88289	0,66097	1,32070	0,42560	0,503	0,86003	0,71243	1,24554	0,46917
0,459	0,88240	0,66215	1,31882	0,42656	0,504	0,85950	0,71354	1,24406	0,47015
0,460	0,88191	0,66333	1,31696	0,42753	0,505	0,85897	0,71464	1,24260	0,47112
0,461	0,88142	0,66451	1,31510	0,42849	0,506	0,85844	0,71574	1,24114	0,47210
0,462	0,88093	0,66568	1,31325	0,42945	0,507	0,85791	0,71684	1,23969	0,47307
0,463	0,88044	0,66686	1,31141	0,43042	0,508	0,85738	0,71793	1,23825	0,47404
0,464	0,87994	0,66803	1,30959	0,43138	0,509	0,85685	0,71903	1,23682	0,47502
0,465	0,87945	0,66920	1,30777	0,43235	0,510	0,85632	0,72012	1,23539	0,47600
0,466	0,87895	0,67037	1,30596	0,43331	0,511	0,85579	0,72121	1,23397	0,47697
0,467	0,87846	0,67154	1,30416	0,43428	0,512	0,85525	0,72230	1,23256	0,47795
0,468	0,87796	0,67270	1,30238	0,43524	0,513	0,85472	0,72339	1,23116	0,47892
0,469	0,87746	0,67387	1,30060	0,43621	0,514	0,85418	0,72448	1,22976	0,47990
0,470	0,87696	0,67503	1,29883	0,43717	0,515	0,85365	0,72556	1,22837	0,48088
0,471	0,87646	0,67619	1,29707	0,43814	0,516	0,85311	0,72664	1,22699	0,48185
0,472	0,87596	0,67735	1,29532	0,43910	0,517	0,85257	0,72772	1,22562	0,48283
0,473	0,87546	0,67851	1,29358	0,44007	0,518	0,85203	0,72880	1,22425	0,48381
0,474	0,87496	0,67966	1,29185	0,44104	0,519	0,85149	0,72988	1,22289	0,48479

κ=1.4

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,800	0,67383	0,95187	1,02500	0,77267	0,845	0,64181	0,97106	1,01422	0,82182
0,801	0,67312	0,95235	1,02472	0,77375	0,846	0,64109	0,97143	1,01402	0,82293
0,802	0,67242	0,95282	1,02444	0,77483	0,847	0,64038	0,97180	1,01382	0,82403
0,803	0,67171	0,95330	1,02417	0,77591	0,848	0,63966	0,97216	1,01362	0,82514
0,804	0,67101	0,95377	1,02389	0,77700	0,849	0,63894	0,97253	1,01343	0,82624
0,805	0,67030	0,95424	1,02362	0,77808	0,850	0,63822	0,97289	1,01324	0,82735
0,806	0,66960	0,95470	1,02335	0,77916	0,851	0,63750	0,97325	1,01304	0,82846
0,807	0,66889	0,95517	1,02308	0,78025	0,852	0,63678	0,97361	1,01285	0,82957
0,808	0,66818	0,95563	1,02281	0,78133	0,853	0,63606	0,97396	1,01267	0,83067
0,809	0,66748	0,95609	1,02255	0,78242	0,854	0,63534	0,97432	1,01248	0,83178
0,810	0,66677	0,95655	1,02228	0,78350	0,855	0,63462	0,97467	1,01230	0,83289
0,811	0,66606	0,95700	1,02202	0,78459	0,856	0,63390	0,97502	1,01211	0,83400
0,812	0,66535	0,95745	1,02176	0,78568	0,857	0,63318	0,97536	1,01193	0,83511
0,813	0,66464	0,95790	1,02151	0,78676	0,858	0,63245	0,97570	1,01175	0,83622
0,814	0,66394	0,95835	1,02125	0,78785	0,859	0,63173	0,97604	1,01157	0,83733
0,815	0,66323	0,95880	1,02100	0,78894	0,860	0,63101	0,97638	1,01140	0,83844
0,816	0,66252	0,95924	1,02075	0,79003	0,861	0,63029	0,97672	1,01122	0,83956
0,817	0,66181	0,95968	1,02050	0,79112	0,862	0,62957	0,97705	1,01105	0,84067
0,818	0,66110	0,96012	1,02025	0,79221	0,863	0,62884	0,97738	1,01087	0,84178
0,819	0,66039	0,96055	1,02000	0,79330	0,864	0,62812	0,97771	1,01070	0,84290
0,820	0,65968	0,96099	1,01976	0,79439	0,865	0,62740	0,97804	1,01053	0,84401
0,821	0,65897	0,96142	1,01951	0,79548	0,866	0,62667	0,97836	1,01037	0,84513
0,822	0,65825	0,96185	1,01927	0,79657	0,867	0,62595	0,97869	1,01020	0,84624
0,823	0,65754	0,96227	1,01903	0,79766	0,868	0,62523	0,97900	1,01004	0,84736
0,824	0,65683	0,96270	1,01880	0,79876	0,869	0,62450	0,97932	1,00987	0,84847
0,825	0,65612	0,96312	1,01856	0,79985	0,870	0,62378	0,97964	1,00971	0,84959
0,826	0,65541	0,96354	1,01833	0,80094	0,871	0,62305	0,97995	1,00955	0,85071
0,827	0,65469	0,96396	1,01809	0,80204	0,872	0,62233	0,98026	1,00939	0,85183
0,828	0,65398	0,96437	1,01786	0,80313	0,873	0,62160	0,98056	1,00924	0,85295
0,829	0,65327	0,96478	1,01764	0,80423	0,874	0,62088	0,98087	1,00908	0,85407
0,830	0,65255	0,96519	1,01741	0,80532	0,875	0,62015	0,98117	1,00893	0,85519
0,831	0,65184	0,96560	1,01718	0,80642	0,876	0,61943	0,98147	1,00878	0,85631
0,832	0,65113	0,96601	1,01696	0,80752	0,877	0,61870	0,98177	1,00863	0,85743
0,833	0,65041	0,96641	1,01674	0,80862	0,878	0,61797	0,98206	1,00848	0,85855
0,834	0,64970	0,96681	1,01652	0,80971	0,879	0,61725	0,98236	1,00833	0,85967
0,835	0,64898	0,96721	1,01630	0,81081	0,880	0,61652	0,98265	1,00818	0,86079
0,836	0,64827	0,96760	1,01609	0,81191	0,881	0,61579	0,98294	1,00804	0,86192
0,837	0,64755	0,96800	1,01587	0,81301	0,882	0,61507	0,98322	1,00789	0,86304
0,838	0,64683	0,96839	1,01566	0,81411	0,883	0,61434	0,98351	1,00775	0,86417
0,839	0,64612	0,96878	1,01545	0,81521	0,884	0,61361	0,98379	1,00761	0,86529
0,840	0,64540	0,96916	1,01524	0,81631	0,885	0,61288	0,98406	1,00747	0,86642
0,841	0,64468	0,96955	1,01503	0,81741	0,886	0,61216	0,98434	1,00733	0,86754
0,842	0,64397	0,96993	1,01482	0,81852	0,887	0,61143	0,98461	1,00720	0,86867
0,843	0,64325	0,97031	1,01462	0,81962	0,888	0,61070	0,98489	1,00706	0,86980
0,844	0,64253	0,97068	1,01442	0,82072	0,889	0,60997	0,98515	1,00693	0,87093

$\kappa=1.4$

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,890	0,60924	0,98542	1,00680	0,87205	0,935	0,57627	0,99491	1,00226	0,92346
0,891	0,60851	0,98568	1,00667	0,87318	0,936	0,57554	0,99507	1,00219	0,92461
0,892	0,60778	0,98595	1,00654	0,87431	0,937	0,57480	0,99522	1,00212	0,92577
0,893	0,60705	0,98621	1,00641	0,87544	0,938	0,57407	0,99537	1,00205	0,92693
0,894	0,60633	0,98646	1,00628	0,87657	0,939	0,57333	0,99552	1,00198	0,92809
0,895	0,60560	0,98672	1,00616	0,87771	0,940	0,57259	0,99567	1,00191	0,92925
0,896	0,60487	0,98697	1,00604	0,87884	0,941	0,57186	0,99581	1,00185	0,93041
0,897	0,60414	0,98722	1,00591	0,87997	0,942	0,57112	0,99595	1,00179	0,93157
0,898	0,60341	0,98747	1,00579	0,88110	0,943	0,57038	0,99609	1,00172	0,93273
0,899	0,60267	0,98771	1,00567	0,88224	0,944	0,56965	0,99623	1,00166	0,93389
0,900	0,60194	0,98795	1,00556	0,88337	0,945	0,56891	0,99636	1,00160	0,93505
0,901	0,60121	0,98819	1,00544	0,88451	0,946	0,56817	0,99649	1,00154	0,93621
0,902	0,60048	0,98843	1,00532	0,88564	0,947	0,56744	0,99662	1,00148	0,93738
0,903	0,59975	0,98866	1,00521	0,88678	0,948	0,56670	0,99675	1,00143	0,93854
0,904	0,59902	0,98890	1,00510	0,88792	0,949	0,56596	0,99687	1,00137	0,93971
0,905	0,59829	0,98913	1,00499	0,88905	0,950	0,56522	0,99699	1,00132	0,94087
0,906	0,59756	0,98936	1,00488	0,89019	0,951	0,56449	0,99711	1,00126	0,94204
0,907	0,59683	0,98958	1,00477	0,89133	0,952	0,56375	0,99723	1,00121	0,94320
0,908	0,59609	0,98980	1,00466	0,89247	0,953	0,56301	0,99734	1,00116	0,94437
0,909	0,59536	0,99002	1,00456	0,89361	0,954	0,56227	0,99745	1,00111	0,94554
0,910	0,59463	0,99024	1,00445	0,89475	0,955	0,56154	0,99756	1,00106	0,94671
0,911	0,59390	0,99046	1,00435	0,89589	0,956	0,56080	0,99767	1,00101	0,94788
0,912	0,59316	0,99067	1,00425	0,89703	0,957	0,56006	0,99778	1,00097	0,94905
0,913	0,59243	0,99088	1,00415	0,89817	0,958	0,55932	0,99788	1,00092	0,95022
0,914	0,59170	0,99109	1,00405	0,89932	0,959	0,55858	0,99798	1,00088	0,95139
0,915	0,59097	0,99130	1,00395	0,90046	0,960	0,55785	0,99808	1,00083	0,95256
0,916	0,59023	0,99150	1,00385	0,90160	0,961	0,55711	0,99817	1,00079	0,95373
0,917	0,58950	0,99170	1,00376	0,90275	0,962	0,55637	0,99826	1,00075	0,95491
0,918	0,58876	0,99190	1,00366	0,90389	0,963	0,55563	0,99835	1,00071	0,95608
0,919	0,58803	0,99210	1,00357	0,90504	0,964	0,55489	0,99844	1,00067	0,95726
0,920	0,58730	0,99229	1,00348	0,90619	0,965	0,55415	0,99853	1,00063	0,95843
0,921	0,58656	0,99248	1,00339	0,90733	0,966	0,55342	0,99861	1,00060	0,95961
0,922	0,58583	0,99267	1,00330	0,90848	0,967	0,55268	0,99869	1,00056	0,96078
0,923	0,58510	0,99286	1,00321	0,90963	0,968	0,55194	0,99877	1,00053	0,96196
0,924	0,58436	0,99304	1,00313	0,91078	0,969	0,55120	0,99884	1,00050	0,96314
0,925	0,58363	0,99323	1,00304	0,91193	0,970	0,55046	0,99892	1,00046	0,96432
0,926	0,58289	0,99341	1,00296	0,91308	0,971	0,54972	0,99899	1,00043	0,96550
0,927	0,58216	0,99358	1,00287	0,91423	0,972	0,54898	0,99906	1,00040	0,96668
0,928	0,58142	0,99376	1,00279	0,91538	0,973	0,54825	0,99912	1,00037	0,96786
0,929	0,58069	0,99393	1,00271	0,91653	0,974	0,54751	0,99919	1,00035	0,96904
0,930	0,57995	0,99410	1,00263	0,91768	0,975	0,54677	0,99925	1,00032	0,97022
0,931	0,57922	0,99427	1,00256	0,91884	0,976	0,54603	0,99931	1,00030	0,97140
0,932	0,57848	0,99443	1,00248	0,91999	0,977	0,54529	0,99936	1,00027	0,97259
0,933	0,57775	0,99460	1,00241	0,92115	0,978	0,54455	0,99942	1,00025	0,97377
0,934	0,57701	0,99476	1,00233	0,92230	0,979	0,54381	0,99947	1,00023	0,97496

$\kappa=1.4$

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,980	0,54307	0,99952	1,00020	0,97614	1,025	0,50980	0,99925	1,00030	1,03023
0,981	0,54233	0,99957	1,00018	0,97733	1,026	0,50906	0,99919	1,00033	1,03145
0,982	0,54159	0,99961	1,00016	0,97852	1,027	0,50832	0,99913	1,00035	1,03267
0,983	0,54085	0,99965	1,00015	0,97970	1,028	0,50758	0,99906	1,00038	1,03389
0,984	0,54011	0,99969	1,00013	0,98089	1,029	0,50684	0,99899	1,00041	1,03511
0,985	0,53937	0,99973	1,00011	0,98208	1,030	0,50610	0,99892	1,00044	1,03633
0,986	0,53864	0,99976	1,00010	0,98327	1,031	0,50536	0,99885	1,00047	1,03755
0,987	0,53790	0,99980	1,00009	0,98446	1,032	0,50462	0,99877	1,00050	1,03878
0,988	0,53716	0,99983	1,00007	0,98565	1,033	0,50389	0,99870	1,00053	1,04000
0,989	0,53642	0,99985	1,00006	0,98684	1,034	0,50315	0,99862	1,00056	1,04123
0,990	0,53568	0,99988	1,00005	0,98804	1,035	0,50241	0,99853	1,00059	1,04245
0,991	0,53494	0,99990	1,00004	0,98923	1,036	0,50167	0,99845	1,00063	1,04368
0,992	0,53420	0,99992	1,00003	0,99042	1,037	0,50093	0,99836	1,00066	1,04491
0,993	0,53346	0,99994	1,00002	0,99162	1,038	0,50019	0,99827	1,00070	1,04613
0,994	0,53272	0,99996	1,00002	0,99281	1,039	0,49946	0,99818	1,00073	1,04736
0,995	0,53198	0,99997	1,00001	0,99401	1,040	0,49872	0,99809	1,00077	1,04859
0,996	0,53124	0,99998	1,00001	0,99521	1,041	0,49798	0,99799	1,00081	1,04982
0,997	0,53050	0,99999	1,00000	0,99640	1,042	0,49724	0,99789	1,00085	1,05105
0,998	0,52976	1,00000	1,00000	0,99760	1,043	0,49650	0,99779	1,00089	1,05229
0,999	0,52902	1,00000	1,00000	0,99880	1,044	0,49576	0,99768	1,00093	1,05352
1,000	0,52828	1,00000	1,00000	1,00000	1,045	0,49503	0,99758	1,00097	1,05475
1,001	0,52754	1,00000	1,00000	1,00120	1,046	0,49429	0,99747	1,00101	1,05599
1,002	0,52680	1,00000	1,00000	1,00240	1,047	0,49355	0,99736	1,00105	1,05722
1,003	0,52606	0,99999	1,00000	1,00360	1,048	0,49281	0,99725	1,00110	1,05846
1,004	0,52532	0,99998	1,00001	1,00481	1,049	0,49208	0,99713	1,00114	1,05969
1,005	0,52458	0,99997	1,00001	1,00601	1,050	0,49134	0,99701	1,00119	1,06093
1,006	0,52384	0,99996	1,00002	1,00721	1,051	0,49060	0,99689	1,00124	1,06217
1,007	0,52310	0,99994	1,00002	1,00842	1,052	0,48986	0,99677	1,00129	1,06341
1,008	0,52237	0,99992	1,00003	1,00962	1,053	0,48913	0,99664	1,00133	1,06465
1,009	0,52163	0,99990	1,00004	1,01083	1,054	0,48839	0,99652	1,00138	1,06589
1,010	0,52089	0,99988	1,00005	1,01204	1,055	0,48765	0,99639	1,00143	1,06713
1,011	0,52015	0,99985	1,00006	1,01324	1,056	0,48692	0,99625	1,00148	1,06837
1,012	0,51941	0,99983	1,00007	1,01445	1,057	0,48618	0,99612	1,00154	1,06962
1,013	0,51867	0,99980	1,00008	1,01566	1,058	0,48544	0,99598	1,00159	1,07086
1,014	0,51793	0,99977	1,00010	1,01687	1,059	0,48471	0,99584	1,00164	1,07210
1,015	0,51719	0,99973	1,00011	1,01808	1,060	0,48397	0,99570	1,00170	1,07335
1,016	0,51645	0,99969	1,00013	1,01929	1,061	0,48323	0,99556	1,00175	1,07460
1,017	0,51571	0,99965	1,00014	1,02051	1,062	0,48250	0,99541	1,00181	1,07584
1,018	0,51497	0,99961	1,00016	1,02172	1,063	0,48176	0,99526	1,00187	1,07709
1,019	0,51423	0,99957	1,00018	1,02293	1,064	0,48102	0,99511	1,00192	1,07834
1,020	0,51349	0,99952	1,00020	1,02415	1,065	0,48029	0,99496	1,00198	1,07959
1,021	0,51275	0,99947	1,00022	1,02536	1,066	0,47955	0,99480	1,00204	1,08084
1,022	0,51201	0,99942	1,00024	1,02658	1,067	0,47882	0,99464	1,00210	1,08209
1,023	0,51127	0,99937	1,00026	1,02779	1,068	0,47808	0,99448	1,00216	1,08334
1,024	0,51054	0,99931	1,00028	1,02901	1,069	0,47735	0,99432	1,00223	1,08460

Таблицы газодинамических функций для газа [14]

 $\kappa=1.33$

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,250	0,96480	0,38657	2,12500	0,23265	0,295	0,95124	0,45132	1,84242	0,27501
0,251	0,96452	0,38803	2,11753	0,23359	0,296	0,95092	0,45274	1,83719	0,27596
0,252	0,96424	0,38949	2,11013	0,23453	0,297	0,95059	0,45415	1,83200	0,27690
0,253	0,96396	0,39095	2,10278	0,23547	0,298	0,95027	0,45556	1,82685	0,27784
0,254	0,96368	0,39241	2,09550	0,23641	0,299	0,94994	0,45697	1,82174	0,27879
0,255	0,96340	0,39387	2,08828	0,23735	0,300	0,94961	0,45838	1,81667	0,27973
0,256	0,96311	0,39533	2,08113	0,23829	0,301	0,94928	0,45979	1,81163	0,28068
0,257	0,96283	0,39678	2,07403	0,23923	0,302	0,94895	0,46119	1,80663	0,28162
0,258	0,96254	0,39824	2,06698	0,24017	0,303	0,94862	0,46260	1,80167	0,28257
0,259	0,96226	0,39969	2,06000	0,24111	0,304	0,94828	0,46400	1,79674	0,28351
0,260	0,96197	0,40114	2,05308	0,24205	0,305	0,94795	0,46541	1,79184	0,28446
0,261	0,96168	0,40260	2,04621	0,24299	0,306	0,94762	0,46681	1,78699	0,28540
0,262	0,96139	0,40405	2,03940	0,24393	0,307	0,94728	0,46821	1,78216	0,28635
0,263	0,96110	0,40550	2,03264	0,24487	0,308	0,94694	0,46961	1,77738	0,28729
0,264	0,96081	0,40695	2,02594	0,24581	0,309	0,94660	0,47101	1,77262	0,28824
0,265	0,96051	0,40839	2,01929	0,24675	0,310	0,94627	0,47240	1,76790	0,28918
0,266	0,96022	0,40984	2,01270	0,24769	0,311	0,94593	0,47380	1,76322	0,29013
0,267	0,95993	0,41129	2,00616	0,24863	0,312	0,94558	0,47519	1,75856	0,29108
0,268	0,95963	0,41273	1,99967	0,24957	0,313	0,94524	0,47659	1,75394	0,29202
0,269	0,95933	0,41417	1,99324	0,25051	0,314	0,94490	0,47798	1,74936	0,29297
0,270	0,95903	0,41562	1,98685	0,25145	0,315	0,94456	0,47937	1,74480	0,29391
0,271	0,95873	0,41706	1,98052	0,25239	0,316	0,94421	0,48076	1,74028	0,29486
0,272	0,95843	0,41850	1,97424	0,25333	0,317	0,94386	0,48215	1,73579	0,29581
0,273	0,95813	0,41994	1,96800	0,25428	0,318	0,94352	0,48354	1,73133	0,29675
0,274	0,95783	0,42138	1,96182	0,25522	0,319	0,94317	0,48492	1,72690	0,29770
0,275	0,95753	0,42281	1,95568	0,25616	0,320	0,94282	0,48631	1,72250	0,29865
0,276	0,95722	0,42425	1,94959	0,25710	0,321	0,94247	0,48769	1,71813	0,29959
0,277	0,95692	0,42568	1,94355	0,25804	0,322	0,94212	0,48907	1,71380	0,30054
0,278	0,95661	0,42712	1,93756	0,25898	0,323	0,94177	0,49045	1,70949	0,30149
0,279	0,95630	0,42855	1,93161	0,25993	0,324	0,94141	0,49183	1,70521	0,30244
0,280	0,95600	0,42998	1,92571	0,26087	0,325	0,94106	0,49321	1,70096	0,30338
0,281	0,95569	0,43141	1,91986	0,26181	0,326	0,94071	0,49459	1,69674	0,30433
0,282	0,95538	0,43284	1,91405	0,26275	0,327	0,94035	0,49597	1,69255	0,30528
0,283	0,95506	0,43427	1,90828	0,26369	0,328	0,93999	0,49734	1,68839	0,30623
0,284	0,95475	0,43570	1,90256	0,26464	0,329	0,93963	0,49871	1,68426	0,30718
0,285	0,95444	0,43712	1,89689	0,26558	0,330	0,93928	0,50009	1,68015	0,30812
0,286	0,95412	0,43855	1,89125	0,26652	0,331	0,93892	0,50146	1,67607	0,30907
0,287	0,95381	0,43997	1,88566	0,26747	0,332	0,93855	0,50283	1,67202	0,31002
0,288	0,95349	0,44140	1,88011	0,26841	0,333	0,93819	0,50420	1,66800	0,31097
0,289	0,95317	0,44282	1,87460	0,26935	0,334	0,93783	0,50556	1,66401	0,31192
0,290	0,95285	0,44424	1,86914	0,27029	0,335	0,93747	0,50693	1,66004	0,31287
0,291	0,95253	0,44566	1,86371	0,27124	0,336	0,93710	0,50829	1,65610	0,31382
0,292	0,95221	0,44708	1,85833	0,27218	0,337	0,93674	0,50966	1,65218	0,31477
0,293	0,95189	0,44849	1,85298	0,27312	0,338	0,93637	0,51102	1,64829	0,31572
0,294	0,95157	0,44991	1,84768	0,27407	0,339	0,93600	0,51238	1,64443	0,31667

$\kappa=1.33$

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,340	0,93563	0,51374	1,64059	0,31761	0,385	0,91804	0,57349	1,49120	0,36050
0,341	0,93526	0,51510	1,63678	0,31856	0,386	0,91763	0,57479	1,48834	0,36146
0,342	0,93489	0,51645	1,63299	0,31951	0,387	0,91722	0,57608	1,48549	0,36241
0,343	0,93452	0,51781	1,62923	0,32046	0,388	0,91680	0,57737	1,48266	0,36337
0,344	0,93415	0,51916	1,62549	0,32141	0,389	0,91639	0,57866	1,47985	0,36433
0,345	0,93377	0,52051	1,62178	0,32237	0,390	0,91597	0,57995	1,47705	0,36528
0,346	0,93340	0,52187	1,61809	0,32332	0,391	0,91555	0,58124	1,47427	0,36624
0,347	0,93302	0,52322	1,61442	0,32427	0,392	0,91514	0,58253	1,47151	0,36720
0,348	0,93265	0,52456	1,61078	0,32522	0,393	0,91472	0,58381	1,46876	0,36816
0,349	0,93227	0,52591	1,60716	0,32617	0,394	0,91430	0,58509	1,46604	0,36911
0,350	0,93189	0,52726	1,60357	0,32712	0,395	0,91388	0,58638	1,46332	0,37007
0,351	0,93151	0,52860	1,60000	0,32807	0,396	0,91345	0,58766	1,46063	0,37103
0,352	0,93113	0,52994	1,59645	0,32902	0,397	0,91303	0,58894	1,45795	0,37199
0,353	0,93075	0,53129	1,59293	0,32997	0,398	0,91261	0,59021	1,45528	0,37295
0,354	0,93037	0,53263	1,58943	0,33092	0,399	0,91218	0,59149	1,45263	0,37391
0,355	0,92999	0,53397	1,58595	0,33188	0,400	0,91176	0,59276	1,45000	0,37486
0,356	0,92960	0,53530	1,58249	0,33283	0,401	0,91133	0,59404	1,44738	0,37582
0,357	0,92922	0,53664	1,57906	0,33378	0,402	0,91090	0,59531	1,44478	0,37678
0,358	0,92883	0,53798	1,57565	0,33473	0,403	0,91048	0,59658	1,44219	0,37774
0,359	0,92844	0,53931	1,57226	0,33568	0,404	0,91005	0,59785	1,43962	0,37870
0,360	0,92805	0,54064	1,56889	0,33664	0,405	0,90962	0,59911	1,43707	0,37966
0,361	0,92767	0,54197	1,56554	0,33759	0,406	0,90919	0,60038	1,43453	0,38062
0,362	0,92728	0,54330	1,56222	0,33854	0,407	0,90875	0,60164	1,43200	0,38158
0,363	0,92688	0,54463	1,55891	0,33950	0,408	0,90832	0,60290	1,42949	0,38254
0,364	0,92649	0,54596	1,55563	0,34045	0,409	0,90789	0,60417	1,42699	0,38350
0,365	0,92610	0,54728	1,55236	0,34140	0,410	0,90745	0,60542	1,42451	0,38446
0,366	0,92571	0,54861	1,54912	0,34236	0,411	0,90702	0,60668	1,42205	0,38542
0,367	0,92531	0,54993	1,54590	0,34331	0,412	0,90658	0,60794	1,41959	0,38638
0,368	0,92492	0,55125	1,54270	0,34426	0,413	0,90614	0,60919	1,41715	0,38734
0,369	0,92452	0,55257	1,53951	0,34522	0,414	0,90570	0,61045	1,41473	0,38831
0,370	0,92412	0,55389	1,53635	0,34617	0,415	0,90527	0,61170	1,41232	0,38927
0,371	0,92372	0,55520	1,53321	0,34712	0,416	0,90482	0,61295	1,40992	0,39023
0,372	0,92332	0,55652	1,53009	0,34808	0,417	0,90438	0,61420	1,40754	0,39119
0,373	0,92292	0,55783	1,52698	0,34903	0,418	0,90394	0,61544	1,40517	0,39215
0,374	0,92252	0,55915	1,52390	0,34999	0,419	0,90350	0,61669	1,40282	0,39311
0,375	0,92212	0,56046	1,52083	0,35094	0,420	0,90306	0,61793	1,40048	0,39408
0,376	0,92172	0,56177	1,51779	0,35190	0,421	0,90261	0,61917	1,39815	0,39504
0,377	0,92131	0,56308	1,51476	0,35285	0,422	0,90217	0,62041	1,39583	0,39600
0,378	0,92091	0,56438	1,51175	0,35381	0,423	0,90172	0,62165	1,39353	0,39696
0,379	0,92050	0,56569	1,50876	0,35476	0,424	0,90127	0,62289	1,39125	0,39793
0,380	0,92009	0,56699	1,50579	0,35572	0,425	0,90082	0,62412	1,38897	0,39889
0,381	0,91969	0,56829	1,50284	0,35668	0,426	0,90038	0,62536	1,38671	0,39985
0,382	0,91928	0,56960	1,49990	0,35763	0,427	0,89993	0,62659	1,38446	0,40082
0,383	0,91887	0,57090	1,49698	0,35859	0,428	0,89947	0,62782	1,38222	0,40178
0,384	0,91846	0,57219	1,49408	0,35954	0,429	0,89902	0,62905	1,38000	0,40274

κ=1,33

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,430	0,89857	0,63028	1,37779	0,40371	0,475	0,87731	0,68382	1,29013	0,44728
0,431	0,89812	0,63151	1,37559	0,40467	0,476	0,87682	0,68497	1,28842	0,44826
0,432	0,89766	0,63273	1,37341	0,40564	0,477	0,87633	0,68612	1,28672	0,44923
0,433	0,89721	0,63395	1,37123	0,40660	0,478	0,87583	0,68726	1,28503	0,45020
0,434	0,89675	0,63517	1,36907	0,40757	0,479	0,87534	0,68841	1,28334	0,45118
0,435	0,89629	0,63639	1,36693	0,40853	0,480	0,87484	0,68955	1,28167	0,45215
0,436	0,89584	0,63761	1,36479	0,40950	0,481	0,87435	0,69070	1,28000	0,45312
0,437	0,89538	0,63883	1,36266	0,41046	0,482	0,87385	0,69184	1,27834	0,45410
0,438	0,89492	0,64004	1,36055	0,41143	0,483	0,87335	0,69297	1,27670	0,45507
0,439	0,89446	0,64126	1,35845	0,41239	0,484	0,87286	0,69411	1,27506	0,45605
0,440	0,89400	0,64247	1,35636	0,41336	0,485	0,87236	0,69525	1,27343	0,45702
0,441	0,89353	0,64368	1,35429	0,41432	0,486	0,87186	0,69638	1,27181	0,45800
0,442	0,89307	0,64488	1,35222	0,41529	0,487	0,87136	0,69751	1,27019	0,45897
0,443	0,89261	0,64609	1,35017	0,41626	0,488	0,87085	0,69864	1,26859	0,45995
0,444	0,89214	0,64730	1,34813	0,41722	0,489	0,87035	0,69977	1,26699	0,46092
0,445	0,89168	0,64850	1,34610	0,41819	0,490	0,86985	0,70089	1,26541	0,46190
0,446	0,89121	0,64970	1,34408	0,41916	0,491	0,86934	0,70202	1,26383	0,46287
0,447	0,89074	0,65090	1,34207	0,42012	0,492	0,86884	0,70314	1,26226	0,46385
0,448	0,89028	0,65210	1,34007	0,42109	0,493	0,86833	0,70426	1,26070	0,46483
0,449	0,88981	0,65330	1,33809	0,42206	0,494	0,86783	0,70538	1,25915	0,46580
0,450	0,88934	0,65449	1,33611	0,42303	0,495	0,86732	0,70650	1,25760	0,46678
0,451	0,88887	0,65568	1,33415	0,42400	0,496	0,86681	0,70761	1,25606	0,46776
0,452	0,88839	0,65688	1,33219	0,42496	0,497	0,86630	0,70873	1,25454	0,46873
0,453	0,88792	0,65807	1,33025	0,42593	0,498	0,86579	0,70984	1,25302	0,46971
0,454	0,88745	0,65925	1,32832	0,42690	0,499	0,86528	0,71095	1,25150	0,47069
0,455	0,88697	0,66044	1,32640	0,42787	0,500	0,86477	0,71206	1,25000	0,47167
0,456	0,88650	0,66163	1,32449	0,42884	0,501	0,86426	0,71316	1,24850	0,47264
0,457	0,88602	0,66281	1,32259	0,42981	0,502	0,86375	0,71427	1,24702	0,47362
0,458	0,88555	0,66399	1,32070	0,43078	0,503	0,86323	0,71537	1,24554	0,47460
0,459	0,88507	0,66517	1,31882	0,43175	0,504	0,86272	0,71647	1,24406	0,47558
0,460	0,88459	0,66635	1,31696	0,43272	0,505	0,86220	0,71757	1,24260	0,47656
0,461	0,88411	0,66753	1,31510	0,43368	0,506	0,86169	0,71867	1,24114	0,47754
0,462	0,88363	0,66870	1,31325	0,43466	0,507	0,86117	0,71976	1,23969	0,47852
0,463	0,88315	0,66987	1,31141	0,43563	0,508	0,86065	0,72086	1,23825	0,47950
0,464	0,88267	0,67104	1,30959	0,43660	0,509	0,86013	0,72195	1,23682	0,48048
0,465	0,88218	0,67221	1,30777	0,43757	0,510	0,85961	0,72304	1,23539	0,48146
0,466	0,88170	0,67338	1,30596	0,43854	0,511	0,85909	0,72413	1,23397	0,48244
0,467	0,88122	0,67455	1,30416	0,43951	0,512	0,85857	0,72521	1,23256	0,48342
0,468	0,88073	0,67571	1,30238	0,44048	0,513	0,85805	0,72630	1,23116	0,48440
0,469	0,88025	0,67688	1,30060	0,44145	0,514	0,85753	0,72738	1,22976	0,48538
0,470	0,87976	0,67804	1,29883	0,44242	0,515	0,85701	0,72846	1,22837	0,48636
0,471	0,87927	0,67920	1,29707	0,44339	0,516	0,85648	0,72954	1,22699	0,48734
0,472	0,87878	0,68035	1,29532	0,44437	0,517	0,85596	0,73062	1,22562	0,48832
0,473	0,87829	0,68151	1,29358	0,44534	0,518	0,85543	0,73169	1,22425	0,48931
0,474	0,87780	0,68266	1,29185	0,44631	0,519	0,85490	0,73277	1,22289	0,49029

κ=1,33

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,800	0,68185	0,95286	1,02500	0,77725	0,845	0,65071	0,97171	1,01422	0,82574
0,801	0,68116	0,95333	1,02472	0,77832	0,846	0,65001	0,97207	1,01402	0,82683
0,802	0,68047	0,95380	1,02444	0,77939	0,847	0,64931	0,97243	1,01382	0,82792
0,803	0,67979	0,95426	1,02417	0,78046	0,848	0,64862	0,97279	1,01362	0,82901
0,804	0,67910	0,95473	1,02389	0,78153	0,849	0,64792	0,97315	1,01343	0,83009
0,805	0,67842	0,95519	1,02362	0,78260	0,850	0,64722	0,97351	1,01324	0,83118
0,806	0,67773	0,95565	1,02335	0,78367	0,851	0,64652	0,97386	1,01304	0,83227
0,807	0,67704	0,95610	1,02308	0,78474	0,852	0,64582	0,97421	1,01285	0,83336
0,808	0,67636	0,95656	1,02281	0,78581	0,853	0,64512	0,97456	1,01267	0,83445
0,809	0,67567	0,95701	1,02255	0,78688	0,854	0,64442	0,97490	1,01248	0,83554
0,810	0,67498	0,95746	1,02228	0,78795	0,855	0,64371	0,97525	1,01230	0,83664
0,811	0,67429	0,95791	1,02202	0,78903	0,856	0,64301	0,97559	1,01211	0,83773
0,812	0,67360	0,95835	1,02176	0,79010	0,857	0,64231	0,97593	1,01193	0,83882
0,813	0,67291	0,95879	1,02151	0,79117	0,858	0,64161	0,97626	1,01175	0,83991
0,814	0,67223	0,95923	1,02125	0,79225	0,859	0,64091	0,97660	1,01157	0,84101
0,815	0,67154	0,95967	1,02100	0,79332	0,860	0,64021	0,97693	1,01140	0,84210
0,816	0,67085	0,96011	1,02075	0,79439	0,861	0,63951	0,97726	1,01122	0,84319
0,817	0,67016	0,96054	1,02050	0,79547	0,862	0,63880	0,97758	1,01105	0,84429
0,818	0,66947	0,96097	1,02025	0,79655	0,863	0,63810	0,97791	1,01087	0,84538
0,819	0,66877	0,96140	1,02000	0,79762	0,864	0,63740	0,97823	1,01070	0,84648
0,820	0,66808	0,96182	1,01976	0,79870	0,865	0,63669	0,97855	1,01053	0,84757
0,821	0,66739	0,96225	1,01951	0,79977	0,866	0,63599	0,97887	1,01037	0,84867
0,822	0,66670	0,96267	1,01927	0,80085	0,867	0,63529	0,97918	1,01020	0,84977
0,823	0,66601	0,96309	1,01903	0,80193	0,868	0,63458	0,97950	1,01004	0,85086
0,824	0,66532	0,96350	1,01880	0,80301	0,869	0,63388	0,97981	1,00987	0,85196
0,825	0,66462	0,96392	1,01856	0,80409	0,870	0,63317	0,98011	1,00971	0,85306
0,826	0,66393	0,96433	1,01833	0,80516	0,871	0,63247	0,98042	1,00955	0,85416
0,827	0,66324	0,96474	1,01809	0,80624	0,872	0,63177	0,98072	1,00939	0,85526
0,828	0,66254	0,96515	1,01786	0,80732	0,873	0,63106	0,98102	1,00924	0,85636
0,829	0,66185	0,96555	1,01764	0,80840	0,874	0,63036	0,98132	1,00908	0,85746
0,830	0,66116	0,96595	1,01741	0,80948	0,875	0,62965	0,98162	1,00893	0,85856
0,831	0,66046	0,96635	1,01718	0,81056	0,876	0,62894	0,98191	1,00878	0,85966
0,832	0,65977	0,96675	1,01696	0,81165	0,877	0,62824	0,98220	1,00863	0,86076
0,833	0,65907	0,96715	1,01674	0,81273	0,878	0,62753	0,98249	1,00848	0,86186
0,834	0,65838	0,96754	1,01652	0,81381	0,879	0,62683	0,98278	1,00833	0,86296
0,835	0,65768	0,96793	1,01630	0,81489	0,880	0,62612	0,98306	1,00818	0,86406
0,836	0,65699	0,96832	1,01609	0,81598	0,881	0,62541	0,98334	1,00804	0,86517
0,837	0,65629	0,96870	1,01587	0,81706	0,882	0,62471	0,98362	1,00789	0,86627
0,838	0,65559	0,96909	1,01566	0,81814	0,883	0,62400	0,98390	1,00775	0,86738
0,839	0,65490	0,96947	1,01545	0,81923	0,884	0,62329	0,98418	1,00761	0,86848
0,840	0,65420	0,96985	1,01524	0,82031	0,885	0,62259	0,98445	1,00747	0,86959
0,841	0,65350	0,97022	1,01503	0,82140	0,886	0,62188	0,98472	1,00733	0,87069
0,842	0,65281	0,97060	1,01482	0,82248	0,887	0,62117	0,98499	1,00720	0,87180
0,843	0,65211	0,97097	1,01462	0,82357	0,888	0,62046	0,98525	1,00706	0,87290
0,844	0,65141	0,97134	1,01442	0,82466	0,889	0,61975	0,98551	1,00693	0,87401

$\kappa=1.33$

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,890	0,61905	0,98578	1,00680	0,87512	0,935	0,58700	0,99505	1,00226	0,92545
0,891	0,61834	0,98603	1,00667	0,87622	0,936	0,58629	0,99520	1,00219	0,92658
0,892	0,61763	0,98629	1,00654	0,87733	0,937	0,58557	0,99535	1,00212	0,92771
0,893	0,61692	0,98654	1,00641	0,87844	0,938	0,58486	0,99550	1,00205	0,92884
0,894	0,61621	0,98679	1,00628	0,87955	0,939	0,58414	0,99564	1,00198	0,92997
0,895	0,61550	0,98704	1,00616	0,88066	0,940	0,58342	0,99578	1,00191	0,93110
0,896	0,61479	0,98729	1,00604	0,88177	0,941	0,58271	0,99592	1,00185	0,93223
0,897	0,61408	0,98753	1,00591	0,88288	0,942	0,58199	0,99606	1,00179	0,93337
0,898	0,61337	0,98777	1,00579	0,88399	0,943	0,58128	0,99619	1,00172	0,93450
0,899	0,61266	0,98801	1,00567	0,88510	0,944	0,58056	0,99633	1,00166	0,93563
0,90	0,61195	0,98825	1,00556	0,88622	0,945	0,57985	0,99646	1,00160	0,93677
0,901	0,61124	0,98848	1,00544	0,88733	0,946	0,57913	0,99658	1,00154	0,93790
0,902	0,61053	0,98872	1,00532	0,88844	0,947	0,57841	0,99671	1,00148	0,93904
0,903	0,60982	0,98895	1,00521	0,88955	0,948	0,57770	0,99683	1,00143	0,94018
0,904	0,60911	0,98917	1,00510	0,89067	0,949	0,57698	0,99695	1,00137	0,94131
0,905	0,60840	0,98940	1,00499	0,89178	0,950	0,57626	0,99707	1,00132	0,94245
0,906	0,60769	0,98962	1,00488	0,89290	0,951	0,57555	0,99719	1,00126	0,94359
0,907	0,60698	0,98984	1,00477	0,89401	0,952	0,57483	0,99730	1,00121	0,94473
0,908	0,60626	0,99006	1,00466	0,89513	0,953	0,57411	0,99741	1,00116	0,94586
0,909	0,60555	0,99028	1,00456	0,89625	0,954	0,57340	0,99752	1,00111	0,94700
0,910	0,60484	0,99049	1,00445	0,89736	0,955	0,57268	0,99763	1,00106	0,94814
0,911	0,60413	0,99070	1,00435	0,89848	0,956	0,57196	0,99773	1,00101	0,94928
0,912	0,60342	0,99091	1,00425	0,89960	0,957	0,57125	0,99784	1,00097	0,95042
0,913	0,60270	0,99111	1,00415	0,90072	0,958	0,57053	0,99794	1,00092	0,95157
0,914	0,60199	0,99132	1,00405	0,90184	0,959	0,56981	0,99803	1,00088	0,95271
0,915	0,60128	0,99152	1,00395	0,90295	0,960	0,56909	0,99813	1,00083	0,95385
0,916	0,60057	0,99172	1,00385	0,90407	0,961	0,56838	0,99822	1,00079	0,95499
0,917	0,59985	0,99191	1,00376	0,90519	0,962	0,56766	0,99831	1,00075	0,95614
0,918	0,59914	0,99211	1,00366	0,90632	0,963	0,56694	0,99840	1,00071	0,95728
0,919	0,59843	0,99230	1,00357	0,90744	0,964	0,56622	0,99848	1,00067	0,95843
0,920	0,59772	0,99249	1,00348	0,90856	0,965	0,56551	0,99857	1,00063	0,95957
0,921	0,59700	0,99268	1,00339	0,90968	0,966	0,56479	0,99865	1,00060	0,96072
0,922	0,59629	0,99286	1,00330	0,91080	0,967	0,56407	0,99873	1,00056	0,96186
0,923	0,59557	0,99304	1,00321	0,91193	0,968	0,56335	0,99880	1,00053	0,96301
0,924	0,59486	0,99322	1,00313	0,91305	0,969	0,56263	0,99888	1,00050	0,96416
0,925	0,59415	0,99340	1,00304	0,91418	0,970	0,56192	0,99895	1,00046	0,96530
0,926	0,59343	0,99358	1,00296	0,91530	0,971	0,56120	0,99902	1,00043	0,96645
0,927	0,59272	0,99375	1,00287	0,91643	0,972	0,56048	0,99908	1,00040	0,96760
0,928	0,59200	0,99392	1,00279	0,91755	0,973	0,55976	0,99915	1,00037	0,96875
0,929	0,59129	0,99409	1,00271	0,91868	0,974	0,55904	0,99921	1,00035	0,96990
0,930	0,59058	0,99425	1,00263	0,91980	0,975	0,55833	0,99927	1,00032	0,97105
0,931	0,58986	0,99442	1,00256	0,92093	0,976	0,55761	0,99933	1,00030	0,97220
0,932	0,58915	0,99458	1,00248	0,92206	0,977	0,55689	0,99938	1,00027	0,97336
0,933	0,58843	0,99474	1,00241	0,92319	0,978	0,55617	0,99943	1,00025	0,97451
0,934	0,58772	0,99489	1,00233	0,92432	0,979	0,55545	0,99949	1,00023	0,97566

$\kappa=1,33$

λ	π	q	Z	M	λ	π	q	Z	M
0,980	0,55474	0,99953	1,00020	0,97681	1,025	0,52240	0,99927	1,00030	1,02931
0,981	0,55402	0,99958	1,00018	0,97797	1,026	0,52168	0,99921	1,00033	1,03049
0,982	0,55330	0,99962	1,00016	0,97912	1,027	0,52097	0,99915	1,00035	1,03167
0,983	0,55258	0,99966	1,00015	0,98028	1,028	0,52025	0,99909	1,00038	1,03285
0,984	0,55186	0,99970	1,00013	0,98143	1,029	0,51953	0,99902	1,00041	1,03403
0,985	0,55114	0,99974	1,00011	0,98259	1,030	0,51881	0,99896	1,00044	1,03521
0,986	0,55042	0,99977	1,00010	0,98375	1,031	0,51809	0,99888	1,00047	1,03640
0,987	0,54971	0,99980	1,00009	0,98490	1,032	0,51738	0,99881	1,00050	1,03758
0,988	0,54899	0,99983	1,00007	0,98606	1,033	0,51666	0,99874	1,00053	1,03877
0,989	0,54827	0,99986	1,00006	0,98722	1,034	0,51594	0,99866	1,00056	1,03995
0,990	0,54755	0,99988	1,00005	0,98838	1,035	0,51522	0,99858	1,00059	1,04114
0,991	0,54683	0,99991	1,00004	0,98954	1,036	0,51450	0,99850	1,00063	1,04232
0,992	0,54611	0,99993	1,00003	0,99070	1,037	0,51379	0,99841	1,00066	1,04351
0,993	0,54539	0,99994	1,00002	0,99186	1,038	0,51307	0,99833	1,00070	1,04470
0,994	0,54468	0,99996	1,00002	0,99302	1,039	0,51235	0,99824	1,00073	1,04588
0,995	0,54396	0,99997	1,00001	0,99418	1,040	0,51163	0,99815	1,00077	1,04707
0,996	0,54324	0,99998	1,00001	0,99534	1,041	0,51092	0,99805	1,00081	1,04826
0,997	0,54252	0,99999	1,00000	0,99651	1,042	0,51020	0,99796	1,00085	1,04945
0,998	0,54180	1,00000	1,00000	0,99767	1,043	0,50948	0,99786	1,00089	1,05064
0,999	0,54108	1,00000	1,00000	0,99884	1,044	0,50877	0,99776	1,00093	1,05183
1,000	0,54036	1,00000	1,00000	1,00000	1,045	0,50805	0,99765	1,00097	1,05303
1,001	0,53965	1,00000	1,00000	1,00117	1,046	0,50733	0,99755	1,00101	1,05422
1,002	0,53893	1,00000	1,00000	1,00233	1,047	0,50661	0,99744	1,00105	1,05541
1,003	0,53821	0,99999	1,00000	1,00350	1,048	0,50590	0,99733	1,00110	1,05660
1,004	0,53749	0,99998	1,00001	1,00466	1,049	0,50518	0,99722	1,00114	1,05780
1,005	0,53677	0,99997	1,00001	1,00583	1,050	0,50446	0,99711	1,00119	1,05899
1,006	0,53605	0,99996	1,00002	1,00700	1,051	0,50375	0,99699	1,00124	1,06019
1,007	0,53533	0,99994	1,00002	1,00817	1,052	0,50303	0,99687	1,00129	1,06138
1,008	0,53461	0,99993	1,00003	1,00934	1,053	0,50232	0,99675	1,00133	1,06258
1,009	0,53390	0,99991	1,00004	1,01051	1,054	0,50160	0,99663	1,00138	1,06378
1,010	0,53318	0,99988	1,00005	1,01168	1,055	0,50088	0,99650	1,00143	1,06498
1,011	0,53246	0,99986	1,00006	1,01285	1,056	0,50017	0,99637	1,00148	1,06618
1,012	0,53174	0,99983	1,00007	1,01402	1,057	0,49945	0,99624	1,00154	1,06738
1,013	0,53102	0,99980	1,00008	1,01519	1,058	0,49873	0,99611	1,00159	1,06858
1,014	0,53030	0,99977	1,00010	1,01637	1,059	0,49802	0,99598	1,00164	1,06978
1,015	0,52958	0,99974	1,00011	1,01754	1,060	0,49730	0,99584	1,00170	1,07098
1,016	0,52887	0,99970	1,00013	1,01871	1,061	0,49659	0,99570	1,00175	1,07218
1,017	0,52815	0,99966	1,00014	1,01989	1,062	0,49587	0,99556	1,00181	1,07338
1,018	0,52743	0,99962	1,00016	1,02106	1,063	0,49516	0,99541	1,00187	1,07458
1,019	0,52671	0,99958	1,00018	1,02224	1,064	0,49444	0,99527	1,00192	1,07579
1,020	0,52599	0,99954	1,00020	1,02342	1,065	0,49373	0,99512	1,00198	1,07699
1,021	0,52527	0,99949	1,00022	1,02459	1,066	0,49301	0,99497	1,00204	1,07820
1,022	0,52456	0,99944	1,00024	1,02577	1,067	0,49230	0,99482	1,00210	1,07940
1,023	0,52384	0,99939	1,00026	1,02695	1,068	0,49158	0,99466	1,00216	1,08061
1,024	0,52312	0,99933	1,00028	1,02813	1,069	0,49087	0,99450	1,00223	1,08182

Учебное издание

Григорьев Владимир Алексеевич

**ПРОЕКТНЫЙ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ
АВИАЦИОННЫХ ГТД ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Учебное пособие

Редактор Т. К. К р е т и н и н а

Корректор Т. И. Щ е л о к о в а

Лицензия ЛР № 020301 от 30.12.96 г.

Подписано в печать 15.07.2001 г. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,99. Усл. кр.-отт. 10,12. Уч.-изд.л. 10,75.

Тираж 300 экз. Заказ **60** . Арт. С - 7/2001.

Самарский государственный аэрокосмический
университет им. академика С. П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.