Министерство науки и высшего образования Российской Федерации федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» Институт энергетики

Высшая школа энергетического машиностроения

Дисциплина: «Энергетические установки».

Тема курсовой работы: Газотурбинная установка мощностью 65 MBт.

Руководитель курсовой работы ______Фёдоров А.А. Задание принял к исполнению ______ Дмитриев А.К.

Санкт-Петербург 2024г.

Содержание

| 1 | Вве | дение | 3 |
|---|-----|--|----|
| 2 | Тер | модинамический и газодинамический расчет | 4 |
| | 2.1 | Исходные данные | 4 |
| | 2.2 | Методы и пример расчета параметров рабочего процесса в | |
| | | характерных сечениях проточной части ГТУ. Определение | |
| | | основных характеристик ГТУ | 5 |
| 3 | Bap | иантный расчет ГТУ на ЭВМ | 11 |
| | 3.1 | Результаты расчета | 11 |
| | 3.2 | Выбор степени повышения давления в компрессоре и начальной | |
| | | температуры газа перед турбиной | 13 |
| 4 | При | ближённый рассчет осевого компрессора | 14 |
| 5 | Pac | чет турбины | 25 |
| | 5.1 | Исходные данные для расчета | 25 |
| | 5.2 | Предварительный расчет турбины | 26 |
| 6 | Зак | лючение | 29 |
| 7 | Лит | ература | 30 |
| 8 | При | ложение 1 | 31 |

1. Введение

Принцип действия ГТУ сводится к следующему. Из атмосферы воздух забирают компрессором, после чего при повышенном давлении его подают в камеру сгорания, куда одновременно подводят жидкое топливо топливным насосом или газообразное топливо от газового компрессора. В камере сгорания воздух разделяется на два потока: один поток в количестве, необходимом для сгорания топлива, поступает внутрь жаровой трубы; второй – обтекает жаровую трубу снаружи и подмешивается к продуктам сгорания для понижения их температуры. Процесс сгорания в камере происходит при почти постоянном давлении. Получающийся после смешения газ поступает в газовую турбину, в которой, расширяясь, совершает работу, а затем выбрасывается в атмосферу. В отличие от паротурбинной установки полезная мощность ГТУ составляет только 30-50% мощности турбины. Долю полезной мощности можно увеличить, повысив температуру газа перед турбиной или снизить температуру воздуха, засасываемого компрессором. В первом случае возрастает работа расширения газа в турбине, во втором – уменьшается работа, затрачиваемая на сжатие воздуха в компрессоре. Оба способа приводят к увеличению доли полезной мощности. Полезная мощность ГТУ также зависит от аэродинамических показателей проточных частей турбины и компрессора: чем меньше аэродинамические потери в турбине и компрессоре, тем большая доля мощности газовой турбины становится полезной. Эффективность ГТУ в сравнении с другими тепловыми двигателями обнаруживается только при высокой температуре газа и высокой экономичности турбины и компрессора. Поэтому простой по принципу действия газотурбинный двигатель стали применяется в промышленности позднее других тепловых двигателей, т.е после того, как был достигнут прогресс в технологии получения жаропрочных материалов и накоплены необходимые знания в области аэродинамики турбомашин. [1]

2. Термодинамический и газодинамический расчет

2.1. Исходные данные

- 1. Полезная мощность $N=65~{
 m MBr}$
- 2. Температура газа перед турбиной $T_3^* = 1643.15 \text{ K}$
- 3. Параметры наружного воздуха $P_H=0.1013~{
 m M\Pi a}; T_H=288~{
 m K}$
- 4. Топливо природный газ
- 5. Прототип установки ГТЭ-65
- 6. Частота вращения вала $n = 5441 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$

Примем два упрощения при расчете в разделе 2:

- 1. Охлаждение турбины не учитывается, расход охладителя равен нулю;
- 2. Не учитывается зависимость теплоемкости газа от температуры рабочего тела, принимается по рекомендациям пособия [1].

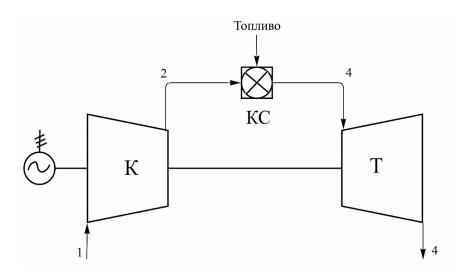


Рис. 2.1. Тепловая схема одновальной ГТУ: К-компрессор; КС-камера сгорания; ГТ-газовая турбина.

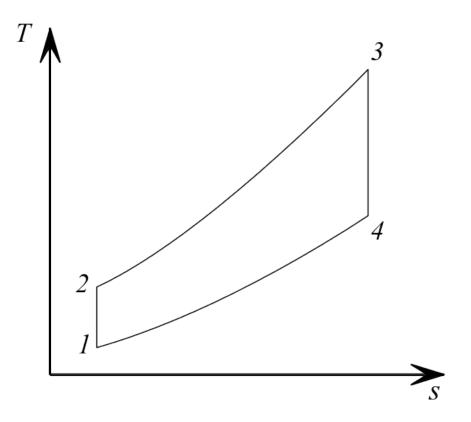


Рис. 2.2. Цикл одновальной ГТУ простого типа в Т-s-диаграмме: 1-2 – адиабатное сжатие в компрессоре, 2-3 – изобарный подвод теплоты в камере сгорания, 3-4 – адиабатное расширение продуктов сгорания на лопатках газовой турбины, 4-1 – изобарный отвод теплоты от продуктов сгорания в атмосферу.

2.2. Методы и пример расчета параметров рабочего процесса в характерных сечениях проточной части ГТУ. Определение основных характеристик ГТУ

Расчет производится по методике из пособия [1] (с.77-78)

Зададимся параметром степени повышения давления $\pi_{\kappa}^* = \frac{P_2^*}{P_1^*} = 18.$

Газовая постоянная воздуха: $R_{\text{в}}=0.287~\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$

Удельная изобарная теплоёмкость воздуха: $c_{p_{\rm B}}=1.03~{
m \kappa Дж \over \kappa \Gamma \cdot K}$

Коэффициент Пуассона воздуха: $k_{\rm B}=\frac{c_{p_{\rm B}}}{c_{p_{\rm B}}-R_{\rm B}}=\frac{1.03}{1.03-0.287}=1.386$ Принимаем коэффиционт тогот

Принимаем коэффициент потерь полного давления во входном устройстве ГТУ $\sigma_{\rm BX}^*=0.987;$

Давление воздуха перед компрессором:

$$P_1^* = \sigma_{\text{BX}}^* \cdot P_{\text{H}} = 0.987 \cdot 0.1013 = 0.1 \text{ M}\Pi\text{a};$$
 (1)

Температура воздуха перед компрессором:

$$T_1^* = T_H = 288 \text{ K};$$
 (2)

Давление воздуха за компрессором:

$$P_2^* = \pi_{\kappa}^* \cdot P_1^* = 0.1 \cdot 18 = 1.8 \text{ M}\Pi a;$$
 (3)

Определим T_2^* (температуру воздуха за компрессором):

$$T_2^* = T_{\rm H}^* \cdot (\pi_{\rm K}^*)^{\frac{k_{\rm B}-1}{k_{\rm B}}} = 288 \cdot 18^{0.279} = 644.41 \text{ K};$$
 (4)

Работа, соответствующая изоэнтропийному перепаду в компрессоре:

$$H_{\text{ok}}^* = C_{p_{\text{B}}} \cdot T_1^* \cdot \left[(\pi_{\text{K}}^*)^{\frac{k_{\text{B}} - 1}{k_{\text{B}}}} - 1 \right] = 1.03 \cdot 288 \cdot \left[18^{0.279} - 1 \right] = 367.103 \, \frac{\text{K/J/K}}{\text{K}\Gamma}; (5)$$

 $\eta_{\rm K\,ag}=0.91$ - политропный к.п.д. компрессора, его выбор для расчета обусловлен тем, что он мало зависит от степени повышения давления в компрессоре $\pi_{\rm K}^*$.

Полезная работа в компрессоре:

$$H_{\kappa} = \frac{H_{\text{ok}}^*}{\eta_{\kappa \text{ all}}} = \frac{367.103}{0.91} = 403.41 \, \frac{\kappa \text{Дж}}{\kappa \text{Г}};$$
 (6)

Принимаем коэффициент потерь полного давления в камере сгорания $\sigma_{\rm кc}^* = 0.96;$

Давление газа перед турбиной:

$$P_3^* = P_2^* \cdot \sigma_{\kappa c}^* = \pi_{\kappa}^* \cdot P_1^* \cdot \sigma_{\kappa c}^* = 18 \cdot 0.1 \cdot 0.96 = 1.728 \text{ M}\Pi a;$$
 (7)

Принимаем коэффициент потерь полного давления в выходном устройстве ГТУ $\sigma_{\text{вых}}^* = 0.985;$

Давление газа за турбиной:

$$P_4^* = \frac{P_{\rm H}^*}{\sigma_{\rm BMX}^*} = \frac{0.1013}{0.985} = 0.1013 \,\mathrm{M}\Pi\mathrm{a};$$
 (8)

Степень расширения газа в турбине:

$$\pi_{\rm T}^* = \frac{P_3^*}{P_4^*} = \frac{1.728}{1.8} = 16.8;$$
(9)

 $k_{\scriptscriptstyle \Gamma} = 1.33$ - показатель изоэнтропы газа;

 $R_{\mbox{\tiny Γ}} = 0.287 \, rac{\mbox{кДж}}{\mbox{кг} \cdot \mbox{K}}$ - индивидуальная газовая постоянная;

 $c_{p_{\rm r}}=1.16~{{
m K} \over {
m K} \Gamma \cdot {
m K}}$ - удельная изобарная теплоёмкость газа;

Работа, соответствующая изоэнтропийному перепаду в турбине:

$$H_{\text{ot}}^* = c_{p_{\text{r}}} \cdot T_3^* \cdot \left[1 - (\pi_{\text{T}}^*)^{-\frac{k_{\text{r}} - 1}{k_{\text{r}}}} \right] = 1.16 \cdot 1643.15 \cdot \left[1 - (16.8)^{-0.248} \right] = 1051.333 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$
(10)

Принимаем политропный кпд турбины $\eta_{\text{т пол}} = 0.87$

Полезная работа в турбине:

$$H_{\rm T} = H_{\rm or}^* \cdot \eta_{\rm T \, пол} = 1051.333 \cdot 0.87 = 834.824 \, \frac{\kappa \text{Дж}}{\kappa \Gamma};$$
 (11)

Температура газа за турбиной T_4^* определяется как:

$$T_4^* = T_3^* \cdot (\pi_T^*)^{-\frac{k_r - 1}{k_r}} = 1643.15 \cdot (16.8)^{-0.248} = 815.936 \text{ K};$$
 (12)

Примем коэффициенты механических потерь в турбине и компрессоре $\eta_{\rm MT} = 0.995; \, \eta_{\rm MK} = 0.995;$

Расход воздуха через компрессор:

$$G_{\rm B} = \frac{N_e}{H_{\rm T} \cdot \eta_{\rm MT} - \frac{H_{\rm K}}{\eta_{\rm MK}}} = \frac{65 \cdot 10^6}{834.824 \cdot 10^3 \cdot 0.995 - \frac{403.41 \cdot 10^3}{0.995}} = 152.864 \, \frac{\rm K\Gamma}{\rm c};$$
(13)

Теплота с учетом потерь в камере сгорания:

$$Q_1' = c_{p_r} \cdot (T_3^* - T_2^*) = 1.16 \cdot (1643.15 - 644.41) = 1159 \frac{\kappa \text{Дж}}{\kappa \text{Г}}; \qquad (14)$$

Примем КПД камеры сгорания $\eta_{\rm кc} = 0.98$;

Расход теплоты:

$$Q_1 = \frac{Q_1'}{\eta_{\text{KC}}} = \frac{1158.538}{0.98} = 1182.181 \, \frac{\kappa \text{Дж}}{\text{K}\Gamma}; \tag{15}$$

Эффективный КПД ГТУ:

$$\eta_{\rm e} = \frac{H_{\rm \scriptscriptstyle T} \cdot \eta_{\rm \scriptscriptstyle MT} - \frac{H_{\rm \scriptscriptstyle K}}{\eta_{\rm \scriptscriptstyle MK}}}{Q_1} = \frac{834.824 \cdot 10^3 \cdot 0.995 - \frac{403.41 \cdot 10^3}{0.995}}{1182.181 \cdot 10^3} = 0.36; \qquad (16)$$

Коэффициент полезной работы ГТУ:

$$\varphi = \frac{H_{\text{\tiny T}} \cdot \eta_{\text{\tiny MT}} - \frac{H_{\text{\tiny K}}}{\eta_{\text{\tiny MK}}}}{H_{\text{\tiny T}} \cdot \eta_{\text{\tiny MT}}} = \frac{834.824 \cdot 10^3 \cdot 0.995 - \frac{403.41 \cdot 10^3}{0.995}}{834.824 \cdot 10^3 \cdot 0.995} = 0.512; \quad (17)$$

Относительное количество воздуха, содержащегося в продуктах сгорания за камерой сгорания:

$$\begin{split} g_{\mathrm{B}} &= \frac{Q_{\mathrm{p}}^{\mathrm{H}} \cdot \eta_{\mathrm{KC}} + h_{\mathrm{T}} + L_{0} \cdot c_{p_{\mathrm{B}}} \cdot t_{2}^{*} - (L_{0} + 1) \cdot (c_{p_{\mathrm{r}}})_{\alpha = 1} \cdot t_{3}}{c_{p_{\mathrm{B}}} \cdot (t_{3}^{*} - t_{2}^{*})} = \\ &= \frac{44300 \cdot 0.98 + 0 + 15 \cdot 1.03 \cdot 1370.0 - (15 + 1) \cdot 1.2 \cdot 371.26}{1.2 \cdot (371.26 - 1370.0)} = 47.76, \end{split}$$

где $Q_{\rm p}^{\rm H}=44300~{\rm K/\!\!\!\!\!/}{\rm K}$ - низшая теплота сгорания топлива; $h_{\rm T}=0$ - Энтальпия топлива (пренебрежимо мала); $(c_{p_{\rm r}})_{\alpha=1}=1.2~{\rm K/\!\!\!\!\!/}{\rm K}$ - Удельная теплоемкость газа при $\alpha=1$; $L_0=15~{\rm K\Gamma_{BO3J}\over {\rm K\Gamma_{TO\Pi}}}$ - Стехиометрический коэффициент.

Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания:

$$\alpha = \frac{L_0 + g_{\text{B}}}{L_0} = \frac{15 + 1}{15} = 4.184;$$

Относительный расход топлива:

$$g_{\text{\tiny T}} = \frac{1}{\alpha \cdot L_0} = \frac{1}{4.184 \cdot Lo} = 0.016;$$

Допустимая температура для стали лопаток: $T_{\rm ct} = 1100~{\rm K};$

Расход воздуха для охлаждения статора:

$$g_{\text{ox}_{\text{I}}}^{\text{c}} = 0.01 + 0.25 \cdot 10^{-4} \cdot (T_3^* - T_{\text{ct}}) = 0.01 + 0.25 \cdot 10^{-4} \cdot (1643.15 - 1100) = 0.024;$$

Расход воздуха для охлаждения ротора:

$$g_{\text{OXJ}}^{\text{p}} = 0.08 + 0.22 \cdot 10^{-4} \cdot (T_3^* - T_{\text{CT}}) = 0.08 + 0.22 \cdot 10^{-4} \cdot (1643.15 - 1100) = 0.092;$$

Общий расход воздуха для охлаждения турбины:

$$g_{\text{OXJI}} = \sigma_{\text{YT}} \cdot (g_{\text{OXJI}}^{\text{c}} + g_{\text{OXJI}}^{\text{p}}) = 1.15 \cdot (0.024 + 0.092) = 0.133;$$

Относительный расход охлаждающего воздуха по отншению к расходу воздуха через компрессор:

$$g'_{\text{охл}} = \frac{(1+g_{\text{T}}) \cdot g_{\text{охл}}}{1+(1+g_{\text{T}}) \cdot g_{\text{охл}}} = \frac{(1+0.016) \cdot 0.133}{1+(1+0.016) \cdot 0.133} = 0.119$$

Расход топлива:

$$G_{\text{\tiny T}} = g_{\text{\tiny T}} \cdot (1 - g'_{\text{\tiny OXJ}}) \cdot G_{\text{\tiny B}} = 0.016 \cdot (1 - 0.119) \cdot 152.864 = 2.146 \frac{\text{K}\Gamma}{\text{K}}$$

Коэффициент располагаемой мощности:

$$\Omega_{\text{pac}} = H_{\text{or}}^* \cdot \frac{G_{\text{B}}}{G_{\text{T}}} = 1051.333 \cdot \frac{152.864}{2.146} = 6.835 \frac{\text{кДж}}{\text{K}}$$
(18)

Удельная эффективная работа ГТУ:

$$\begin{split} H_e &= (1+g_{\scriptscriptstyle T}) \cdot (1-g'_{\scriptscriptstyle {\rm OXJ}}) \cdot H_{\rm T} \cdot \eta_{\scriptscriptstyle {\rm TM}} - \frac{H_{\scriptscriptstyle {\rm K}}}{\eta_{\scriptscriptstyle {\rm MK}}} = \\ &= (1+0.016) \cdot (1-0.119) \cdot 834.824 \cdot 0.995 - \frac{403.41}{0.995} = 342.136 \, \frac{{\rm кДж}}{{\rm K}} \end{split}$$

Коэффициент полезной мощности:

$$\Omega_{\text{пол}} = H_e^* \cdot \frac{G_{\text{\tiny B}} \cdot 10^{-6}}{G_{\text{\tiny T}}} = 342.136 \cdot \frac{152.864}{2.146} = 0.024 \frac{\text{кДж}}{\text{K}}$$
(19)

3. Вариантный расчет ГТУ на ЭВМ

Необходимо провести расчет параметров рабочего процесса в характерных сечениях проточной части и основных характеристик ГТУ при различных значениях степени повышения давления и температуры газа перед турбиной, по результатам расчета построить графики: $H_e, \eta_e, \varphi = f(\pi_K^*, T_3^*)$

3.1. Результаты расчета

Полные результаты рассчета смотреть в Приложении 1.

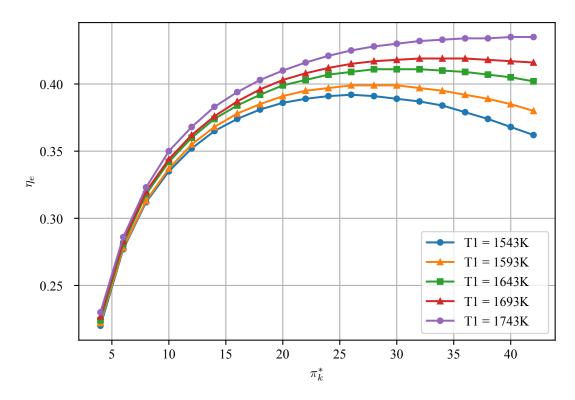


Рис. 3.1. Зависимость эффективного КПД ГТУ от степени повышения давления в компрессоре, при различных значениях температуры.

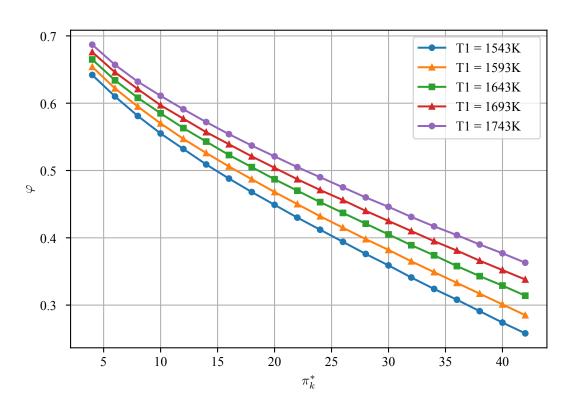


Рис. 3.2. Зависимость коэффициента полезной работы ГТУ от степени повышения давления в компрессоре, при различных значениях температуры.

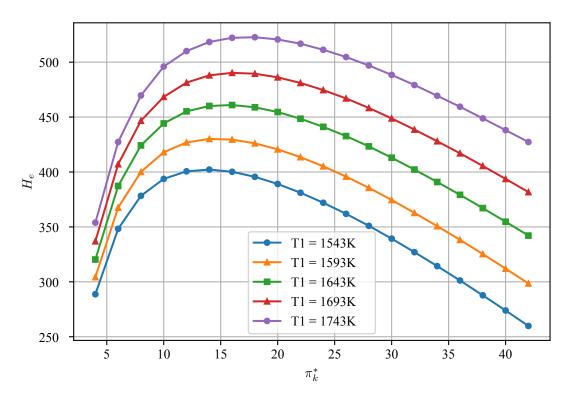


Рис. 3.3. Зависимость эффективной удельной работы ГТУ от степени повышения давления в компрессоре, при различных значениях температуры.

3.2. Выбор степени повышения давления в компрессоре и начальной температуры газа перед турбиной

Максимальный КПД установки достигается при максимальной температуре газа перед турбиной — 1743 К. Жаростойкость материала лопаток турбины не позволяет выдерживать такую температуру, поэтому в качестве входной температуры на турбину выберем 1693 К. Экстремум графика зависимости эффективного КПД ГТУ от степени повышения давления в компрессоре наблюдается при $\pi_{\kappa}^*=34$ и $\eta_e=0.419$. Выбор такой степени сжатия неоправдан, т. к. при нём слишком низкие значения эффективной удельной работы и коэффициента полезной работы. Экстремум графика зависимости эффективной удельной работы ГТУ от степени повышения давления в компрессоре наблюдается при $\pi_{\kappa}^*=16$, значение эффективного КПД ГТУ при этом $\eta_e=0.314$. Коэффициент полезной работы ГТУ с увеличением монотонно уменьшается, однако уменьшение с целью увеличения нецелесообразно, поскольку величина коэффициента полезной работы ГТУ увеличивается незначительно, при этом снижается величина эффективной удельной работы.

Таким образом, для дальнейших расчетов принимаем:

$$T_3^* = 1693 \text{ K}; \ \pi_{\text{K}}^* = 16$$

4. Приближённый рассчет осевого компрессора

Расчет производится в соответствии со схематическим продольным разрезом на рис.4.1. по методике из пособия [2].

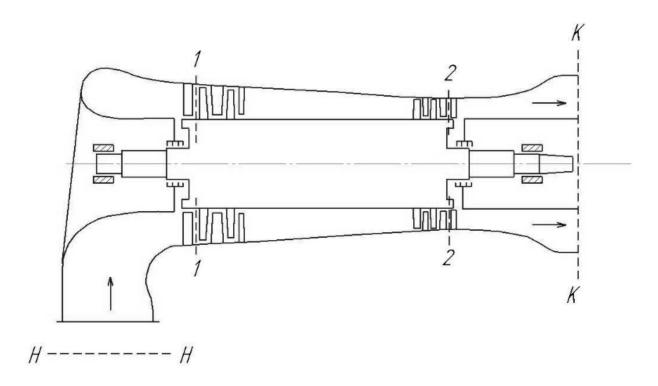


Рис. 4.1. Схема многоступенчатого осевого компрессора.

При приближенном расчете осевого компрессора основными расчетными сечениями являются: сечение 1-1 на входе в первую ступень и сечение 2-2 на выходе из последней ступени (рис.4.2). Определим параметры P и T в трех сечениях.

Давление воздуха в сечении 1-1:

$$P_1^* = \sigma_{\text{BX}} \cdot P_{\text{H}} = 0.99 \cdot 0.1013 = 0.1 \text{ M}\Pi a;$$
 (20)

где коэффициент уменьшения полного давления во входной части компрессора $\sigma_{\rm BX}^* = 0.99.$

Температура в сечении 1-1:

$$T_1^* = T_{\rm H} = 288 \text{ K};$$
 (21)

Давление воздуха в сечении К-К:

$$P_{\rm K}^* = P_{\rm H} \cdot \pi_{\rm K}^* = 0.1013 \cdot 16 = 1.621 \,\rm M\Pi a,$$
 (22)

где $\pi_{\kappa}^* = 16$ - степень повышения давления компрессоре.

Давление в сечении 2-2:

$$P_2^* = \frac{P_{\rm K}^*}{\sigma_{\rm BMX}^*} = \frac{1.621}{0.98} = 1.654 \,\mathrm{MHa};$$
 (23)

где коэффициент увеличения давления в выходной части компрессора $\sigma^*_{\text{вых}} = 0.98.$

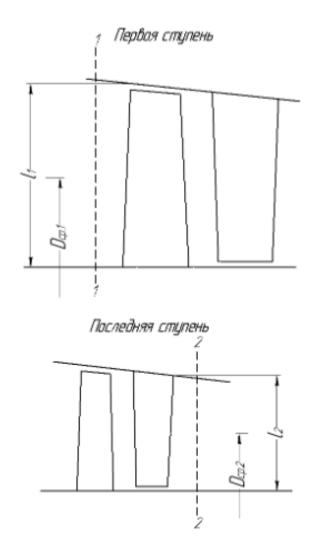


Рис. 4.2. Схема первой и последней ступеней компрессора.

Значение плотностей:

$$\rho_1 = \frac{P_1^*}{R_{\rm B} \cdot T_1^*} = \frac{0.1}{0.287 \cdot 288} = 1.213 \, \frac{\rm K\Gamma}{\rm M}^3; \tag{24}$$

Газовая постоянная воздуха: $R_{\rm B}=0.287~\frac{\rm кДж}{\rm кг\cdot K}$ Удельная изобарная теплоёмкость воздуха: $c_{p_{\rm B}}=1.03~\frac{\rm кДж}{\rm кr\cdot K}$ Коэффициент Пуассона воздуха: $k_{\rm B}=\frac{c_{p_{\rm B}}}{c_{p_{\rm B}}-R_{\rm B}}=\frac{1.03}{1.03-0.287}=1.386$ Коэффициент полезного действия компресора: $\eta_{\rm ag}^*=0.88$

$$\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{P_2^*}{P_1^*}\right)^{\frac{1}{n}} = 1.213 \left(\frac{1.654}{0.1}\right)^{\frac{1}{1.463}} = 8.241 \frac{\text{K}\Gamma}{\text{M}^3}$$
 (25)

где n - показатель политропы определяется из равенства:

$$\frac{k}{k-1} \cdot \eta_{\text{ad}}^* = \frac{n}{n-1};$$

$$\frac{1.386}{1.386-1} \cdot 0.88 = \frac{n}{n-1};$$

$$n = 1.463.$$
(26)

Примем величины осевой составляющей абсолютных скоростей в сечениях 1-1 и 2-2 соответственно $C_{z_1}=140~\frac{\rm M}{\rm c}$ и $C_{z_2}=120~\frac{\rm M}{\rm c}$. Втулочное отношение выберем $V_1=\frac{D_{\rm BT_1}}{D_{\rm H_1}}=0.5$. Расход воздуха $G_{\rm B}=132.571~\frac{\rm K\Gamma}{\rm c}$.

Из уравнения расхода первой ступени выразим значение наружного диаметра на входе в компрессор:

$$G_{\mathbf{B}} = \rho_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_{\mathbf{H}_1}^2 \cdot D_{\mathbf{BT}_1}^2 \right) \cdot C_{z_1} = \rho_1 \cdot D_{\mathbf{H}_1} \cdot \left(1 - \nu_1^2 \right) \cdot C_{z_1}; \tag{27}$$

Откуда,

$$D_{\text{H}_1} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{B}}}{\rho_1 \cdot \pi \cdot (1 - \nu_1^2) \cdot C_{z_1}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 132.571}{1.213 \cdot 3.14 \cdot (1 - 0.5^2) \cdot 140}} = 1.151 \text{ m};$$

Диаметр втулки первой ступени:

$$D_{\text{BT}_1} = \nu_1 \cdot D_{\text{H}_1} = 0.5 \cdot 1.151 = 0.576 \text{ m};$$
 (28)

Средний диаметр первой ступени:

$$D_{\text{cp}_1} = \frac{D_{\text{H}_1} + D_{\text{BT}_1}}{2} = \frac{1.151 + 0.576}{2} = 0.864 \text{ m};$$
 (29)

Длина рабочей лопатки первой ступени:

$$l_1 = \frac{D_{\text{H}_1} - D_{\text{BT}_1}}{2} = \frac{1.151 - 0.576}{2} = 0.288 \text{ m}; \tag{30}$$

Размеры проходного сечения 2-2:

$$F_2 = \frac{G_{\rm B}}{C_{z_2} \cdot \rho_2} = \frac{132.571}{120 \cdot 8.241} = 0.134 \,\text{m}^2; \tag{31}$$

Принимаем в проточной части $D_{\text{вт}} = const.$

Тогда:

$$\nu_2 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+4F_2}{\pi \cdot D_{\text{BT}_1}^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+4\cdot 0.134}{\pi \cdot 0.576^2}}} = 0.812;$$
(32)

Длина рабочей лопатки на последней ступени:

$$l_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\nu_2} - 1 \right) \cdot D_{\text{BT}_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0.812} - 1 \right) \cdot 0.576 = 0.066 \text{ m}; \tag{33}$$

Для расчета частоты вращения необходимо задать окружную скорость на наружном диаметре первой ступени $u_{\rm H_1}=327.844~{\rm \frac{M}{c}},$ тогда:

$$n = \frac{60 \cdot u_{\text{H}_1}}{\pi \cdot D_{\text{H}_1}} = \frac{60 \cdot 327.844}{3.14 \cdot 1.151} = 5441 \frac{\text{of}}{\text{мин}};$$
(34)

Адиабатический напор в проточной части компрессора по полным

параметрам:

$$H_{\text{ад. пр. ч.}}^{*} = \frac{k}{k-1} \cdot R_{\text{B}} \cdot T_{1}^{*} \cdot \left[\left(\frac{P_{2}^{*}}{P_{1}^{*}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] =$$

$$= \frac{1.386}{1.386 - 1} \cdot 0.287 \cdot 288 \cdot \left[\left(\frac{1.654}{0.1} \right)^{\frac{1.386 - 1}{1.386}} - 1 \right] = 351.11 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad (35)$$

Приближенная величина теоретического напора или удельная работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг воздуха:

$$H_{\kappa}^* = \frac{H_{\text{ад. пр. ч.}}^*}{\eta_{\text{ал}^*}} = \frac{351.11}{0.88} = 398.989 \, \frac{\kappa \text{Дж}}{\kappa \Gamma};$$
 (36)

Выберем средний теоретический напор $h_{\rm cp}=27~{\rm \kappa Дж \over \kappa \Gamma}$. Число ступеней компрессора:

$$i = \frac{H_{\rm K}^*}{h_{\rm cp}} = \frac{398.989}{27} = 14.77;$$
 (37)

Принимаем i = 15.

Теоретический напор в первой ступени:

$$h_1 = (0.6...0.7) \cdot h_{cp} = 0.65 \cdot 27 = 17.55 \frac{\kappa \text{Дж}}{\kappa \Gamma};$$
 (38)

Теоретический напор в средних ступенях:

$$h_{\text{cp. ct.}} = (1.1...1.2) \cdot h_{\text{cp}} = 1.15 \cdot 27 = 31.05 \, \frac{\kappa \text{Дж}}{\kappa \Gamma};$$
 (39)

Теоретический напор в последней ступени:

$$h_{\Pi} = (0.95...1) \cdot h_{cp} = 1 \cdot 27 = 27 \frac{\kappa \Pi \kappa}{\kappa \Gamma};$$
 (40)

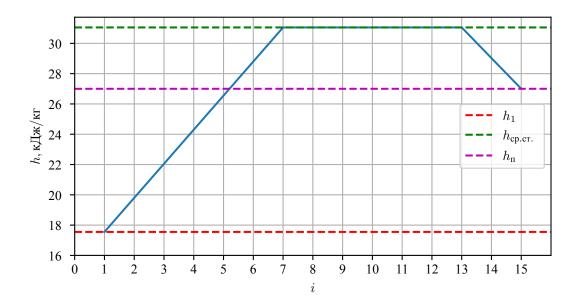


Рис. 4.3. Распределение теоретического напора по ступеням компрессора.

В результате распределения напоров соблюдается условие:

$$\sum h_i \approx H_{\kappa}^* = 398.989 \, \frac{\kappa \cancel{\Lambda} \cancel{\kappa}}{\cancel{\kappa} \Gamma}; \tag{41}$$

Уточняем величину окружной скорости на среднем диаметре первой ступени:

$$u_{\text{cp}_1} = \frac{\pi \cdot D_{\text{cp}_1} \cdot n}{60} = \frac{3.14 \cdot 0.864 \cdot 5441}{60} = 245.883 \, \frac{\text{M}}{\text{c}}; \tag{42}$$

Производим расчет первой ступени по среднему диаметру;

Коэффициент расхода на среднем диаметре:

$$\varphi_1 = \frac{C_{z_1}}{u_{\text{cp}_1}} = \frac{140}{245.883} = 0.569; \tag{43}$$

Коэффициент теоретического напора:

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{u_{\text{cp}_1^2}} = \frac{17.55 \cdot 10^3}{245.883^2} = 0.29;$$
 (44)

Отношение:

$$\frac{\bar{h}_1}{\varphi} = \frac{0.29}{0.569} = 0.51; \tag{45}$$

Зададим степень реактивности $\Omega=0.5$ и найдем:

$$\frac{\Omega}{\varphi} = \frac{0.5}{0.569} = 0.878; \tag{46}$$

По графику 4.4 находим $\left(\frac{\bar{h}_1}{arphi}\right)_{rac{b}{t}=1}=0.641.$

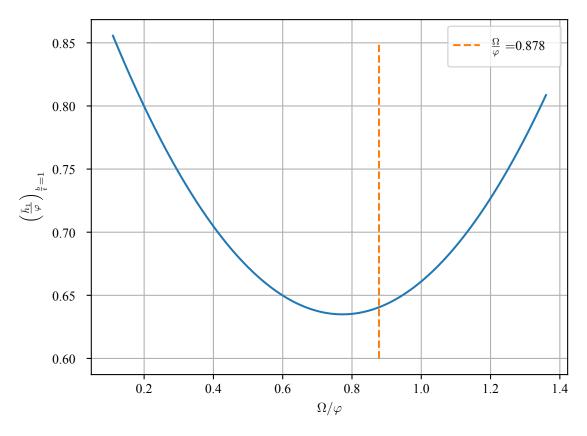


Рис. 4.4. График зависимости $\left(\frac{\bar{h}_1}{\varphi}\right)_{rac{b}{t}=1}$ от $\frac{\Omega}{\varphi}$

Коэффициент:

$$J = \frac{\frac{\bar{h}_1}{\varphi}}{\left(\frac{\bar{h}_1}{\varphi}\right)_{\frac{b}{t}=1}} = \frac{0.51}{0.641} = 0.796;$$
(47)

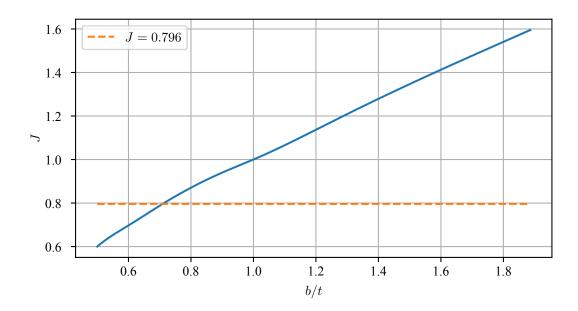


Рис. 4.5. Изменение коэффициента J в зависимости от густоты решетки.

Пользуясь рисунком 4.5, определяем $\frac{b}{t} = 0.727 \rightarrow \frac{t}{b} = 1.376$.

При постоянной вдоль радиуса хорде относительный шаг у втулки первой ступени:

$$\left(\frac{t}{b}\right)_{\text{BT}} = \frac{t}{b} \cdot \frac{D_{\text{BT}_1}}{D_{\text{cp}_1}} = 1.376 \cdot \frac{0.576}{0.864} = 0.918;$$
 (48)

Окружные скорости на входе и на выходе из рабочего колеса принимаем одинаковыми, т. е. $u_{\rm cp_1}=u_{\rm cp_2}=u=245.883\,\frac{\rm M}{c}$.

Проекция абсолютной скорости на окружное направление входной скорости на входе в рабочее колесо:

$$C_{u_1} = u(1 - \Omega) - \frac{h_1}{2u} = 245.883 \cdot 0.5 - \frac{17.55 \cdot 10^3}{2 \cdot 245.883} = 87.254 \frac{M}{c};$$
 (49)

На выходе из рабочего колеса:

$$C_{u_2} = u(1 - \Omega) + \frac{h_1}{2u} = 245.883 \cdot 0.5 + \frac{17.55 \cdot 10^3}{2 \cdot 245.883} = 158.629 \, \frac{\text{M}}{\text{c}};$$
 (50)

Абсолютная скорость на входе в рабочее колесо:

$$C_1 = \sqrt{C_{z_1}^2 + C_{u_1}^2} = \sqrt{140^2 + 87.254^2} = 164.964 \frac{\text{M}}{\text{c}};$$
 (51)

Угол наклона вектора для построения треугольников скоростей:

$$a_1 = arcctg\left(\frac{C_{u_1}}{C_{z_1}}\right) = arcctg\left(\frac{87.254}{140}\right) = 58.067^{\circ};$$
 (52)

Температура воздуха перед рабочим колесом:

$$T_1 = T_1^* - \frac{C_1^2}{2 \cdot \frac{k_B}{k_B - 1} \cdot R_B} = 288 - \frac{164.964^2}{2 \cdot \frac{1.386}{1.386 - 1} \cdot 0.287} = 274.79 \text{ K};$$
 (53)

Проекция относительной скорости W на окружное направление входной скорости на входе в рабочее колесо:

$$W_{u_1} = C_{u_1} - u = 87.254 - 245.883 = -158.629 \,\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{c}};\tag{54}$$

Относительная скорость на входе в колесо:

$$W_1 = \sqrt{C_{z_1}^2 + W_{u_1}^2} = \sqrt{140^2 + (-158.629)^2} = 211.573 \, \frac{M}{c}; \tag{55}$$

Число Маха по относительной скорости на входе в рабочее колесо первой ступени:

$$M_{W_1} = \frac{W_1}{\sqrt{k_{\rm B} \cdot R_{\rm B} \cdot T_1}} = \frac{211.573}{\sqrt{1.386 \cdot 0.287 \cdot 274.79}} = 0.625;$$
 (56)

Наклон входной относительной скорости при отсчете от отрицательного направления оси u характеризуется углом β :

$$\beta_1 = arcctg\left(\frac{W_{u_1}}{C_{z_1}}\right) = arcctg\left(\frac{211.573}{140}\right) = 41.43^\circ;$$
(57)

Уменьшение осевой составляющей скорости в одной ступени:

$$\Delta C_z = \frac{C_{z_1} - C_{z_2}}{i} = \frac{140 - 120}{15} = 1.333 \, \frac{\text{M}}{\text{c}}; \tag{58}$$

Осевая составляющая скорости на выходе из рабочего колеса первой ступени:

$$C_{z_2} = C_{z_1} - \frac{\Delta C_z}{2} = 140 - \frac{1.333}{2} = 139.333 \frac{\text{M}}{\text{c}};$$
 (59)

Абсолютная скорость на выходе в рабочее колесо:

$$C_2 = \sqrt{C_{z_2}^2 + C_{u_2}^2} = \sqrt{120^2 + 158.629^2} = 211.133 \,\frac{\text{M}}{\text{c}};$$
 (60)

Угол наклона вектора для построения треугольников скоростей:

$$\alpha_2 = arcctg\left(\frac{C_{u_2}}{C_{z_2}}\right) = arcctg\left(\frac{158.629}{120}\right) = 37.107^{\circ};$$
 (61)

Проекция относительной скорости W на окружное направление входной скорости на выходе из рабочего колеса:

$$W_{u_2} = C_{u_2} - u = 87.254 - 245.883 = -87.254 \frac{M}{c};$$
 (62)

Относительная скорость на выходе из колеса:

$$W_2 = \sqrt{C_{z_2}^2 + W_{u_2}^2} = \sqrt{120^2 + (-87.254)^2} = 164.399 \,\frac{\text{M}}{\text{c}};\tag{63}$$

Наклон выходной относительной скорости:

$$\beta_2 = arcctg\left(\frac{W_{u_2}}{C_{z_2}}\right) = arcctg\left(\frac{-87.254}{120}\right) = 53.979^{\circ};$$
 (64)

Угол поворота в решетке рабочего колеса:

$$\varepsilon = \beta_2 - \beta_1 = 53.979 - 41.43 = 12.548^{\circ};$$
 (65)

Коэффициент расхода на внешнем диаметре:

$$\varphi_{\rm H} = \frac{C_{z_1}}{u_{\rm H_1}} = \frac{140}{327.844} = 0.427; \tag{66}$$

Проверка числа Маха по средней относительной скорости на внешнем диаметре первой ступени:

$$M_{\text{wc}} = u_{\text{H}_1} \cdot \frac{\sqrt{1 + \varphi_{\text{H}}^2}}{\sqrt{k_{\text{B}} \cdot R_{\text{B}} \cdot T_1^*}} = 327.844 \cdot \frac{\sqrt{1 + 0.427^2}}{\sqrt{1.386 \cdot 0.287 \cdot 288}} = 1.053; \quad (67)$$

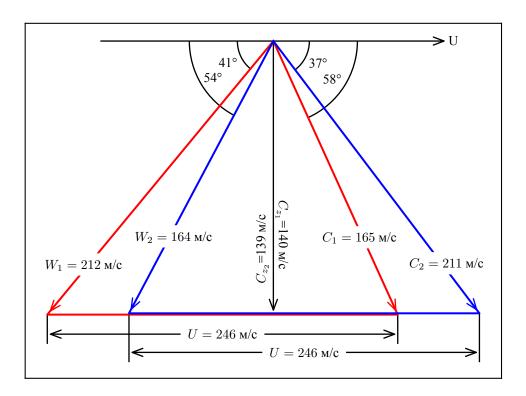


Рис. 4.6. Треугольник скоростей на среднем диаметре первой ступени компрессора.

5. Расчет турбины

5.1. Исходные данные для расчета

По методическим указаниям [3] произведем расчет турбины. Из ранее полученных результатов мы получили основные значения для предварительного расчета турбины.

1. Полное давление и полная температура на входе в турбину:

$$P_0^* = \sigma_{\kappa c}^* \cdot P_{\kappa}, \text{M}\Pi a; \tag{68}$$

где $P_{\rm K}$ — давление на выходе из компрессора, найденное в Главе 3, $P_{\rm K}^*=1.621~{\rm M\Pi a};\, \sigma_{\rm KC}$ — коэффициент потерь полного давления в камере сгорания, заданное при расчете в программе A2GTP, $\sigma_{\rm KC}=0.99;$

$$P_0^* = 0.99 \cdot 1.621 = 1.605 \text{ M}\Pi a;$$

$$T_0^* = 1693 \text{ K}.$$

- 2. Рабочее тело газ со следующими характеристиками:
 - Газовая постоянная $R = 288.3 \frac{Дж}{кг \cdot K};$
 - Показатель изоэнтропы k = 1.33;
 - Изобарная теплоёмкость при заданной температуре и давлении перед турбиной $C_{p_{\Gamma}}=1263.7~\frac{\mbox{Дж}}{\mbox{к}\mbox{\Gamma}\cdot\mbox{K}}.$
- 3. Мощность проектируемой турбины:

$$N_{\rm T} = N_{\rm e} + N_{\rm K} = 65 + 52.896 = 117.896 \,\text{MBT},$$
 (69)

где $N_{\rm K}$ – мощность, потребляемая компрессором:

$$N_{\rm K} = H_{\rm K}^* \cdot G_{\rm B} = 398.989 \cdot 10^3 \cdot 132.571 = 52.896 \,\text{MBt}.$$
 (70)

- 4. Номинальный расход газа $G_{\Gamma} = 132.571 \frac{\mathrm{K}\Gamma}{\mathrm{c}}$;
- 5. Частота вращения турбины $n = 5441 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$;
- 6. Адиабатный КПД процесса расширени $\eta_{\text{ад. т.}} = 0.91$;
- 7. Безразмерная скорость потока за турбиной $\lambda_{c_2 \text{\tiny T}} = 0.5$;
- 8. Угол выхода из последней ступени турбины $a_{2\text{\tiny T}}=90^\circ$;
- 9. Коэффициент, учитывающий механические потери и потери от утечек рабочего тела $k_N=1.018$.

5.2. Предварительный расчет турбины

Удельная внутренняя мощность турбины:

$$H_{UT} = k_N \frac{N_{\text{T}}}{G_{\text{F}}} = 1.0185 \cdot \frac{117.896 \cdot 10^3}{132.571} = 916.912 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$
 (71)

Температурный перепад на турбину по параметрам торможения:

$$\Delta T_T^* = \frac{H_{UT}}{c_{p_r}} = \frac{916.912}{1263.7} = 725.577 \text{ K};$$
 (72)

Температура торможения за турбиной:

$$T_{2T}^* = T_0^* - \Delta T_T^* = 1693 - 725.577 = 967.423 \text{ K};$$
 (73)

Критическая скорость потока газа, выходящего из турбины:

$$a_{\text{KP}_2} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}RT_{2T}^*} = \sqrt{\frac{2\cdot 1.33}{1.33+1}\cdot 288.3\cdot 967.423} = 564.278 \,\frac{\text{M}}{\text{c}};$$
 (74)

Скорость потока газа за турбиной:

$$C_{2\text{T}} = \lambda_{c_2\text{T}} \cdot a_{\kappa p_2} = 0.5 \cdot 564.278 = 282.139 \,\frac{\text{M}}{\text{c}};$$
 (75)

Адиабатный перепад энтальпий на турбину:

$$H_{\text{ад.T}} = H_{UT} + \frac{C_{2\text{T}}^2}{2} = 916.912 \cdot \frac{282.139^2}{2} = 956.713 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$
 (76)

Изоэнтропийный перепад энтальпий на турбину:

$$H_{\text{ot}} = \frac{H_{\text{ad.T}}}{\eta_{\text{ad.T}}} = \frac{956.713}{0.91} = 1051.333 \, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$
 (77)

Температура в потоке за турбиной при изоэнтропийном процессе расширения:

$$T_{2t_T}^* = T_0 - \frac{H_{\text{or}}}{c_{p_c}} = 1693 - \frac{1051.333 \cdot 10^3}{1263.7} = 861.052 \text{ K};$$
 (78)

Давление в потоке за турбиной:

$$P_{2T} = P_0^* \left(\frac{T_{2t_T^*}}{T_0^*}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 1.605 \cdot \left(\frac{861.052}{1643.15}\right)^{\frac{1.33}{1.33-1}} = 0.105 \text{ M}\Pi a; \tag{79}$$

Температура в потоке за турбиной:

$$T_{2T} = T_{2T}^* - \frac{C_{2T}^2}{2c_{p_r}} = 967.423 - \frac{282.139^2}{2 \cdot 1263.7} = 935.927 \text{ K};$$
 (80)

Плотность в потоке за турбиной:

$$\rho_{2T} = \frac{P_{2T}}{R \cdot T_{2T}} = \frac{0.105 \cdot 10^6}{288.3 \cdot 861.052} = 0.39 \,\frac{\text{K}\Gamma}{\text{M}^3};\tag{81}$$

Площадь сечения на выходе из рабочего колеса последней ступени:

$$F_{2T} = \frac{G_{\Gamma}}{\rho_{2T} \cdot C_{2\Gamma} \cdot \sin(a_{2\Gamma})} = \frac{132.571}{0.39 \cdot 282.139 \cdot 1} = 1.332 \,\mathrm{m}^2; \tag{82}$$

Напряжения в корневом сечении рабочей лопатки:

$$\sigma_p = 0.89 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 \cdot F_{2T} = 0.89 \cdot 10^{-5} \cdot 5441^2 \cdot 1.332 = 350.879 \text{ M}\Pi \text{a};$$
 (83)

Выберем материал для лопаток — сталь ЭИ437Б [4], для которой предел длительной прочности $[\sigma_{500}]=610\,$ МПа и находим коэффициент запаса прочности:

$$K_{\rm np} = \frac{[\sigma_{500}]}{\sigma_p} = \frac{610}{350.879} = 1.738,$$
 (84)

коэффициент запаса имеет значение в допустимых пределах $K_{\rm np} \geq 1.5,$ т.е. условие прочности выполняется.

Далее следует выбрать средний диаметр. Его выбирают, ориентируясь на диаметральные габариты компрессора и камеры сгорания, и таким образом, чтобы окружная скорость на среднем диаметре не превышала $500\,\frac{\rm M}{\rm c}$. Если она меньше $300\,\frac{\rm M}{\rm c}$, то следует увеличить диаметр или частоту вращения ротора.

Для данного расчета примем $d_{2T}=2.4$ м. Тогда окружная скорость на среднем диаметре рабочего колеса последней ступени:

$$u_2 = \frac{\pi \cdot d_{2T} \cdot n}{60} = \frac{3.14 \cdot 2.4 \cdot 5441}{60} = 683.39 \, \frac{\text{M}}{\text{c}}; \tag{85}$$

Высота лопаток последней ступени:

$$l_2 = \frac{F_{2T}}{\pi d_{2T}} = \frac{1.332}{3.14 \cdot 2.4} = 0.177 \text{ M}, \tag{86}$$

в результате чего параметр $\frac{d_{2T}}{l_2}$:

$$\frac{d_{2T}}{l_2} = \frac{2.4}{0.177} = 13.581. \tag{87}$$

Примем число ступеней турбины m=4. Тогда характерный напорный параметр Y равен:

$$Y = \frac{\sqrt{\sum u_2^2}}{\sqrt{2H_{\text{ot}}}} = \frac{\sqrt{4 \cdot 683.39^2}}{\sqrt{2 \cdot 1051.333}} = 0.943, \tag{88}$$

что соответствует рекомендованным значениям (0, 5...0, 6).

6. Заключение

В данной работе проведен расчет параметров: тепловой расчет, расчет компрессорной части, расчет турбинной части.

В результате теплового расчета была выявлена оптимальная температура перед турбиной $T_3=1693$ К. Были получены оптимальные параметры $\eta_{\rm e}=0.36,\,\pi_{\rm k}^*=16.$

После проведения расчета был получен 15—ступенчатый компрессор со степенью сжатия $\pi_{\rm K}^*=16$, габаритными параметрами $D_{\rm cp_1}=0.864$ м, $D_{\rm H_1}=1.151$ м, $D_{\rm BT}=0.576$ м. Для наглядности был построен треугольник скоростей компрессора.

Подводя итог расчета турбинной части, была получения 4—ступенчатая турбина. Высота последней лопатки $l_2=177$ мм. Средний диаметр рабочих лопаток $d_{2T}=2.4$ м.

7. Литература

- 1. Стационарные газотурбинные установки. Технические характеристики. Расчет тепловых схем: учебное пособие / В. В. Барсков [и др.]. — 2023.
- 2. Ю.С.Подобуев. Приближенный расчет осевого компрессора. 1981.
- 3. <u>Лапшин К. Л.</u> Математические модели проточных частей в проектировочных газодинамических расчётах осевых тепловых турбин на ЭВМ: учебное пособие. 2-е изд. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014.
- 4. <u>Локай В. И., Максутова М. К., Стрункин В. А.</u> Газовые турбины двигателей летательных аппаратов. Машиностроение, 1979. С. 430—431.

8. Приложение 1

1) $T_3^* = 1543 \text{ K}$

Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса ГТУ с охлаждаемой турбиной

Dmitriev A.K. 12.11.2024

Введены входные данные:

- 1 NE= 65000.0kBт T3*=1543.0K TH=288.0K PH= .1013МПа 2 МЮ= .000 TCT=1100.0K ДТВ=100.0K НОСР=240.0кДж/кг
- 3 КПДКС= .990 КПДКМ= .990 КПДТМ= .990 КИСП= .50 УТОХЛ= .20
- 4 CMFBX= .987 CMFBT= .950 CMFKC= .980 CMFBЫX= .985 CMFFT= .970
- 5 Значения ПИК:
 - 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0 32.0 34.0 36.0 38.0 40.0
- 6 К.п.д. компрессора использ. данные по осевым компр., имеющиеся в программе Компрессор однокаскадный

Значения КПДКВ (соответствуют значениям ПИК):

- 7 Задан внутренний к.п.д. турбины по полным параметрам КПДТВ= .910
- 8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты kak для стандартного углеводородного топлива

Результаты расчета

| ПИК | T2* | тохл* | T5* | TG | TQ | T4A* | T4Q* | T6* | ПИТ | |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|--|
| - | К | К | К | К | К | К | К | К | - | |
| 4.00 | 444.4 | 344.4 | 444.4 | 1348.3 | 1435.3 | 1195.1 | 1139.1 | 1139.1 | 3.5 | |
| 6.00 | 504.0 | 404.0 | 504.0 | 1336.3 | 1424.9 | 1098.9 | 1059.5 | 1059.5 | 5.3 | |
| 8.00 | 551.5 | 451.5 | 551.5 | 1336.3 | 1424.9 | 1034.8 | 1007.0 | 1007.0 | 7.0 | |
| 10.00 | 591.7 | 491.7 | 591.7 | 1336.3 | 1424.9 | 987.4 | 966.2 | 966.2 | 8.8 | |
| 12.00 | 627.2 | 527.2 | 627.2 | 1336.3 | 1424.9 | 950.2 | 933.2 | 933.2 | 10.5 | |
| 14.00 | 659.3 | 559.3 | 659.3 | 1336.3 | 1424.9 | 919.6 | 905.5 | 905.5 | 12.3 | |
| 16.00 | 688.9 | 588.9 | 688.9 | 1336.3 | 1424.9 | 893.8 | 881.8 | 881.8 | 14.0 | |
| 18.00 | 716.6 | 616.6 | 716.6 | 1336.3 | 1424.9 | 871.6 | 861.2 | 861.2 | 15.8 | |
| 20.00 | 742.8 | 642.8 | 742.8 | 1336.3 | 1424.9 | 852.1 | 842.9 | 842.9 | 17.6 | |
| 22.00 | 767.8 | 667.8 | 767.8 | 1336.3 | 1424.9 | 834.8 | 826.6 | 826.6 | 19.3 | |
| 24.00 | 791.7 | 691.7 | 791.7 | 1336.3 | 1424.9 | 819.2 | 811.9 | 811.9 | 21.1 | |
| 26.00 | 814.8 | 714.8 | 814.8 | 1336.3 | 1424.9 | 805.1 | 798.5 | 798.5 | 22.8 | |
| 28.00 | 837.3 | 737.3 | 837.3 | 1336.3 | 1424.9 | 792.2 | 786.1 | 786.1 | 24.6 | |
| 30.00 | 859.2 | 759.2 | 859.2 | 1336.3 | 1424.9 | 780.4 | 774.8 | 774.8 | 26.3 | |
| 32.00 | 880.7 | 780.7 | 880.7 | 1336.3 | 1424.9 | 769.4 | 764.2 | 764.2 | 28.1 | |
| 34.00 | 901.8 | 801.8 | 901.8 | 1336.3 | 1424.9 | 759.2 | 754.4 | 754.4 | 29.9 | |
| 36.00 | 922.4 | 822.4 | 922.4 | 1336.3 | 1424.9 | 749.7 | 745.2 | 745.2 | 31.6 | |
| 38.00 | 942.9 | 842.9 | 942.9 | 1336.3 | 1424.9 | 740.7 | 736.5 | 736.5 | 33.4 | |
| 40.00 | 963.2 | 863.2 | 963.2 | 1336.3 | 1424.9 | 732.3 | 728.4 | 728.4 | 35.1 | |
| 42.00 | 983.4 | 883.4 | 983.4 | 1336.3 | 1424.9 | 724.4 | 720.7 | 720.7 | 36.9 | |

```
- kДж/kг kДж/(kг*K) kДж/kг kДж/(kг*K) -
                                         -
                                             шт kДж/kг -
                                                            kДж/kг -
      157.9 1.0099
                     458.3 1.2738 2.14 .058 4
                                                 85.1 2.3
 4.0
                                                             14.1 -.013
                                                 64.5 3.1
 6.0
      219.1 1.0140
                     578.7 1.2623 2.25
                                         .038 5
                                                             17.6 -.008
                     655.9 1.2538 2.35
 8.0
      268.1 1.0177
                                         .029 5
                                                 48.3 3.9
                                                             18.5 -.004
10.0
      310.2 1.0212
                     712.0 1.2471 2.44
                                         .023 5
                                                 38.5 4.8
                                                             19.0 -.002
12.0
      347.5 1.0245
                     755.4 1.2415 2.53
                                         .019 5
                                                 32.0 5.6
                                                             19.4 -.001
                     790.6 1.2366 2.61
14.0
      381.6 1.0277
                                         .016 5
                                                 27.4 6.5
                                                             19.7 .000
                     820.1 1.2323 2.69
                                                 24.0 7.3
                                                             20.1 .001
16.0
      413.2 1.0307
                                         .014 5
                     845.2 1.2284 2.78
18.0
      443.0 1.0335
                                         .013 5
                                                 21.3 8.2
                                                             20.5 .001
20.0
      471.3 1.0362
                     867.2 1.2248 2.86
                                         .012 5
                                                 19.1 9.0
                                                             21.0 .002
22.0
      498.5 1.0389
                     886.6 1.2216 2.95
                                         .010 5 17.4 9.9
                                                             21.5 .003
24.0
      524.6 1.0415
                     903.9 1.2185 3.04
                                         .010 5 15.9 10.7
                                                             22.1 .003
26.0
      550.0 1.0440
                     919.7 1.2156 3.13
                                        .009 5 14.6 11.6
                                                             22.7 .004
28.0
      574.8 1.0465
                     934.1 1.2129 3.22
                                         .008 5 13.6 12.4
                                                             23.5 .005
30.0
      599.2 1.0489
                     947.4 1.2103 3.32 .008 5 12.7 13.3
                                                             24.4 .005
                                                             25.5 .006
      623.1 1.0513
                     959.8 1.2078 3.42 .007 5 11.9 14.1
32.0
34.0
                     971.4 1.2054 3.53
                                        .007 5 11.1 15.0
      646.6 1.0536
                                                             26.7 .007
      669.8 1.0558
                     982.4 1.2031 3.64
36.0
                                         .006 5 10.5 15.8
                                                             28.1 .008
38.0
      693.0 1.0581
                     993.1 1.2008 3.76
                                        .006 5
                                                  9.9 16.7
                                                             29.7 .008
                    1003.4 1.1987 3.89 .006 5
                                                             31.7
40.0
      716.0 1.0603
                                                  9.4 17.5
                                                                  .009
                    1013.5 1.1965 4.02 .005 5
42.0
      738.9 1.0626
                                                  9.0 18.4
                                                             34.1 .009
 ПИК КПДКВ КПДТВ ОХЛ Q1
                             GB
                                     GΓ
                                            ΗE
                                                 кпдв кпде
                                                             ВУТ
                 % кДж/кг
                             kr/c
                                    kr/c kДж/kr
                                                  -
                                                        - кг/(кВт*ч) -
     .890 .910 4.9 1300.0 225.128 220.871 288.7 .224 .220
 4.0
                                                              .553
                                                                   .642
     .882 .910 4.1 1245.4 186.653 184.237 348.2 .283
                                                      .277
                                                             .439 .610
 8.0
     .874
          .910 3.5 1201.8 171.826 170.559 378.3 .319
                                                      .312
                                                              .390 .581
     .866 .910 3.1 1162.0 165.114 164.411 393.7 .343 .335
                                                              .363 .555
10.0
12.0
     . 858
           .910 2.8 1125.3 162.265 161.877 400.6
                                                 .361
                                                       .352
                                                              .345
                                                                   .532
14.0
     .850 .910 2.6 1091.0 161.617 161.416 402.2 .374
                                                      .365
                                                              .333 .509
16.0
     .842
          .910 2.5 1058.6 162.425 162.335 400.2 .384
                                                       .374
                                                              .325
                                                                   .488
     .834
          .910 2.4 1027.8 164.293 164.263 395.6 .391
18.0
                                                      .381
                                                              .319
                                                                   .468
20.0
     .826
           .910 2.3 998.3 167.041 167.037 389.1 .397
                                                       .386
                                                                   .449
                                                              .315
          .910 2.2 969.7 170.547 170.539 381.1 .400
22.0
     .818
                                                      .389
                                                              .313 .430
           .910 2.2 942.0 174.739 174.705 372.0 .402
24.0
     .810
                                                       .391
                                                              .311
                                                                   .412
           .910 2.1 915.0 179.621 179.539 361.9 .404
                                                              .311 .394
26.0
     .802
                                                       .392
     .794
           .910 2.1 888.5 185.210 185.059 351.0 .403
                                                              .311 .376
28.0
                                                       .391
     .786
           .910 2.1 862.4 191.590 191.346 339.3 .402
                                                       .389
                                                              .312 .359
30.0
                                                .400
32.0
     .778
           .910 2.1 836.7 198.777 198.417 327.0
                                                       .387
                                                              .314
                                                                   .341
34.0
     .770
           .910
                2.1 811.3 206.816 206.312 314.3
                                                 .397
                                                       .384
                                                              .317
                                                                   .324
           .910 2.1 786.2 215.776 215.096 301.2 .394
                                                       .379
36.0
     .762
                                                              .321
                                                                   .308
          .910 2.1 761.1 225.922 225.025 287.7
38.0
     .754
                                                 .389
                                                       .374
                                                              .325
                                                                   .291
    .746 .910 2.2 736.0 237.336 236.172 273.9 .384
                                                      .368
                                                              .330 .274
     .738 .910 2.2 711.0 250.202 248.705 259.8 .378 .362
                                                              .336 .258
42.0
Нормальное завершение расчета
```

НТОХЛ СРМІГ АЛЬФА АЛЬФА* Z QОХЛ ПИОХЛ НОХЛ1 КАППА

ПИК

НК

CPMIB

2) $T_3^* = 1594 \text{ K}$

Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса ГТУ с охлаждаемой турбиной

Dmitriev A.K. 12.11.2024

Введены входные данные:

- 1 NE= 65000.0kBт Т3*=1593.0K TH=288.0K PH= .1013МПа
- 2 MЮ= .000 TCT=1100.0K ДТВ=100.0K H0CP=240.0kДж/kг
- 3 КПДКС= .990 КПДКМ= .990 КПДТМ= .990 КИСП= .50 УТОХЛ= .20
- 4 CNFBX= .987 CNFBT= .950 CNFKC= .980 CNFBЫX= .985 CNFFT= .970
- 5 Значения ПИК:
 - 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0 32.0 34.0 36.0 38.0 40.0 42.0
- 6 К.п.д. компрессора использ. данные по осевым компр., имеющиеся в программе Компрессор однокаскадный

Значения КПДКВ (соответствуют значениям ПИК):

- .890 .882 .874 .866 .858 .850 .834 .826 .818 .810 .802 .794 .786 .778 .770 .762 .754 .746 .738
- 7 Задан внутренний к.п.д. турбины по полным параметрам КПДТВ= .910
- 8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты kak для стандартного углеводородного топлива

Результаты расчета

| ПИК | T2* | тохл∗ | T5* | TG | TQ | T4A* | T4Q* | T6* | ПИТ |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| - | К | К | К | К | К | К | К | К | - |
| 4.00 | 444.4 | 344.4 | 444.4 | 1386.8 | 1475.9 | 1236.3 | 1167.8 | 1167.8 | 3.5 |
| 6.00 | 504.0 | 404.0 | 504.0 | 1370.5 | 1461.5 | 1137.6 | 1090.6 | 1090.6 | 5.3 |
| 8.00 | 551.5 | 451.5 | 551.5 | 1362.9 | 1461.5 | 1071.8 | 1038.6 | 1038.6 | 7.0 |
| 10.00 | 591.7 | 491.7 | 591.7 | 1362.9 | 1461.5 | 1023.1 | 997.8 | 997.8 | 8.8 |
| 12.00 | 627.2 | 527.2 | 627.2 | 1362.9 | 1461.5 | 984.8 | 964.5 | 964.5 | 10.5 |
| 14.00 | 659.3 | 559.3 | 659.3 | 1362.9 | 1461.5 | 953.4 | 936.5 | 936.5 | 12.3 |
| 16.00 | 688.9 | 588.9 | 688.9 | 1362.9 | 1461.5 | 926.9 | 912.5 | 912.5 | 14.0 |
| 18.00 | 716.6 | 616.6 | 716.6 | 1362.9 | 1461.5 | 904.0 | 891.6 | 891.6 | 15.8 |
| 20.00 | 742.8 | 642.8 | 742.8 | 1362.9 | 1461.5 | 884.0 | 873.0 | 873.0 | 17.6 |
| 22.00 | 767.8 | 667.8 | 767.8 | 1362.9 | 1461.5 | 866.1 | 856.4 | 856.4 | 19.3 |
| 24.00 | 791.7 | 691.7 | 791.7 | 1362.9 | 1461.5 | 850.1 | 841.3 | 841.3 | 21.1 |
| 26.00 | 814.8 | 714.8 | 814.8 | 1362.9 | 1461.5 | 835.6 | 827.6 | 827.6 | 22.8 |
| 28.00 | 837.3 | 737.3 | 837.3 | 1362.9 | 1461.5 | 822.3 | 815.0 | 815.0 | 24.6 |
| 30.00 | 859.2 | 759.2 | 859.2 | 1362.9 | 1461.5 | 810.1 | 803.4 | 803.4 | 26.3 |
| 32.00 | 880.7 | 780.7 | 880.7 | 1362.9 | 1461.5 | 798.8 | 792.6 | 792.6 | 28.1 |
| 34.00 | 901.8 | 801.8 | 901.8 | 1362.9 | 1461.5 | 788.3 | 782.5 | 782.5 | 29.9 |
| 36.00 | 922.4 | 822.4 | 922.4 | 1362.9 | 1461.5 | 778.5 | 773.1 | 773.1 | 31.6 |
| 38.00 | 942.9 | 842.9 | 942.9 | 1362.9 | 1461.5 | 769.3 | 764.3 | 764.3 | 33.4 |
| 40.00 | 963.2 | 863.2 | 963.2 | 1362.9 | 1461.5 | 760.6 | 755.9 | 755.9 | 35.1 |
| 42.00 | 983.4 | 883.4 | 983.4 | 1362.9 | 1461.5 | 752.4 | 747.9 | 747.9 | 36.9 |

```
- kДж/kг kДж/(kг*K) kДж/kг kДж/(kг*K) -
                                          -
                                             шт kДж/kг -
                                                            kДж/kг -
      157.9 1.0099
                     478.1 1.2845 2.03 .061 4 104.1 2.3
 4.0
                                                             17.6 -.022
 6.0
      219.1 1.0140
                     601.6 1.2730 2.13
                                         .041 5
                                                76.7 3.1
                                                             20.9 -.013
                     680.7 1.2645 2.22
 8.0
      268.1 1.0177
                                         .031 5 57.4 3.8
                                                             21.4 -.003
      310.2 1.0212
                     738.9 1.2579 2.30
                                         .025 5
                                                 45.8 4.6
10.0
                                                             22.1 -.001
12.0
      347.5 1.0245
                     784.1 1.2522 2.38
                                         .020 5
                                                 38.1 5.3
                                                             22.5 .001
14.0
      381.6 1.0277
                     820.7 1.2474 2.45
                                         .018 5
                                                 32.6 6.1
                                                             23.0 .002
16.0
      413.2 1.0307
                     851.3 1.2430 2.52
                                         .015 5
                                                 28.5 6.9
                                                             23.4 .003
18.0
      443.0 1.0335
                     877.5 1.2391 2.60
                                         .014 5
                                                 25.3 7.7
                                                             23.9 .003
20.0
      471.3 1.0362
                     900.4 1.2355 2.67
                                         .012 5
                                                 22.7 8.5
                                                             24.5 .004
22.0
      498.5 1.0389
                     920.6 1.2322 2.75
                                         .011 5
                                                 20.6 9.3
                                                             25.1 .005
                                                             25.8 .005
24.0
      524.6 1.0415
                     938.8 1.2291 2.82
                                         .010 5 18.9 10.1
26.0
      550.0 1.0440
                     955.2 1.2262 2.90
                                         .009 5 17.4 10.9
                                                             26.6 .006
28.0
      574.8 1.0465
                     970.3 1.2234 2.99
                                         .009 5 16.2 11.7
                                                             27.5 .007
30.0
      599.2 1.0489
                     984.2 1.2208 3.07
                                         .008 5 15.1 12.5
                                                             28.6 .007
      623.1 1.0513
                     997.2 1.2183 3.16
                                         .008 5 14.1 13.3
                                                             29.8 .008
32.0
34.0
                    1009.5 1.2159 3.25
      646.6 1.0536
                                         .007 5 13.3 14.1
                                                             31.2 .009
36.0
      669.8 1.0558
                    1021.2 1.2135 3.34
                                         .007 5 12.5 14.9
                                                             32.9 .010
38.0
                    1032.5 1.2113 3.44
                                        .006 5 11.8 15.7
      693.0 1.0581
                                                             34.9 .010
                    1043.5 1.2090 3.55
                                        .006 5
40.0
      716.0 1.0603
                                                 11.2 16.5
                                                             37.2 .010
                    1054.4 1.2069 3.66 .006 5 10.7 17.3
42.0
      738.9 1.0626
                                                             40.0 .011
 ПИК КПДКВ КПДТВ ОХЛ Q1
                             GB
                                     GΓ
                                            HE
                                                 кпдв кпде
                                                              ВУТ
                 % кДж/кг
                             kr/c
                                    kг/c kДж/kг
                                                  -
                                                        - кг/(кВт*ч) -
 4.0
     .890 .910 5.8 1357.4 213.594 207.884 304.3 .226 .222
                                                              .548
                                                                   .654
 6.0
     .882 .910 4.8 1307.1 176.823 173.616 367.6 .284
                                                      .278
                                                              .437 .622
 8.0
     .874
          .910 4.0 1265.6 162.458 160.614 400.1 .320
                                                      .313
                                                              .389 .595
     .866
          .910 3.5 1227.0 155.509 154.344 418.0 .345 .337
                                                              .361 .570
10.0
12.0
     . 858
           .910 3.2 1191.1 152.254 151.475 426.9
                                                 .363
                                                       .355
                                                              .343
                                                                   .547
14.0
     .850 .910 3.0 1157.4 151.114 150.569 430.1 .377
                                                      .368
                                                              .331 .526
16.0
     .842
          .910 2.8 1125.4 151.331 150.929 429.5 .387
                                                       .378
                                                              .322
                                                                   .506
     .834 .910 2.7 1094.9 152.534 152.217 426.1 .395
                                                      .385
                                                              .316 .487
18.0
20.0
     .826
           .910 2.6 1065.5 154.530 154.257 420.6 .401
                                                       .391
                                                              .311
                                                                   .468
          .910 2.5 1037.0 157.185 156.923 413.5 .406
22.0
     .818
                                                       .395
                                                              .308
                                                                   .450
           .910 2.5 1009.4 160.417 160.140 405.2 .409
                                                              .306
24.0
     .810
                                                       .397
                                                                   .432
                2.4 982.4 164.205 163.889 395.8 .411
26.0
     .802
          .910
                                                      .399
                                                              .305
                                                                   .415
     .794
                2.4 955.9 168.577 168.199 385.6 .411
                                                                   .398
28.0
           .910
                                                       .399
                                                              .305
     .786
           .910
                2.4 929.8 173.557 173.094 374.5 .411
30.0
                                                       .399
                                                              .305
                                                                   .382
32.0
     .778
           .910
                2.4 904.1 179.139 178.565 362.8 .410
                                                       .397
                                                              .306
                                                                    .365
                2.4 878.6 185.336 184.625 350.7 .409
34.0
     .770
           .910
                                                       .395
                                                              .308
                                                                    .349
           .910 2.4 853.4 192.183 191.304 338.2 .406
36.0
     .762
                                                       .392
                                                              .310
                                                                   .333
38.0
     .754
          .910 2.4 828.2 199.842 198.754 325.3 .403
                                                       .389
                                                              .313
                                                                   .317
     .746 .910 2.5 803.0 208.348 207.004 312.0 .399
                                                      .385
                                                              .316 .301
     .738 .910 2.5 777.8 217.749 216.089 298.5 .395 .380
                                                              .320 .285
42.0
Нормальное завершение расчета
```

НТОХЛ СРМІГ АЛЬФА АЛЬФА* Z QОХЛ ПИОХЛ НОХЛ1 КАППА

ПИК

НК

CPMIB

3) $T_3^* = 1643 \text{ K}$

Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса

ГТУ с охлаждаемой турбиной

Dmitriev A.K. 12.11.2024

Введены входные данные:

- 1 NE= 65000.0kBт T3*=1643.0K TH=288.0K PH= .1013МПа
- 2 MЮ= .000 TCT=1100.0K ДТВ=100.0K H0CP=240.0kДж/kг
- 3 КПДКС= .990 КПДКМ= .990 КПДТМ= .990 КИСП= .50 УТОХЛ= .20
- 4 СИГВХ= .987 СИГВТ= .950 СИГКС= .980 СИГВЫХ= .985 СИГГТ= .970
- 5 Значения ПИК:
 - 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0 32.0 34.0 36.0 38.0 40.0 42.0
- 6 К.п.д. компрессора использ. данные по осевым компр., имеющиеся в программе Компрессор однокаскадный

Значения КПДКВ (соответствуют значениям ПИК):

- .890 .882 .874 .866 .858 .850 .834 .826 .818 .842 .810 .802 .794 .786 .778 .770 .762 .754 .746 .738
- 7 Задан внутренний к.п.д. турбины по полным параметрам КПДТВ= .910
- 8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты как для стандартного углеводородного топлива

Результаты расчета

ПИК тохл* T2* T5* TG TQ T40* T6* ПИТ **T4A*** К К К К К К К К 4.00 444.4 344.4 444.4 1425.6 1516.9 1277.6 1195.5 1195.5 3.5 1406.0 1499.3 1176.3 1119.7 1119.7 6.00 504.0 404.0 504.0 5.3 8.00 551.5 451.5 551.5 1403.2 1492.2 1108.9 1063.1 1063.1 7.0 10.00 591.7 491.7 591.7 1401.7 1492.2 1059.0 1023.9 1023.9 8.8 12.00 627.2 527.2 627.2 1401.7 1492.2 1019.6 991.5 991.5 10.5 14.00 659.3 559.3 659.3 1401.7 1492.2 987.3 964.0 964.0 12.3 16.00 688.9 588.9 688.9 1401.7 1492.2 960.1 940.2 940.2 14.0 18.00 716.6 616.6 716.6 1401.7 1492.2 936.6 919.4 919.4 15.8 20.00 742.8 742.8 1401.7 1492.2 900.8 900.8 17.6 642.8 916.0 1492.2 22.00 767.8 667.8 767.8 1401.7 897.6 884.1 884.1 19.3 24.00 791.7 691.7 791.7 1401.7 1492.2 881.2 869.0 869.0 21.1 26.00 814.8 714.8 814.8 1401.7 1492.2 866.2 855.2 855.2 22.8 28.00 837.3 737.3 837.3 1401.7 1492.2 852.6 842.5 842.5 24.6 30.00 859.2 759.2 859.2 1401.7 1492.2 840.0 830.7 830.7 26.3 32.00 880.7 780.7 880.7 1401.7 1492.2 828.3 819.8 819.8 28.1 34.00 801.8 901.8 1401.7 1492.2 817.5 809.6 809.6 29.9 901.8 922.4 1401.7 36.00 922.4 822.4 1492.2 807.4 800.0 800.0 31.6 797.9 38.00 942.9 842.9 942.9 1401.7 1492.2 791.0 791.0 33.4 863.2 963.2 1401.7 1492.2 782.5 782.5 35.1 40.00 963.2 789.0 42.00 983.4 883.4 983.4 1401.7 1492.2 780.6 774.4 774.4 36.9

```
НК
             CPMIB
                     НТОХЛ СРМІГ АЛЬФА АЛЬФА* Z QОХЛ ПИОХЛ НОХЛ1 КАППА
  - kДж/kг kДж/(kг*K) kДж/kг kДж/(kг*K) -
                                          _
                                             шт кДж/кг -
                                                            kДж/kг -
      157.9 1.0099
                     499.0 1.2951 1.93 .065 4 124.9 2.4
 4.0
                                                             21.8 -.032
 6.0
      219.1 1.0140
                     626.1 1.2836 2.02
                                        .043 5 92.3 3.1
                                                             25.3 -.020
                     712.7 1.2752 2.10 .032 6 78.6 3.9
 8.0
      268.1 1.0177
                                                             30.2 -.020
      310.2 1.0212
                     772.3 1.2685 2.17
                                         .026 6
                                                 62.8 4.7
10.0
                                                             30.6 -.014
12.0
      347.5 1.0245
                     819.0 1.2628 2.24
                                         .022 6
                                                 52.2 5.4
                                                             31.2 -.011
                     856.9 1.2580 2.31
14.0
      381.6 1.0277
                                         .019 6
                                                 44.7 6.2
                                                             31.7 -.009
16.0
      413.2 1.0307
                     888.6 1.2536 2.37
                                         .016 6
                                                 39.0 7.0
                                                             32.2 -.007
18.0
      443.0 1.0335
                     915.8 1.2497 2.44
                                         .014 6
                                                 34.7 7.8
                                                             32.8 -.006
20.0
      471.3 1.0362
                     939.7 1.2461 2.50
                                         .013 6
                                                 31.1 8.5
                                                             33.6 -.005
22.0
      498.5 1.0389
                     960.8 1.2427 2.57
                                         .012 6
                                                 28.3 9.3
                                                             34.4 -.004
      524.6 1.0415
                     979.8 1.2396 2.64
                                         .011 6 25.9 10.1
                                                             35.3 -.003
24.0
26.0
      550.0 1.0440
                     997.1 1.2367 2.71
                                         .010 6 23.9 10.9
                                                             36.4 -.002
28.0
      574.8 1.0465
                    1013.0 1.2339 2.78
                                         .009 6 22.1 11.7
                                                             37.7 -.001
30.0
      599.2 1.0489
                    1027.8 1.2313 2.85
                                         .009 6 20.6 12.4
                                                             39.1 .000
                                                             40.8 .001
      623.1 1.0513
                    1041.7 1.2287 2.93
                                         .008 6 19.3 13.2
32.0
34.0
      646.6 1.0536
                    1054.9 1.2263 3.01
                                        .008 6 18.2 14.0
                                                             42.7 .002
                                         .007 6 17.1 14.8
36.0
      669.8 1.0558
                    1067.6 1.2239 3.09
                                                             45.0 .003
38.0
                    1080.0 1.2216 3.17
                                        .007 6 16.2 15.6
                                                             47.7 .003
      693.0 1.0581
                    1092.1 1.2194 3.26
                                         .006 6 15.4 16.3
40.0
      716.0 1.0603
                                                             50.9 .004
42.0
      738.9 1.0626 1104.3 1.2172 3.36
                                        .006 6 14.6 17.1
                                                             54.7 .005
 ПИК КПДКВ КПДТВ ОХЛ Q1
                             GB
                                     GΓ
                                            ΗE
                                                 кпдв кпде
                                                              ВУТ
                                                                    ΦИ
                 % кДж/кг
                             kr/c
                                    kг/c kДж/kг
                                                  -
                                                        - кг/(кВт*ч) -
 4.0
     .890 .910 6.7 1413.5 202.917 195.770 320.3 .229 .224
                                                              .542 .665
 6.0
     .882 .910 5.6 1366.6 167.848 163.662 387.3 .286
                                                      .281
                                                             .433 .634
 8.0
     .874
          .910 5.2 1320.8 153.237 149.885 424.2 .325
                                                       .318
                                                              .382 .608
     .866 .910 4.6 1285.1 146.324 143.935 444.2 .350
                                                      .342
                                                              .355 .585
10.0
12.0
     . 858
           .910 4.1 1251.1 142.796 140.967 455.2 .368
                                                       .360
                                                              .338
                                                                   .563
14.0
     .850
          .910 3.8 1218.7 141.268 139.787 460.1 .383
                                                      .374
                                                              .325
                                                                   .543
16.0
     .842
          .910 3.6 1187.7 141.007 139.750 461.0 .394
                                                       .384
                                                              .316
                                                                   .523
     .834 .910 3.4 1157.9 141.646 140.531 458.9 .402
18.0
                                                      .392
                                                              .310
                                                                   .505
20.0
     .826
           .910 3.3 1129.0 142.998 141.967 454.6 .409
                                                       .399
                                                              .305
                                                                   .487
22.0
     .818
          .910 3.2 1101.0 144.931 143.940 448.5 .414
                                                       .403
                                                              .302
                                                                   .470
           .910 3.1 1073.7 147.353 146.368 441.1 .418
                                                              .299
24.0
     .810
                                                       .407
                                                                   .453
          .910 3.1 1046.9 150.231 149.220 432.7 .421
26.0
     .802
                                                       .409
                                                              .297
                                                                   .437
     .794
                                                                    .421
28.0
           .910 3.0 1020.6 153.573 152.506 423.3 .422
                                                       .411
                                                              .296
     .786
           .910 3.0 994.6 157.374 156.223 413.0 .423
                                                       .411
                                                                   .405
30.0
                                                              .296
32.0
     .778
           .910 3.0 968.9 161.619 160.354 402.2 .424
                                                       .411
                                                              .296
                                                                    .389
34.0
     .770
           .910
                3.0 943.4 166.299 164.888 390.9
                                                 .423
                                                       .410
                                                              .296
                                                                    .374
          .910 3.0 918.2 171.424 169.833 379.2 .422
36.0
     .762
                                                       .409
                                                              .297
                                                                   .358
38.0
     .754
          .910 3.1 892.9 177.073 175.257 367.1 .421
                                                      .407
                                                              .299
                                                                   .343
    .746 .910 3.1 867.6 183.262 181.169 354.7 .419 .405
                                                              .300
                                                                   .329
     .738 .910 3.2 842.2 189.999 187.564 342.1 .417 .402
                                                              .302 .314
42.0
Нормальное завершение расчета
```

ПИК

4) $T_3^* = 1693 \text{ K}$

Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса

ГТУ с охлаждаемой турбиной

Dmitriev A.K. 12.11.2024

Введены входные данные:

- 1 NE= 65000.0kBт T3*=1693.0K TH=288.0K PH= .1013МПа
- 2 MЮ= .000 TCT=1100.0K ДТВ=100.0K H0CP=240.0kДж/kг
- 3 КПДКС= .990 КПДКМ= .990 КПДТМ= .990 КИСП= .50 УТОХЛ= .20
- 4 CMFBX= .987 CMFBT= .950 CMFKC= .980 CMFBЫX= .985 CMFFT= .970
- 5 Значения ПИК:
 - 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 32.0 24.0 26.0 28.0 30.0 34.0 36.0 38.0 40.0 42.0
- 6 К.п.д. компрессора использ. данные по осевым компр., имеющиеся в программе Компрессор однокаскадный

Значения КПДКВ (соответствуют значениям ПИК):

- .890 .882 .874 .866 .858 .850 .834 .826 .818 .842 .810 .802 .794 .786 .778 .770 .762 .754 .746 .738
- 7 Задан внутренний к.п.д. турбины по полным параметрам КПДТВ= .910
- 8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты как для стандартного углеводородного топлива

Результаты расчета

ПИК тохл* T2* T5* TG TQ **T4A*** T40* T6* ПИТ К К К К К К К К 4.00 444.4 344.4 444.4 1464.6 1558.1 1318.9 1222.1 1222.1 3.5 504.0 504.0 1442.8 1538.3 1215.2 1147.4 1147.4 6.00 404.0 5.3 8.00 551.5 451.5 551.5 1437.1 1528.3 1146.1 1092.7 1092.7 7.0 10.00 591.7 491.7 591.7 1429.4 1528.3 1094.9 1054.1 1054.1 8.8 12.00 627.2 527.2 627.2 1429.4 1528.3 1054.5 1021.7 1021.7 10.5 14.00 659.3 559.3 659.3 1429.4 1528.3 1021.4 994.2 994.2 12.3 16.00 688.9 588.9 688.9 1429.4 1528.3 993.4 970.3 970.3 14.0 18.00 716.6 616.6 716.6 1429.4 1528.3 969.3 949.2 949.2 15.8 20.00 742.8 742.8 1429.4 1528.3 930.4 930.4 17.6 642.8 948.1 767.8 1429.4 1528.3 22.00 767.8 667.8 929.3 913.5 913.5 19.3 24.00 791.7 691.7 791.7 1429.4 1528.3 912.4 898.2 898.2 21.1 26.00 814.8 714.8 814.8 1429.4 1528.3 897.0 884.2 884.2 22.8 28.00 737.3 837.3 837.3 1429.4 1528.3 883.0 871.2 871.2 24.6 30.00 859.2 759.2 859.2 1429.4 1528.3 870.1 859.2 859.2 26.3 32.00 880.7 780.7 880.7 1429.4 1528.3 858.1 848.1 848.1 28.1 34.00 901.8 801.8 901.8 1429.4 1528.3 847.0 837.7 837.7 29.9 922.4 1429.4 1528.3 36.00 922.4 822.4 836.6 827.9 827.9 31.6 38.00 942.9 842.9 942.9 1429.4 1528.3 826.8 818.7 818.7 33.4 863.2 963.2 1429.4 40.00 963.2 1528.3 817.6 810.0 810.0 35.1 42.00 983.4 883.4 983.4 1429.4 1528.3 808.9 801.7 801.7 36.9

```
- kДж/kг kДж/(kг*K) kДж/kг kДж/(kг*K) -
                                          _
                                              шт кДж/кг -
                                                            kДж/kг -
      157.9 1.0099
                     521.2 1.3054 1.84 .069 4 147.5 2.5
 4.0
                                                             26.6 -.042
 6.0
      219.1 1.0140
                     651.9 1.2940 1.92 .046 5 110.3 3.1
                                                             30.6 -.028
 8.0
      268.1 1.0177
                     740.3 1.2856 1.99
                                         .034 6 91.4 3.9
                                                             34.9 -.025
      310.2 1.0212
                     800.9 1.2789 2.06
                                         .027 6 72.9 4.5
10.0
                                                             35.0 -.014
12.0
      347.5 1.0245
                     849.2 1.2732 2.12
                                         .023 6
                                                  60.7 5.2
                                                             35.6 -.011
14.0
      381.6 1.0277
                     888.4 1.2684 2.18
                                         .020 6
                                                  51.9 6.0
                                                             36.2 -.008
16.0
      413.2 1.0307
                     921.4 1.2640 2.24
                                         .017 6
                                                  45.4 6.7
                                                             36.8 -.007
18.0
      443.0 1.0335
                     949.7 1.2601 2.30
                                         .015 6
                                                  40.3 7.4
                                                             37.5 -.005
20.0
      471.3 1.0362
                     974.4 1.2565 2.35
                                         .014 6
                                                  36.2 8.1
                                                             38.4 -.004
22.0
      498.5 1.0389
                     996.5 1.2531 2.41
                                         .012 6
                                                  32.9 8.9
                                                             39.3 -.003
                    1016.3 1.2500 2.47
                                         .011 6 30.1 9.6
24.0
      524.6 1.0415
                                                             40.5 -.002
26.0
      550.0 1.0440
                    1034.3 1.2470 2.53
                                         .011 6 27.7 10.4
                                                             41.7 -.001
28.0
      574.8 1.0465
                    1051.0 1.2442 2.60
                                         .010 6 25.7 11.1
                                                             43.2 .000
30.0
      599.2 1.0489
                    1066.5 1.2415 2.66
                                         .009 6 24.0 11.8
                                                             44.9 .001
      623.1 1.0513
                    1081.2 1.2390 2.73
                                         .009 6 22.4 12.6
                                                             46.8 .002
32.0
34.0
                    1095.1 1.2365 2.80
                                         .008 6 21.1 13.3
                                                             49.0 .003
      646.6 1.0536
36.0
      669.8 1.0558
                    1108.6 1.2341 2.87
                                         .008 6 19.9 14.0
                                                             51.7 .003
38.0
                    1121.7 1.2318 2.94
                                         .007 6 18.8 14.8
      693.0 1.0581
                                                             54.8 .004
                    1134.7 1.2295 3.02
                                         .007 6 17.9 15.5
40.0
      716.0 1.0603
                                                             58.4 .005
42.0
      738.9 1.0626 1147.7 1.2273 3.10
                                         .007 6 17.0 16.3
                                                             62.8 .005
 ПИК КПДКВ КПДТВ ОХЛ Q1
                              GB
                                     GΓ
                                            ΗE
                                                  кпдв кпде
                                                              ВУТ
                                                                     ΦИ
 _
                 % кДж/кг
                             kr/c
                                    kг/c kДж/kг
                                                  -
                                                         - кг/(кВт*ч) -
 4.0
     .890 .910 7.8 1468.1 192.963 184.403 336.9 .232 .227
                                                              .535
                                                                   .676
 6.0
     .882 .910 6.5 1424.2 159.648 154.407 407.1 .289
                                                       .283
                                                              .430 .646
 8.0
     .874
          .910 5.9 1382.1 145.497 141.478 446.7 .327
                                                       .320
                                                              .380
                                                                    .621
     .866
          .910 5.2 1348.3 138.767 135.840 468.4 .351
                                                       .344
                                                              .354
                                                                   .597
10.0
12.0
     . 858
           .910 4.7 1315.5 135.030 132.748 481.4
                                                 .370
                                                       .362
                                                              .336
                                                                    .577
14.0
     .850
          .910 4.3 1284.0 133.191 131.313 488.0 .385
                                                       .376
                                                              .323
                                                                   .557
16.0
     .842
           .910 4.1 1253.6 132.571 130.958 490.3 .396
                                                        .387
                                                              .314
                                                                    .539
     .834
          .910 3.9 1224.2 132.797 131.355 489.5 .405
18.0
                                                       .396
                                                              .307
                                                                   .521
20.0
     .826
           .910 3.7 1195.7 133.686 132.351 486.2 .413
                                                        .403
                                                              .302
                                                                    .504
22.0
     .818
          .910 3.6 1167.9 135.096 133.819 481.1 .418
                                                       .408
                                                              .298
                                                                   .487
                                                              .295
24.0
     .810
           .910 3.5 1140.8 136.943 135.686 474.6 .423
                                                        .412
                                                                    .471
          .910 3.5 1114.2 139.186 137.914 467.0 .426
26.0
     .802
                                                       .415
                                                              .293
                                                                    .456
     .794
           .910 3.4 1087.9 141.818 140.501 458.3 .429
28.0
                                                        .417
                                                              .292
                                                                    .440
     .786
           .910 3.4 1061.9 144.828 143.434 448.8 .430
                                                       .418
                                                                    .425
30.0
                                                              .291
32.0
     .778
           .910
               3.4 1036.2 148.185 146.685 438.6 .432
                                                        .419
                                                              .290
                                                                    .410
34.0
     .770
           .910
                3.4 1010.7 151.878 150.239 428.0
                                                 .432
                                                        .419
                                                              .290
                                                                    .395
          .910 3.4 985.4 155.867 154.055 417.0 .432
36.0
     .762
                                                        .419
                                                              .290
                                                                    .381
     .754 .910 3.5 959.9 160.299 158.269 405.5 .432
38.0
                                                       .418
                                                              .291
                                                                    .366
     .746 .910 3.5 934.5 165.106 162.806 393.7 .431
                                                      .417
                                                              .292 .352
     .738 .910 3.6 908.9 170.279 167.649 381.7 .430 .416
                                                              .292 .338
42.0
Нормальное завершение расчета
```

НТОХЛ СРМІГ АЛЬФА АЛЬФА* Z QОХЛ ПИОХЛ НОХЛ1 КАППА

ПИК

НК

CPMIB

5) $T_3^* = 1743 \text{ K}$

Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса ГТУ с охлаждаемой турбиной

Dmitriev A.K. 12.11.2024

Введены входные данные:

- 1 NE= 65000.0kBт Т3*=1743.0K TH=288.0K PH= .1013МПа
- 2 MЮ= .000 TCT=1100.0K ДТВ=100.0K H0CP=240.0kДж/kг
- 3 КПДКС= .990 КПДКМ= .990 КПДТМ= .990 КИСП= .50 УТОХЛ= .20
- 4 CNFBX= .987 CNFBT= .950 CNFKC= .980 CNFBЫX= .985 CNFFT= .970
- 5 Значения ПИК:
 - 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0 32.0 34.0 36.0 38.0 42.0 40.0
- 6 К.п.д. компрессора использ. данные по осевым компр., имеющиеся в программе Компрессор однокаскадный

Значения КПДКВ (соответствуют значениям ПИК):

- .890 .882 .874 .866 .858 .850 .834 .826 .818 .810 .802 .794 .786 .778 .770 .762 .754 .746 .738
- 7 Задан внутренний к.п.д. турбины по полным параметрам КПДТВ= .910
- 8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты kak для стандартного углеводородного топлива

Результаты расчета

| ПИК | T2* | тохл∗ | T5* | TG | TQ | T4A* | T4Q* | T6* | ПИТ |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| - | К | К | К | К | К | К | К | К | - |
| 4.00 | 444.4 | 344.4 | 444.4 | 1503.6 | 1599.3 | 1360.4 | 1247.6 | 1247.6 | 3.5 |
| 6.00 | 504.0 | 404.0 | 504.0 | 1480.1 | 1577.8 | 1254.3 | 1174.4 | 1174.4 | 5.3 |
| 8.00 | 551.5 | 451.5 | 551.5 | 1472.2 | 1565.5 | 1183.4 | 1120.4 | 1120.4 | 7.0 |
| 10.00 | 591.7 | 491.7 | 591.7 | 1471.9 | 1559.3 | 1131.0 | 1076.9 | 1076.9 | 8.8 |
| 12.00 | 627.2 | 527.2 | 627.2 | 1467.4 | 1559.3 | 1089.6 | 1046.2 | 1046.2 | 10.5 |
| 14.00 | 659.3 | 559.3 | 659.3 | 1467.4 | 1559.3 | 1055.6 | 1019.6 | 1019.6 | 12.3 |
| 16.00 | 688.9 | 588.9 | 688.9 | 1467.4 | 1559.3 | 1026.9 | 996.2 | 996.2 | 14.0 |
| 18.00 | 716.6 | 616.6 | 716.6 | 1467.4 | 1559.3 | 1002.2 | 975.6 | 975.6 | 15.8 |
| 20.00 | 742.8 | 642.8 | 742.8 | 1467.4 | 1559.3 | 980.5 | 957.0 | 957.0 | 17.6 |
| 22.00 | 767.8 | 667.8 | 767.8 | 1467.4 | 1559.3 | 961.1 | 940.2 | 940.2 | 19.3 |
| 24.00 | 791.7 | 691.7 | 791.7 | 1467.4 | 1559.3 | 943.8 | 925.0 | 925.0 | 21.1 |
| 26.00 | 814.8 | 714.8 | 814.8 | 1467.4 | 1559.3 | 928.0 | 910.9 | 910.9 | 22.8 |
| 28.00 | 837.3 | 737.3 | 837.3 | 1467.4 | 1559.3 | 913.6 | 898.0 | 898.0 | 24.6 |
| 30.00 | 859.2 | 759.2 | 859.2 | 1467.4 | 1559.3 | 900.3 | 886.0 | 886.0 | 26.3 |
| 32.00 | 880.7 | 780.7 | 880.7 | 1467.4 | 1559.3 | 888.0 | 874.8 | 874.8 | 28.1 |
| 34.00 | 901.8 | 801.8 | 901.8 | 1467.4 | 1559.3 | 876.6 | 864.3 | 864.3 | 29.9 |
| 36.00 | 922.4 | 822.4 | 922.4 | 1467.4 | 1559.3 | 865.9 | 854.4 | 854.4 | 31.6 |
| 38.00 | 942.9 | 842.9 | 942.9 | 1467.4 | 1559.3 | 855.9 | 845.1 | 845.1 | 33.4 |
| 40.00 | 963.2 | 863.2 | 963.2 | 1467.4 | 1559.3 | 846.4 | 836.3 | 836.3 | 35.1 |
| 42.00 | 983.4 | 883.4 | 983.4 | 1467.4 | 1559.3 | 837.5 | 827.9 | 827.9 | 36.9 |

```
- kДж/kг kДж/(kг*K) kДж/kг kДж/(kг*K) -
                                          _
                                              шт кДж/кг -
                                                            kДж/kг -
      157.9 1.0099
                     544.6 1.3158 1.75 .072 4 171.9 2.6
                                                             32.2 -.053
 4.0
 6.0
      219.1 1.0140
                     678.8 1.3044 1.83
                                         .048 5 129.8 3.2
                                                             36.6 -.036
 8.0
      268.1 1.0177
                     769.9 1.2960 1.89 .036 6 107.6 3.9
                                                             41.3 -.031
      310.2 1.0212
                     839.5 1.2893 1.95
                                          .029 7 96.0 4.7
                                                             47.4 -.032
10.0
12.0
      347.5 1.0245
                     888.1 1.2836 2.01
                                         .024 7
                                                  79.8 5.4
                                                             47.5 -.024
14.0
      381.6 1.0277
                     928.3 1.2787 2.06
                                          .021 7
                                                  68.3 6.1
                                                             48.1 -.020
16.0
      413.2 1.0307
                     962.3 1.2743 2.11
                                          .018 7
                                                  59.7 6.8
                                                             48.8 -.017
18.0
      443.0 1.0335
                     991.6 1.2704 2.17
                                          .016 7
                                                  53.0 7.5
                                                             49.7 -.015
20.0
      471.3 1.0362
                    1017.3 1.2668 2.22
                                          .014 7
                                                  47.6 8.2
                                                             50.7 -.013
                                                             51.9 -.011
22.0
      498.5 1.0389
                    1040.2 1.2634 2.27
                                          .013 7
                                                  43.2 8.9
      524.6 1.0415
                    1061.0 1.2603 2.32
                                         .012 7
                                                  39.6 9.6
24.0
                                                             53.3 -.010
26.0
      550.0 1.0440
                    1080.0 1.2573 2.38
                                         .011 7 36.5 10.4
                                                             55.0 -.009
28.0
      574.8 1.0465
                    1097.6 1.2545 2.43
                                          .010 7
                                                  33.8 11.1
                                                             56.9 -.007
30.0
      599.2 1.0489
                    1114.1 1.2518 2.49
                                         .010 7 31.5 11.8
                                                             59.1 -.006
      623.1 1.0513
                    1129.8 1.2492 2.55
                                         .009 7 29.5 12.5
                                                             61.6 -.005
32.0
      646.6 1.0536 1144.8 1.2467 2.61
34.0
                                         .009 7
                                                  27.8 13.3
                                                             64.6 -.004
36.0
      669.8 1.0558
                    1159.5 1.2443 2.67
                                          .008 7
                                                  26.2 14.0
                                                             68.0 -.004
                    1173.9 1.2419 2.74
                                         .008 7
38.0
      693.0 1.0581
                                                  24.8 14.7
                                                             72.1 -.003
                    1188.4 1.2396 2.80
                                         .007 7
                                                             76.9 -.002
40.0
      716.0 1.0603
                                                  23.5 15.4
      738.9 1.0626 1203.1 1.2374 2.87
42.0
                                         .007 7 22.4 16.1
                                                             82.6 -.001
 ПИК КПДКВ КПДТВ ОХЛ Q1
                              GB
                                     GΓ
                                            ΗE
                                                  кпдв кпде
                                                              ВУТ
                  % кДж/кг
                             kr/c
                                    kг/c kДж/kг
                                                  -
                                                        - кг/(кВт*ч) -
 4.0
     .890 .910 8.9 1521.2 183.674 173.731 353.9 .235
                                                      .230
                                                              .528 .687
 6.0
     .882 .910 7.5 1480.6 152.108 145.820 427.3 .292
                                                       .286
                                                              .426 .657
 8.0
     .874
           .910 6.8 1440.6 138.393 133.532 469.7
                                                 .330
                                                       .323
                                                              .377 .632
     .866
          .910 6.5 1401.1 131.054 126.720 496.0
                                                       .350
                                                                   .611
10.0
                                                              .347
12.0
     . 858
           .910 5.9 1371.1 127.418 123.924
                                           510.1
                                                 .376
                                                        .368
                                                              .330
                                                                    .591
14.0
     .850
          .910
                5.4 1341.5 125.381 122.428 518.4 .391
                                                       .383
                                                              .318
                                                                    .572
16.0
     .842
           .910 5.1 1312.6 124.465 121.871 522.2 .403
                                                        .394
                                                              .309
                                                                    .554
     .834
          .910 4.8 1284.3 124.343 121.991 522.7 .413
18.0
                                                       .403
                                                              .302
                                                                    .537
20.0
     .826
           .910 4.6 1256.6 124.824 122.629
                                           520.7
                                                 .420
                                                        .410
                                                              .296
                                                                    .521
           .910 4.5 1229.5 125.779 123.678 516.8 .427
22.0
     .818
                                                       .416
                                                              .292
                                                                    .505
                                                               .289
24.0
     .810
           .910 4.4 1202.9 127.117 125.063 511.3 .432
                                                        .421
                                                                    .490
           .910 4.3 1176.6 128.788 126.739 504.7 .436
                                                       .425
                                                                    .475
26.0
     .802
                                                               .286
     .794
                4.2 1150.6 130.787 128.704 497.0 .439
28.0
           .910
                                                        .428
                                                               .284
                                                                    .460
     .786
           .910 4.2 1124.8 133.088 130.934 488.4 .442
                                                       .430
                                                                    .446
30.0
                                                               .283
32.0
     .778
           .910 4.2 1099.2 135.654 133.395 479.2 .444
                                                        .432
                                                               .282
                                                                    .431
34.0
     .770
           .910
                4.2 1073.8 138.467 136.065 469.4
                                                 .445
                                                        .433
                                                               .281
                                                                    .417
36.0
     .762 .910 4.2 1048.4 141.491 138.907 459.4 .447
                                                        .434
                                                               .280
                                                                    .404
38.0
     .754 .910 4.3 1022.9 144.816 142.000 448.8 .448
                                                        .434
                                                               .280
                                                                    .390
     .746 .910 4.4 997.3 148.369 145.267 438.1 .449
                                                       .435
                                                              .280
                                                                    .377
     .738 .910 4.5 971.4 152.134 148.678 427.3 .450 .435
                                                              .279 .363
42.0
Нормальное завершение расчета
```

НТОХЛ СРМІГ АЛЬФА АЛЬФА* Z QОХЛ ПИОХЛ НОХЛ1 КАППА

ПИК

НК

CPMIB
