

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

### КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

По дисциплине «Энергетические установки»  
Газотурбинная установка мощностью 65 МВт  
(семестр 3)

Выполнил:

студент ВШЭМ СПбГУ

\_\_\_\_\_

А. К. Дмитриев

Проверил:

аспирант ВШЭМ СПбГУ

\_\_\_\_\_

А. А. Фёдоров

Санкт-Петербург — 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 3  |
| 1 Термодинамический и газодинамический расчет .....   | 4  |
| 1.1 Исходные данные .....   | 4  |
| 1.2 Методы и пример расчета параметров рабочего процесса в<br>характерных сечениях проточной части ГТУ. Определение основных<br>характеристик ГТУ ..... | 5  |
| 2 Вариантный расчет ГТУ на ЭВМ .....  | 11 |
| 2.1 Результаты расчета .....  | 11 |
| 2.2 Выбор степени повышения давления в компрессоре и начальной<br>температуры газа перед турбиной .....   | 13 |
| 3 Приближенный расчет осевого компрессора .....   | 14 |
| 4 Расчет турбины .....  | 26 |
| 4.1 Исходные данные для расчета .....   | 26 |
| 4.2 Предварительный расчет турбины .....  | 27 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....  | 31 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....  | 32 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....  | 33 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....  | 34 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

В современной энергетике газотурбинные установки (ГТУ) играют важную роль, обеспечивая надежное и эффективное производство электроэнергии. ГТУ обладают рядом преимуществ, таких как высокая мощность, быстрый запуск, возможность работы в различных климатических условиях и относительно низкие эксплуатационные затраты. Эти установки широко используются в качестве основных и резервных источников энергии, а также для балансировки энергосистем, особенно в условиях роста доли возобновляемых источников энергии.

Одной из наиболее перспективных разработок в области газотурбинных установок является ГТЭ-65 — газовая турбина мощностью 65 МВт, разработанная российскими инженерами. ГТЭ-65 представляет собой современную турбину, которая сочетает в себе высокую эффективность, надежность и экологичность. На данный момент ГТЭ-65 находится на стадии активной разработки и тестирования, что делает её перспективной для внедрения в энергетические системы различных регионов.

Целью данной курсовой работы является создание газовой турбины мощностью 65 МВт на основе ГТЭ-65. В рамках работы будут рассмотрены основные технические характеристики ГТЭ-65, анализированы её преимущества и недостатки, а также предложены пути оптимизации и улучшения конструкции для достижения заявленной мощности.

Актуальность данной работы обусловлена растущей потребностью в надежных и эффективных источниках энергии. В условиях глобального энергетического перехода и увеличения доли возобновляемых источников энергии, газотурбинные установки, такие как ГТЭ-65, становятся важным элементом энергетической инфраструктуры. Они обеспечивают стабильность энергосистем, позволяют быстро реагировать на изменения спроса и покрывать пиковые нагрузки. Кроме того, разработка и внедрение отечественных технологий в области ГТУ способствует укреплению энергетической независимости и повышению конкурентоспособности национальной энергетики.

Таким образом, создание газовой турбины мощностью 65 МВт на основе ГТЭ-65 является важной задачей, решение которой позволит удовлетворить потребности современной энергетики и обеспечить устойчивое развитие энергетической инфраструктуры.

# 1 Термодинамический и газодинамический расчет

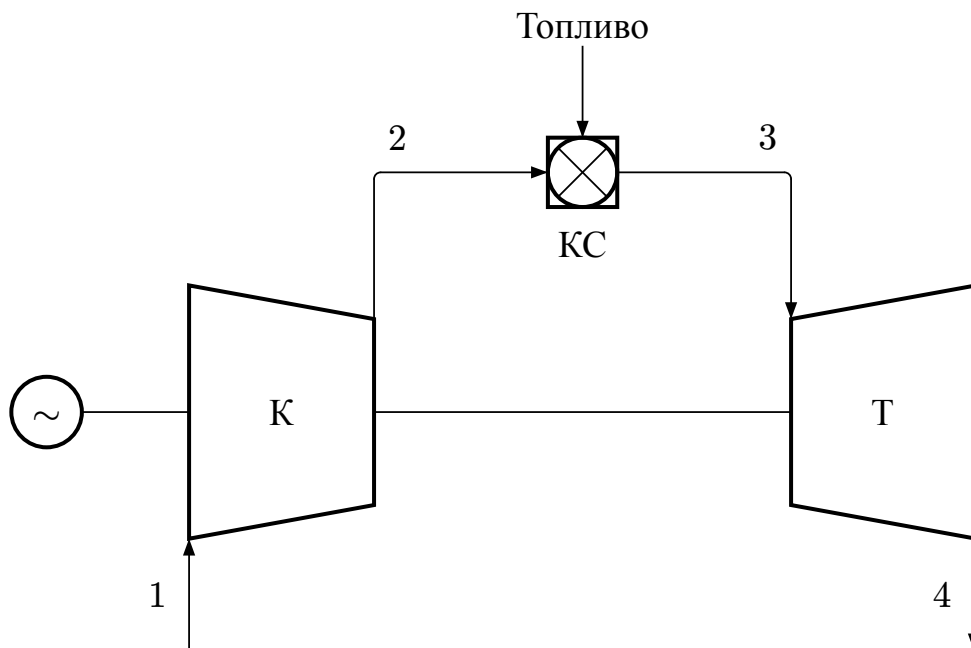
## 1.1 Исходные данные

1. Полезная мощность  $N = 6.5 \cdot 10^7$  Вт;
2. Температура газа перед турбиной  $T_3^* = 1643$  К;
3. Параметры наружного воздуха  $P_n = 1.013 \cdot 10^5$  Па,  $T_n = 288$  К;
4. Топливо — природный газ;
5. Прототип установки — ГТЭ-65, изображен в приложении Б;
6. Частота вращения вала ГТУ —  $n = 5441$  об/мин;

Примем два упрощения при расчете в разделе 1:

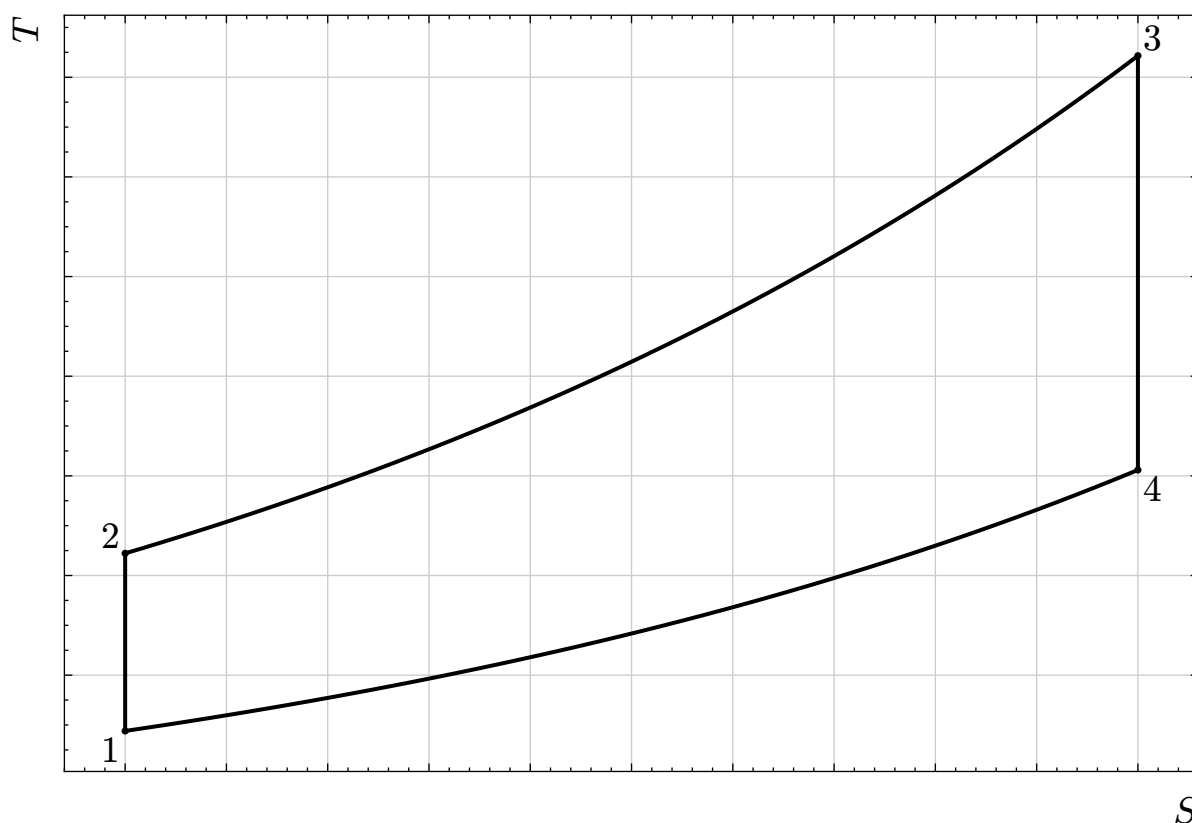
1. Охлаждение турбины не учитывается, расход охладителя равен нулю.
2. Не учитывается зависимость теплоемкости газа от температуры рабочего тела, принимается по рекомендациям пособия [1];

Рассматриваемая установка является одновальной ГТУ простого типа, тепловая схема такой установки изображена на рисунке 1.1, цикл — на рисунке 1.2.



К — компрессор, КС — камера сгорания, Т — газовая турбина

Рисунок 1.1 — Тепловая схема одновальной ГТУ



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

Рисунок 1.2 — Цикл одновальной ГТУ простого типа в T-S-диаграмме

## 1.2 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  $\pi_k^* = \frac{P_2^*}{P_1^*} = 18$ ;

Газовая постоянная воздуха:  $R_b = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

Удельная изобарная теплоемкость воздуха:  $c_{p_b} = 1030 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

Коэффициент Пуассона для воздуха:  $k_b = \frac{c_{p_b}}{c_{p_b} - R_b} = 1.386$ ;

Принимаем коэффициент потерь полного давления во входном устройстве ГТУ  $\sigma_{\text{вх}}^* = 0.99$ ;

Давление воздуха перед компрессором:

$$P_1^* = \sigma_{\text{вх}}^* \cdot P_H = 0.99 \cdot 1.013 \cdot 10^5 = 9.998 \cdot 10^4 \text{ Па}; \quad (1.1)$$

Температура воздуха перед компрессором:

$$T_1^* = T_H = 288 \text{ K}; \quad (1.2)$$

Давление воздуха за компрессором:

$$P_2^* = \pi_K^* \cdot P_1^* = 18 \cdot 9.998 \cdot 10^4 = 1.8 \cdot 10^6 \text{ Па}; \quad (1.3)$$

Определим  $T_2^*$  (температуру воздуха за компрессором):

$$T_2^* = T_H^* \cdot (\pi_K^*)^{\frac{k_B-1}{k_B}} = 288 \cdot 18^{\frac{1.386-1}{1.386}} = 644.4 \text{ K}; \quad (1.4)$$

Работа, соответствующая изоэнтروпийному перепаду в компрессоре:

$$\begin{aligned} H_{\text{ок}}^* &= C_{p_B} \cdot T_1^* \cdot \left[ (\pi_K^*)^{\frac{k_B-1}{k_B}} - 1 \right] = \\ &= 1030 \cdot 288 \cdot \left[ 18^{\frac{1.386-1}{1.386}} - 1 \right] = 3.671 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \end{aligned} \quad (1.5)$$

$\eta_{\text{к ад}} = 0.91$  — политропный КПД компрессора, его выбор для расчета обусловлен тем, что он мало зависит от степени повышения давления в компрессоре  $\pi_K^*$ .

Полезная работа в компрессоре:

$$H_K = \frac{H_{\text{ок}}^*}{\eta_{\text{к ад}}} = \frac{3.671 \cdot 10^5}{0.91} = 4.034 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \quad (1.6)$$

Принимаем коэффициент потерь полного давления в камере сгорания  $\sigma_{\text{кс}}^* = 0.98$ ;

Давление газа перед турбиной:

$$P_3^* = \sigma_{\text{кс}}^* \cdot P_2^* = 0.98 \cdot 1.8 \cdot 10^6 = 1.764 \cdot 10^6 \text{ Па}; \quad (1.7)$$

Принимаем коэффициент потерь полного давления в выходном устройстве ГТУ  $\sigma_{\text{вых}}^* = 0.98$ ;

Давление газа за турбиной:

$$P_4^* = \frac{P_H^*}{\sigma_{\text{ВЫХ}}^*} = \frac{1.013 \cdot 10^5}{0.98} = 1.028 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad (1.8)$$

Степень расширения газа в турбине:

$$\pi_T^* = \frac{P_3^*}{P_4^*} = \frac{1.764 \cdot 10^6}{1.028 \cdot 10^5} = 17.15; \quad (1.9)$$

Примем следующие значения свойств газа, расширяющегося в турбине:

- Показатель изоэнтропы  $k_T = 1.33$ ;
- Индивидуальная газовая постоянная  $R_T = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;
- Теплоёмкость  $C_{p_T} = 1160 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

Работа, соответствующая изоэнтропийному перепаду в турбине:

$$\begin{aligned} H_{\text{от}}^* &= c_{p_T} \cdot T_3^* \cdot \left[ 1 - (\pi_T^*)^{-\frac{k_T-1}{k_T}} \right] = \\ &= 1030 \cdot 1643 \cdot [1 - 17.15^{-0.2481}] = 9.644 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \end{aligned} \quad (1.10)$$

Принимаем политропный КПД турбины  $\eta_{T \text{ пол}} = 0.87$ ;

Полезная работа в турбине:

$$H_T = H_{\text{от}}^* \cdot \eta_{T \text{ пол}} = 9.644 \cdot 10^5 \cdot 0.87 = 8.39 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \quad (1.11)$$

Температура газа за турбиной  $T_4^*$  определяется как:

$$T_4^* = T_3^* \cdot (\pi_T^*)^{-\frac{k_T-1}{k_T}} = 1643 \cdot 17.15^{-0.2481} = 811.8 \text{ К}; \quad (1.12)$$

Примем коэффициенты механических потерь в турбине и компрессоре  $\eta_{\text{MT}} = 0.99$ ,  $\eta_{\text{МК}} = 0.99$ , тогда расход воздуха через компрессор:

$$G_B = \frac{N_e}{H_T \cdot \eta_{\text{MT}} - \frac{H_K}{\eta_{\text{МК}}}} = \frac{6.5 \cdot 10^7}{8.39 \cdot 10^5 \cdot 0.99 - \frac{4.034 \cdot 10^5}{0.99}} = 153.6 \text{ кг/с}; \quad (1.13)$$

Теплота с учетом потерь в камере сгорания:

$$\begin{aligned} Q'_1 &= c_{p_r} \cdot (T_3^* - T_2^*) = \\ &= 1160 \cdot (1643 - 644.4) = 1.159 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}; \end{aligned} \quad (1.14)$$

Примем КПД камеры сгорания  $\eta_{\text{КС}} = 0.99$ , тогда расход теплоты:

$$Q_1 = \frac{Q'_1}{\eta_{\text{КС}}} = \frac{1.159 \cdot 10^6}{0.99} = 1.17 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}; \quad (1.15)$$

Эффективный КПД ГТУ:

$$\eta_e = \frac{H_{\text{Т}} \cdot \eta_{\text{МТ}} - \frac{H_{\text{К}}}{\eta_{\text{МК}}}}{Q_1} = \frac{8.39 \cdot 10^5 \cdot 0.99 - \frac{4.034 \cdot 10^5}{0.99}}{1.17 \cdot 10^6} = 0.3616; \quad (1.16)$$

Коэффициент полезной работы ГТУ:

$$\varphi = \frac{H_{\text{Т}} \cdot \eta_{\text{МТ}} - \frac{H_{\text{К}}}{\eta_{\text{МК}}}}{H_{\text{Т}} \cdot \eta_{\text{МТ}}} = \frac{8.39 \cdot 10^5 \cdot 0.99 - \frac{4.034 \cdot 10^5}{0.99}}{8.39 \cdot 10^5 \cdot 0.99} = 0.5094; \quad (1.17)$$

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

$$\begin{aligned} g_{\text{В}} &= \frac{Q_p^{\text{н}} \cdot \eta_{\text{КС}} + h_{\text{Т}} + L_0 \cdot c_{p_{\text{В}}} \cdot t_2^* - (L_0 + 1) \cdot (c_{p_{\text{Г}}})_{\alpha=1} \cdot t_3^*}{c_{p_{\text{В}}} \cdot (t_3^* - t_2^*)} = \\ &= \frac{4.43 \cdot 10^7 \cdot 0.99 + 0 + 15 \cdot 1030 \cdot 371.3 - (15 + 1) \cdot 1200 \cdot 1370}{1030 \cdot (1370 - 1370)} = 22.64, \end{aligned} \quad (1.18)$$

где  $Q_p^{\text{н}}$  — низшая теплота сгорания топлива ( $Q_p^{\text{н}} = 4.43 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$ );

$h_{\text{Т}}$  — энтальпия топлива (пренебрежимо мала);

$(C_{p_{\text{Г}}})_{\alpha=1}$  — удельная теплоемкость газа при  $\alpha = 1$  ( $(C_{p_{\text{Г}}})_{\alpha=1} = 1200 \text{ Дж/кг}$ );

$L_0$  — стехиометрический коэффициент (принимается  $L_0 = 15$ ).



Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания:

$$\alpha = \frac{L_0 + g_b}{L_0} = \frac{15 + 22.64}{15} = 2.509; \quad (1.19)$$

Относительный расход топлива:

$$g_T = \frac{1}{\alpha \cdot L_0} = \frac{1}{2.509 \cdot 15} = 0.02657; \quad (1.20)$$

Примем допустимую температуру для стали:  $T_{ст} = 1100$  К;

Относительный расход воздуха для охлаждения статора:

$$\begin{aligned} g_{охл}^c &= 0.11 + 0.25 \cdot 10^{-4} \cdot (T_3^* - T_{ст}) = \\ &= 0.11 + 0.25 \cdot 10^{-4} \cdot (1643 - 1100) = 0.02358; \end{aligned} \quad (1.21)$$

Относительный расход воздуха для охлаждения ротора:

$$\begin{aligned} g_{охл}^p &= 0.08 + 0.22 \cdot 10^{-4} \cdot (T_3^* - T_{ст}) = \\ &= 0.08 + 0.22 \cdot 10^{-4} \cdot (1643 - 1100) = 0.09195; \end{aligned} \quad (1.22)$$

Общий относительный расход воздуха для охлаждения турбины:

$$g_{охл} = \sigma_{yT} \cdot (g_{охл}^c + g_{охл}^p) = 0.2 \cdot (0.02358 + 0.09195) = 0.02311; \quad (1.23)$$

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

$$\begin{aligned} g'_{охл} &= \frac{(1 + g_T) \cdot g_{охл}}{1 + (1 + g_T) \cdot g_{охл}} = \\ &= \frac{(1 + 0.02657) \cdot 0.02311}{1 + (1 + 0.02657) \cdot 0.02311} = 0.02317; \end{aligned} \quad (1.24)$$

Расход топлива:

$$\begin{aligned} G_T &= g_T \cdot (1 - g'_{\text{охл}}) \cdot G_B = \\ &= 0.02657 \cdot (1 - 0.02317) \cdot 153.6 = 3.987 \text{ кг/с}; \end{aligned} \quad (1.25)$$

Коэффициент располагаемой мощности:

$$\Omega_{\text{рас}} = H_{\text{от}}^* \cdot \frac{G_B}{G_T} = 9.644 \cdot 10^5 \cdot \frac{153.6}{3.987} = 3.716 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}; \quad (1.26)$$

Удельная эффективная работа ГТУ:

$$\begin{aligned} H_e &= (1 + g_T) \cdot (1 - g'_{\text{охл}}) \cdot H_T \cdot \eta_{\text{MT}} - \frac{H_K}{\eta_{\text{МК}}} = \\ &= (1 + 0.02657) \cdot (1 - 0.02317) \cdot 8.39 \cdot 10^5 \cdot 0.99 - \frac{4.034 \cdot 10^5}{0.99} = \\ &= 4.336 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \end{aligned} \quad (1.27)$$

Коэффициент полезной мощности:

$$\Omega_{\text{пол}} = H_e^* \cdot \frac{G_B}{G_T} = 4.336 \cdot 10^5 \cdot \frac{153.6}{3.987} = 1.671 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}. \quad (1.28)$$

## 2 Вариантный расчет ГТУ на ЭВМ

Проведен 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 построены графики:  $H_e, \eta_e, \varphi = f(\pi_k^*, T_3^*)$ .

### 2.1 Результаты расчета

Графики на рисунках 2.1, 2.2 и 2.3 отражают результаты расчета. Полные результаты расчета смотреть в Приложении Б.

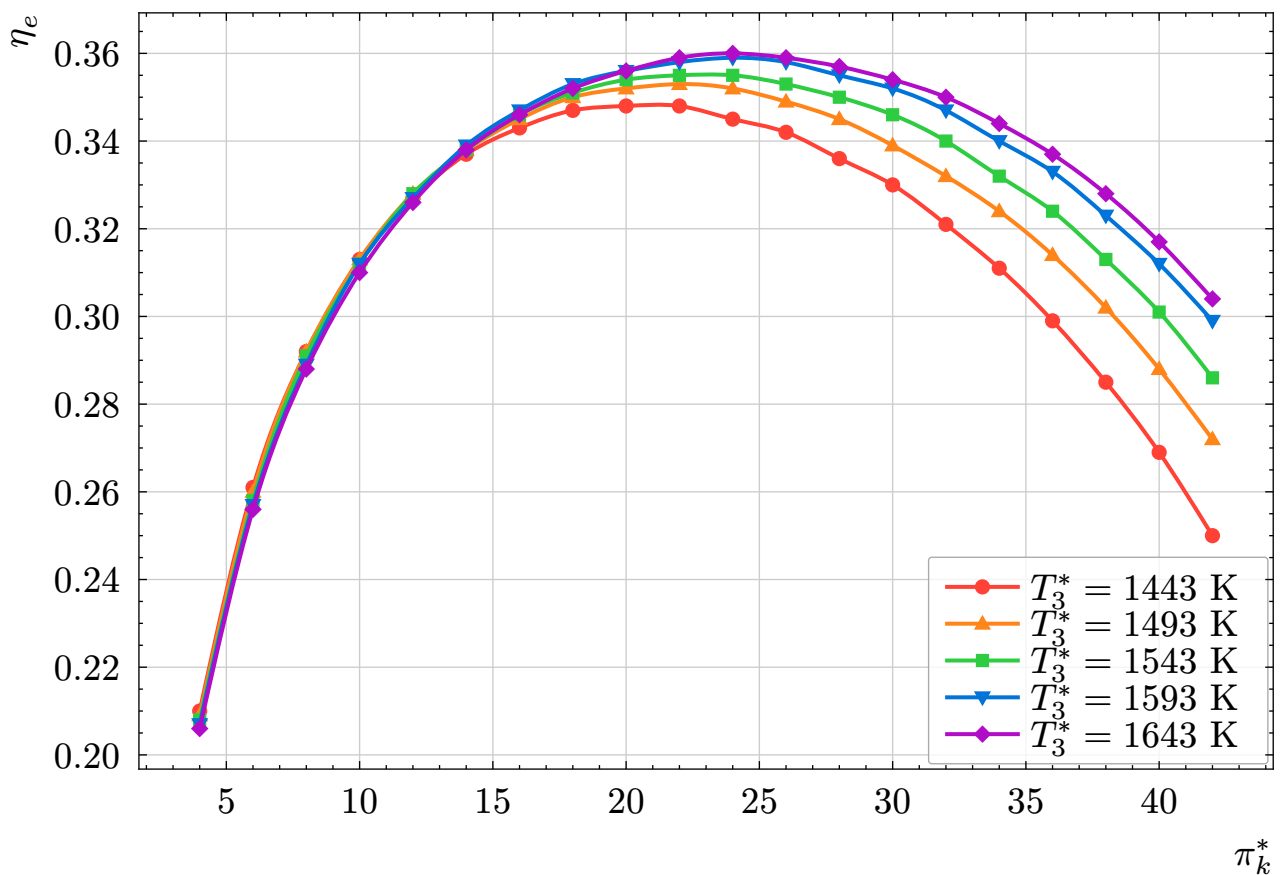


Рисунок 2.1 — Зависимость эффективного КПД ГТУ от степени повышения давления в компрессоре, при различных значениях температуры

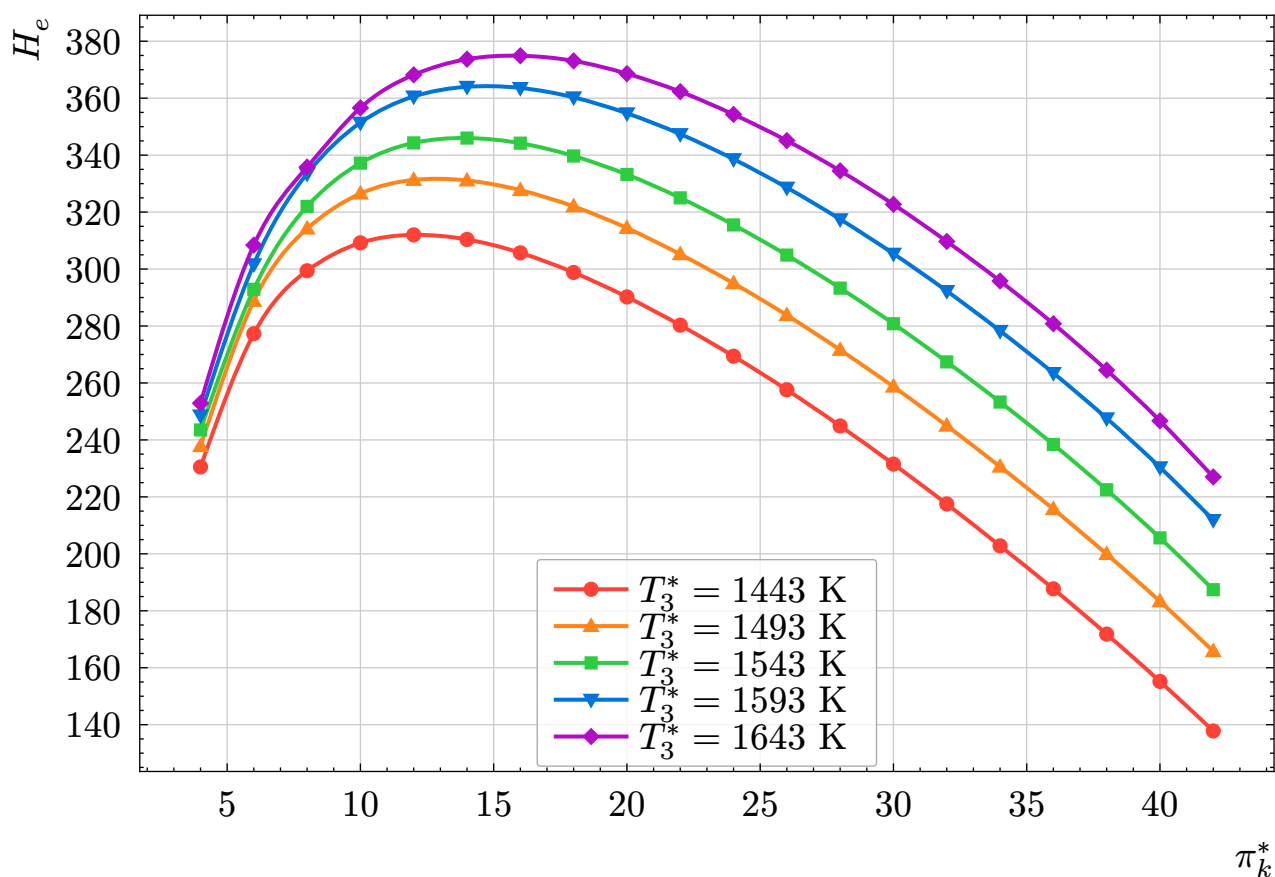


Рисунок 2.2 — Зависимость эффективной удельной работы ГТУ от степени повышения давления в компрессоре, при различных значениях температуры

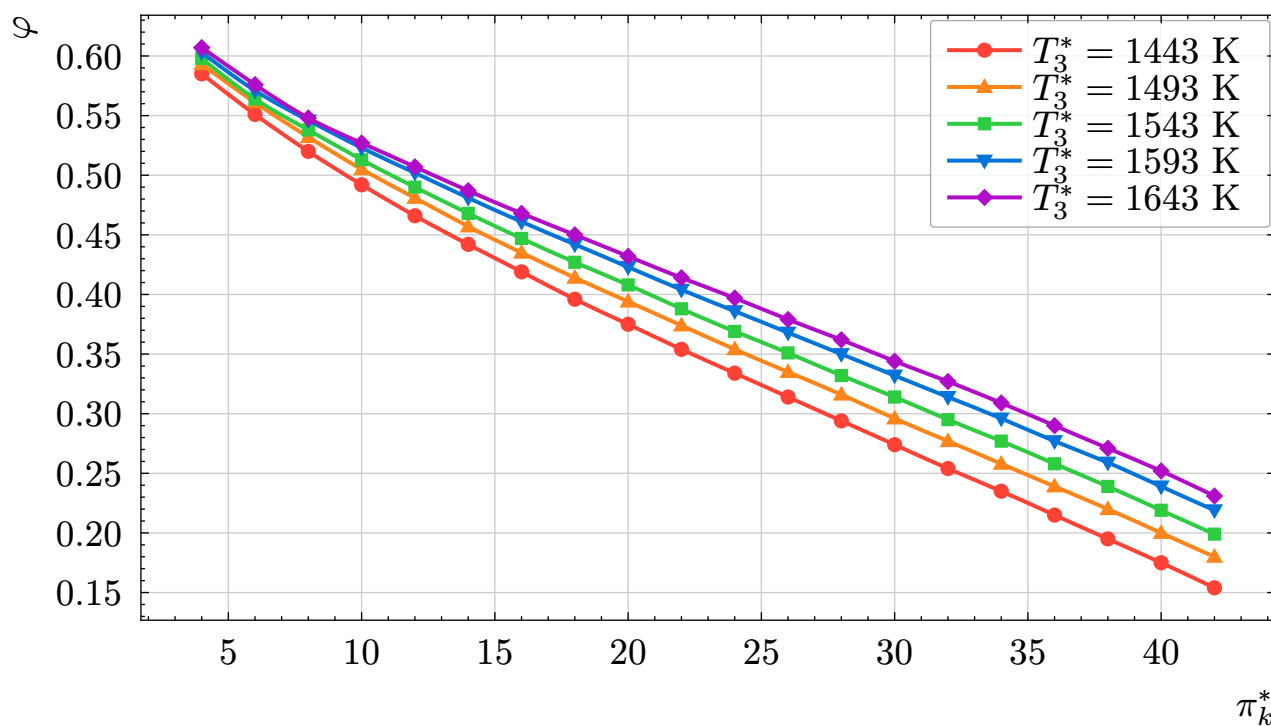


Рисунок 2.3 — Зависимость коэффициента полезной работы ГТУ от степени повышения давления в компрессоре, при различных значениях температуры

## 2.2 Выбор степени повышения давления в компрессоре и начальной температуры газа перед турбиной

Максимальный КПД установки достигается при максимальной температуре газа перед турбиной – 1643 К. Жаростойкость материала лопаток турбины позволяет выдерживать такую температуру, поэтому в качестве входной температуры на турбину выбрана именно эта температура. Экстремум графика зависимости эффективного КПД ГТУ от степени повышения давления в компрессоре наблюдается при  $\pi_k^* = 24$  и  $\eta_e = 0.360$ . Выбор такой степени сжатия не оправдан, 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  $\pi_k^* = 16$ , значение эффективного КПД ГТУ при этом  $\eta_e = 0.346$ . Коэффициент полезной работы ГТУ с увеличением степени повышения давления  $\pi_k^*$  монотонно уменьшается, однако уменьшение  $\pi_k^*$  с целью его увеличения нецелесообразно, поскольку величина коэффициента полезной работы ГТУ увеличивается незначительно, при этом снижается величина эффективного внутреннего КПД и эффективной удельной работы.

Таким образом, для дальнейших расчетов принимаем:

$$T_3^* = 1643 \text{ К}, \pi_k^* = 16.$$

### 3 Приближенный расчет осевого компрессора

Расчет производится в соответствии со схематическими продольными разрезами на рисунке 3.1 и рисунке 3.2 по методике из пособия [2].

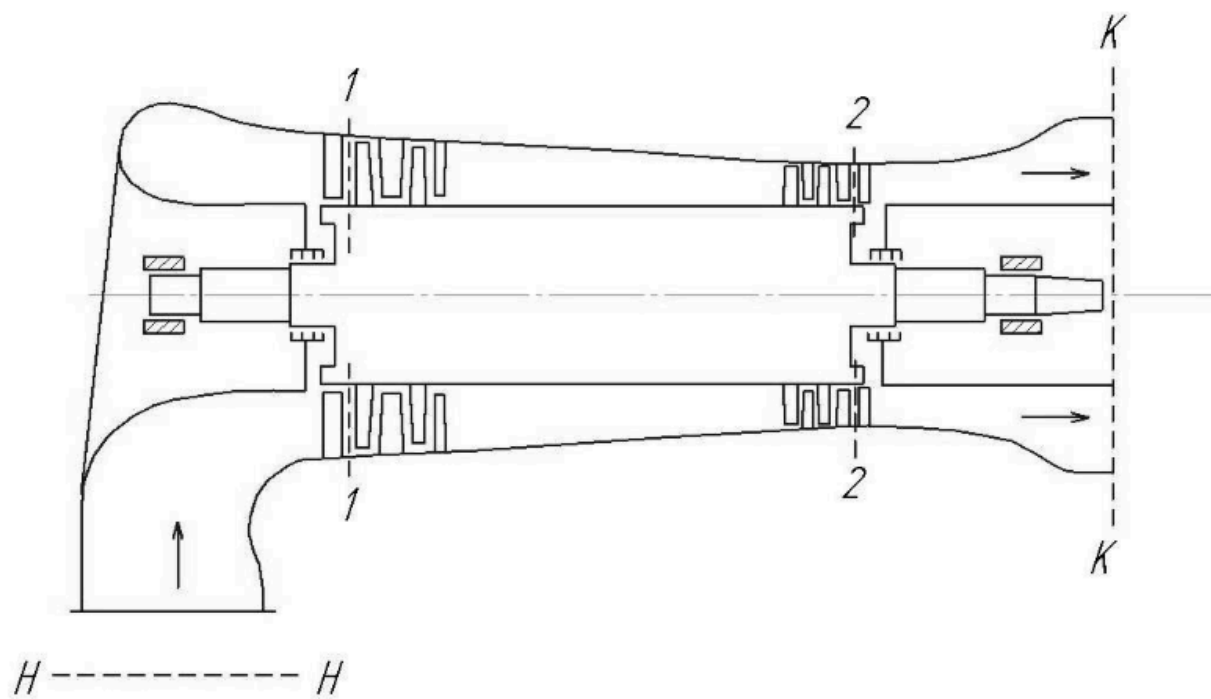


Рисунок 3.1 — Схема многоступенчатого осевого компрессора

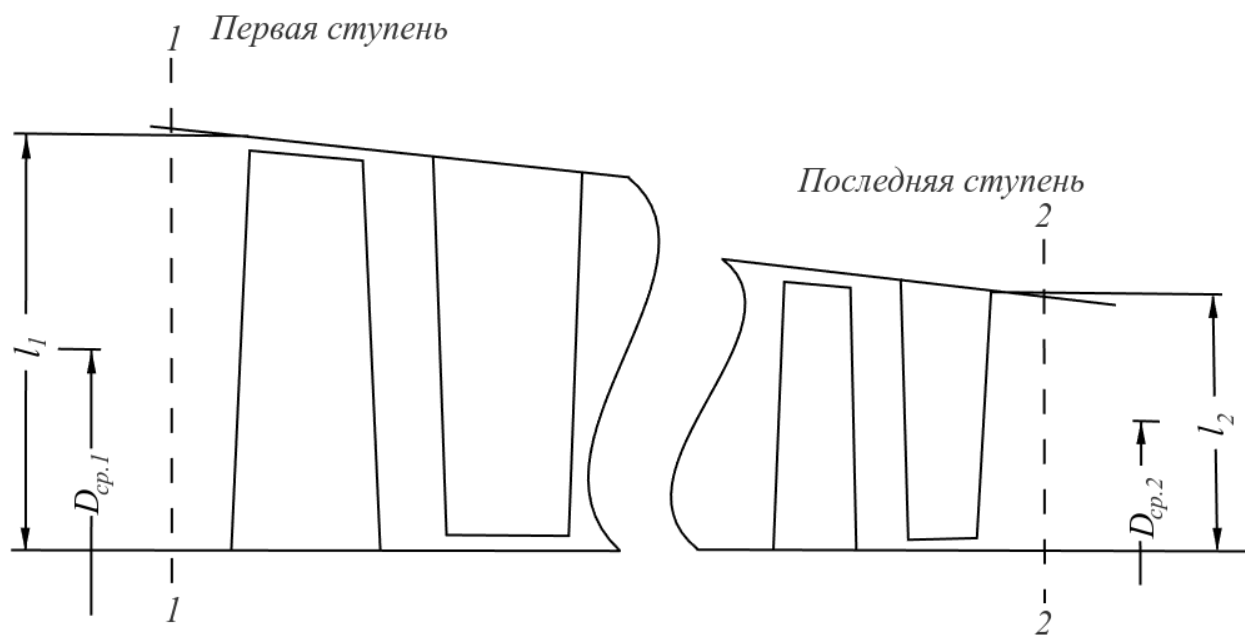


Рисунок 3.2 — Схема первой и последней ступеней компрессора

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. 3.1). Определим параметры  $P$  и  $T$  в этих двух сечениях:

Давление воздуха в сечении 1-1:

$$P_1^* = \sigma_{\text{вх}}^* \cdot P_{\text{н}} = 0.99 \cdot 1.013 \cdot 10^5 = 1.003 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad (3.1)$$

где  $\sigma_{\text{вх}}^*$  — коэффициент уменьшения полного давления во входной части компрессора (принимаем  $\sigma_{\text{вх}}^* = 0.99$ ).

Температура в сечении 1-1:

$$T_1^* = T_{\text{н}} = 288 \text{ К}; \quad (3.2)$$

Давление воздуха в сечении К-К:

$$P_{\text{к}}^* = P_{\text{н}} \cdot \pi_{\text{к}}^* = 1.013 \cdot 10^5 \cdot 16 = 1.621 \cdot 10^6 \text{ Па}, \quad (3.3)$$

где  $\pi_{\text{к}}^*$  — степень повышения давления компрессора (из первичного расчета  $\pi_{\text{к}}^* = 16$ ).

Давление в сечении 2-2:

$$P_2^* = \frac{P_{\text{к}}^*}{\sigma_{\text{вых}}^*} = \frac{1.621 \cdot 10^6}{0.98} = 1.654 \cdot 10^6 \text{ Па}, \quad (3.4)$$

где  $\sigma_{\text{вых}}^*$  — коэффициент уменьшения полного давления в выходной части компрессора (принимаем  $\sigma_{\text{вых}}^* = 0.98$ ).

Значение плотностей:

$$\rho_1 = \frac{P_1^*}{R_{\text{в}} \cdot T_1^*} = \frac{1.003 \cdot 10^5}{287 \cdot 288} = 1.213 \text{ кг/м}^3; \quad (3.5)$$

Примем КПД компрессора  $\eta_{\text{ад}}^* = 0.88$ , тогда:

$$\rho_2 = \rho_1 \left( \frac{P_2^*}{P_1^*} \right)^{\frac{1}{n}} = 1.213 \left( \frac{1.654 \cdot 10^6}{1.003 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1}{1.463}} = 8.238 \text{ кг/м}^3, \quad (3.6)$$

где  $n$  — показатель политропы определяется из равенства:

$$\begin{aligned} \frac{k_{\text{в}}}{k_{\text{в}} - 1} \cdot \eta_{\text{ад}}^* &= \frac{n}{n - 1} \\ \frac{1.386}{1.386 - 1} \cdot 0.91 &= \frac{n}{n - 1} \Rightarrow n = 1.463; \end{aligned} \quad (3.7)$$

Примем величины осевой составляющей абсолютных скоростей в сечениях 1-1 и 2-2 соответственно  $C_{z_1} = 140$  м/с и  $C_{z_2} = 120$  м/с. Втулочное отношение выберем  $\nu_1 = D_{\text{вт}_1} / D_{\text{н}_1} = 0.5$ . Расход воздуха  $G_{\text{в}} = 153.6$  кг/с.

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

$$G_{\text{в}} = \rho_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{н}_1}^2 - D_{\text{вт}_1}^2) \cdot C_{z_1} = \rho_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (1 - \nu_1^2) \cdot D_{\text{н}_1}^2 \cdot C_{z_1}, \quad (3.8)$$

откуда,

$$\begin{aligned} D_{\text{н}_1} &= \sqrt{\frac{4G_{\text{в}}}{\rho_1 \cdot \pi \cdot (1 - \nu_1^2) \cdot C_{z_1}}} = \\ &= \sqrt{\frac{4 \cdot 153.6}{1.213 \cdot \pi \cdot (1 - 0.5^2) \cdot 140}} = 1.239 \text{ м}; \end{aligned} \quad (3.9)$$

Диаметр втулки первой ступени:

$$D_{\text{вт}_1} = \nu_1 \cdot D_{\text{н}_1} = 0.5 \cdot 1.239 = 0.6195 \text{ м}; \quad (3.10)$$



Средний диаметр первой ступени:

$$D_{cp1} = \frac{D_{H1} + D_{BT1}}{2} = \frac{1.239 + 0.6195}{2} = 0.9293 \text{ м}; \quad (3.11)$$

Длина рабочей лопатки первой ступени:

$$l_1 = \frac{D_{H1} - D_{BT1}}{2} = \frac{1.239 - 0.6195}{2} = 0.3098 \text{ м}; \quad (3.12)$$

Размеры проходного сечения 2-2:

$$F_2 = \frac{G_B}{C_{z2} \cdot \rho_2} = \frac{153.6}{120 \cdot 8.238} = 0.1554 \text{ м}^2; \quad (3.13)$$

Принимаем в проточной части  $D_{cp} = \text{const}$ , тогда:

$$\nu_2 = \frac{\pi \cdot D_{cp}^2 - F_2}{\pi \cdot D_{cp}^2 + F_2} = \frac{\pi \cdot 0.9293^2 - 0.1554}{\pi \cdot 0.9293^2 + 0.1554} = 0.8916; \quad (3.14)$$

Длина рабочей лопатки на последней ступени:

$$\begin{aligned} l_2 &= (1 - \nu_2) \sqrt{\frac{F_2}{\pi(1 - \nu_2^2)}} = \\ &= (1 - 0.8916) \sqrt{\frac{0.1554}{\pi(1 - 0.8916^2)}} = 0.05323 \text{ м}; \end{aligned} \quad (3.15)$$

Для обеспечения требуемой частоты вращения необходимо задать окружную скорость на наружном диаметре первой ступени  $u_{H1} = 353 \text{ м/с}$ , тогда:

$$n = \frac{60 \cdot u_{H1}}{\pi \cdot D_{H1}} = \frac{60 \cdot 353}{\pi \cdot 1.239} = 5441 \text{ об/мин.} \quad (3.16)$$

Таким образом, для соединения вала турбоагрегата с валом генератора необходимо использовать редуктор, понижающий обороты до 3000 об/мин, передаточное отношение которого  $Z = 3000/5441$ .

Адиабатический напор в проточной части компрессора по полным параметрам:

$$\begin{aligned} H_{\text{ад. пр. ч.}}^* &= \frac{k_{\text{в}}}{k_{\text{в}} - 1} \cdot R_{\text{в}} \cdot T_1^* \cdot \left[ \left( \frac{P_2^*}{P_1^*} \right)^{\frac{k_{\text{в}} - 1}{k_{\text{в}}}} - 1 \right] = \\ &= \frac{1.386}{1.386 - 1} \cdot 287 \cdot 288 \cdot \left[ \left( \frac{1.654 \cdot 10^6}{1.003 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1.386 - 1}{1.386}} - 1 \right] = 3.511 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \end{aligned} \quad (3.17)$$

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

$$H_{\text{к}}^* = \frac{H_{\text{ад. пр. ч.}}^*}{\eta_{\text{ад}}^*} = \frac{3.511 \cdot 10^5}{0.88} = 3.99 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \quad (3.18)$$

Выберем средний теоретический напор  $h_{\text{ср}} = 2.5 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}$ .

Число ступеней компрессора:

$$i = \left\lceil \frac{H_{\text{к}}^*}{h_{\text{ср}}} \right\rceil = \left\lceil \frac{3.99 \cdot 10^5}{2.5 \cdot 10^4} \right\rceil = 16; \quad (3.19)$$

Теоретический напор в первой ступени:

$$h_1 = (0.6...0.7) \cdot h_{\text{ср}} = 0.65 \cdot 2.5 \cdot 10^4 = 1.625 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}; \quad (3.20)$$

Теоретический напор в средних ступенях:

$$h_{\text{ср. ст.}} = (1.1...1.2) \cdot h_{\text{ср}} = 1.129 \cdot 2.5 \cdot 10^4 = 2.824 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}; \quad (3.21)$$

Теоретический напор в последней ступени:

$$h_{\pi} = (0.95...1) \cdot h_{\text{ср}} = 1 \cdot 2.5 \cdot 10^4 = 2.5 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг}; \quad (3.22)$$

Считая рост напора в ступенях от и его падение в ступенях линейным, изобразим распределение напора на рисунке 3.3:

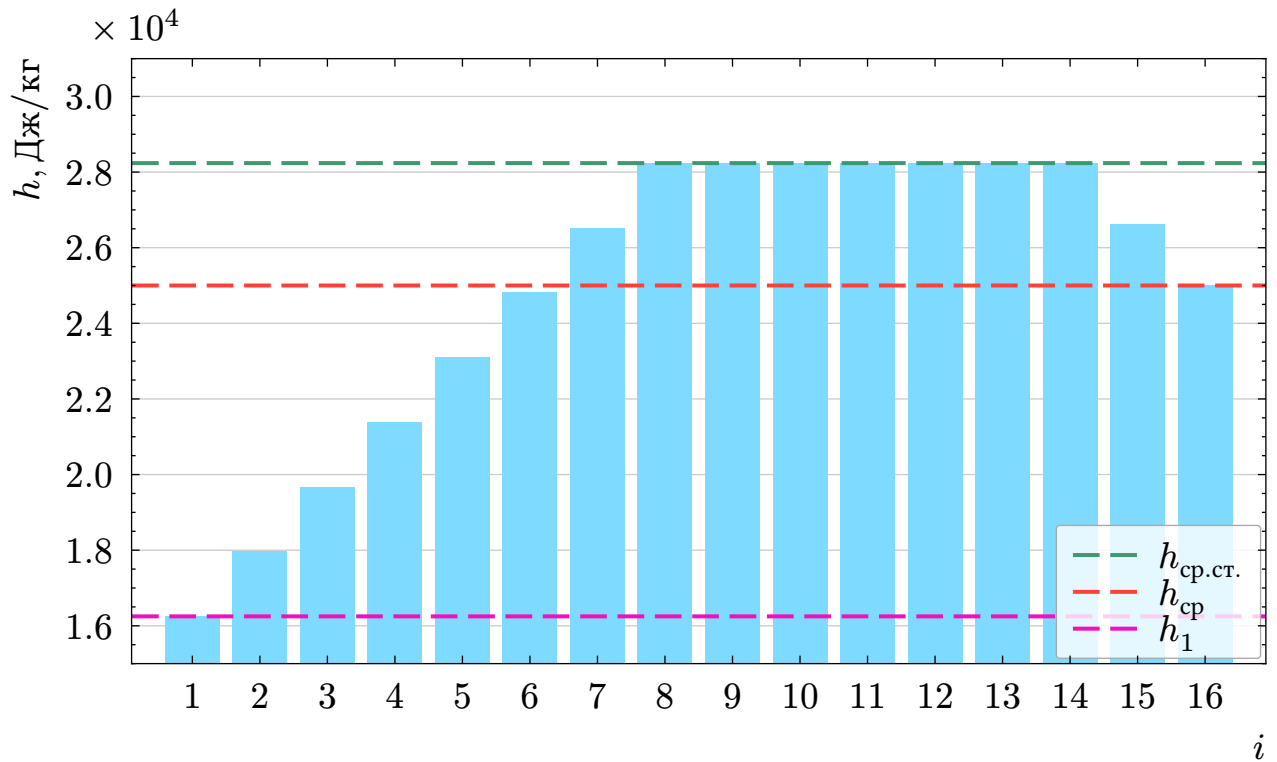


Рисунок 3.3 — Распределение теоретического напора по ступеням компрессора

В результате распределения напоров соблюдается условие:

$$\sum h_i = H_k^* = 3.99 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}. \quad (3.23)$$

Уточняем величину окружной скорости на среднем диаметре первой ступени:

$$u_{\text{ср1}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{ср1}} \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.9293 \cdot 5441}{60} = 264.7 \text{ м/с}; \quad (3.24)$$

Производим расчет первой ступени по среднему диаметру:

Коэффициент расхода на среднем диаметре:

$$\varphi = \frac{C_{z_1}}{u_{cp1}} = \frac{140}{264.7} = 0.5288; \quad (3.25)$$

Коэффициент теоретического напора:

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{u_{cp1}^2} = \frac{1.625 \cdot 10^4}{264.7^2} = 0.2319; \quad (3.26)$$

Отношение:

$$\frac{\bar{h}_1}{\varphi} = \frac{0.2319}{0.5288} = 0.4384; \quad (3.27)$$

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

$$\frac{\Omega}{\varphi} = \frac{0.5}{0.5288} = 0.9455; \quad (3.28)$$

По графику на рисунке 3.4 находим  $\left(\frac{\bar{h}_1}{\varphi}\right)_{\frac{b}{t}=1} = 0.65;$

Коэффициент:

$$J = \frac{\left(\frac{\bar{h}_1}{\varphi}\right)}{\left(\frac{\bar{h}_1}{\varphi}\right)_{\frac{b}{t}=1}} = \frac{0.4384}{0.65} = 0.6745; \quad (3.29)$$

Пользуясь графиком на рисунке 3.5 определяем  $\frac{b}{t} = \frac{1}{1.739} \rightarrow \frac{t}{b} = 1.739.$

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

$$\left(\frac{t}{b}\right)_{\text{вт}} = \frac{t}{b} \cdot \frac{D_{\text{вт1}}}{D_{\text{cp1}}} = 1.739 \cdot \frac{0.6195}{0.9293} = 1.159. \quad (3.30)$$

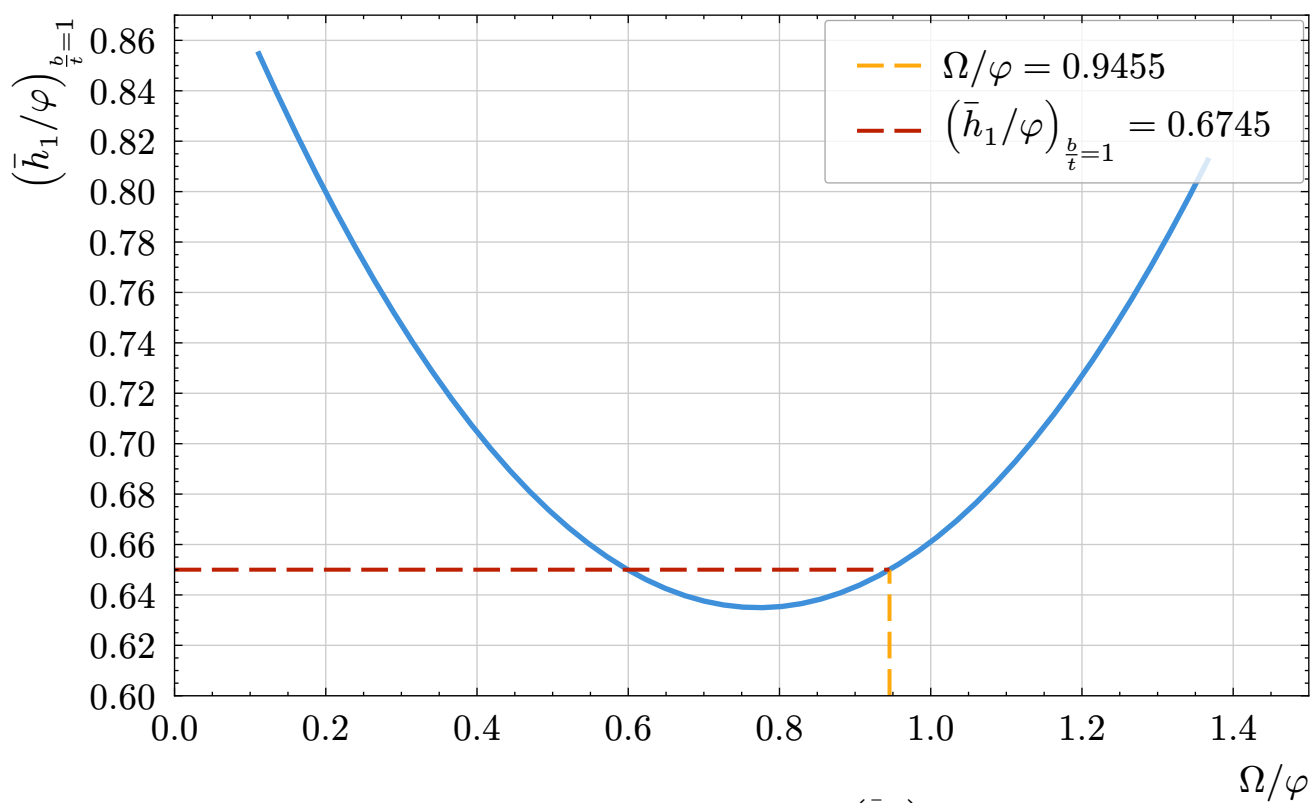


Рисунок 3.4 — график зависимости  $\left(\frac{\bar{h}_1}{\varphi}\right)_{\frac{b}{t}=1}$  от  $\frac{\Omega}{\varphi}$

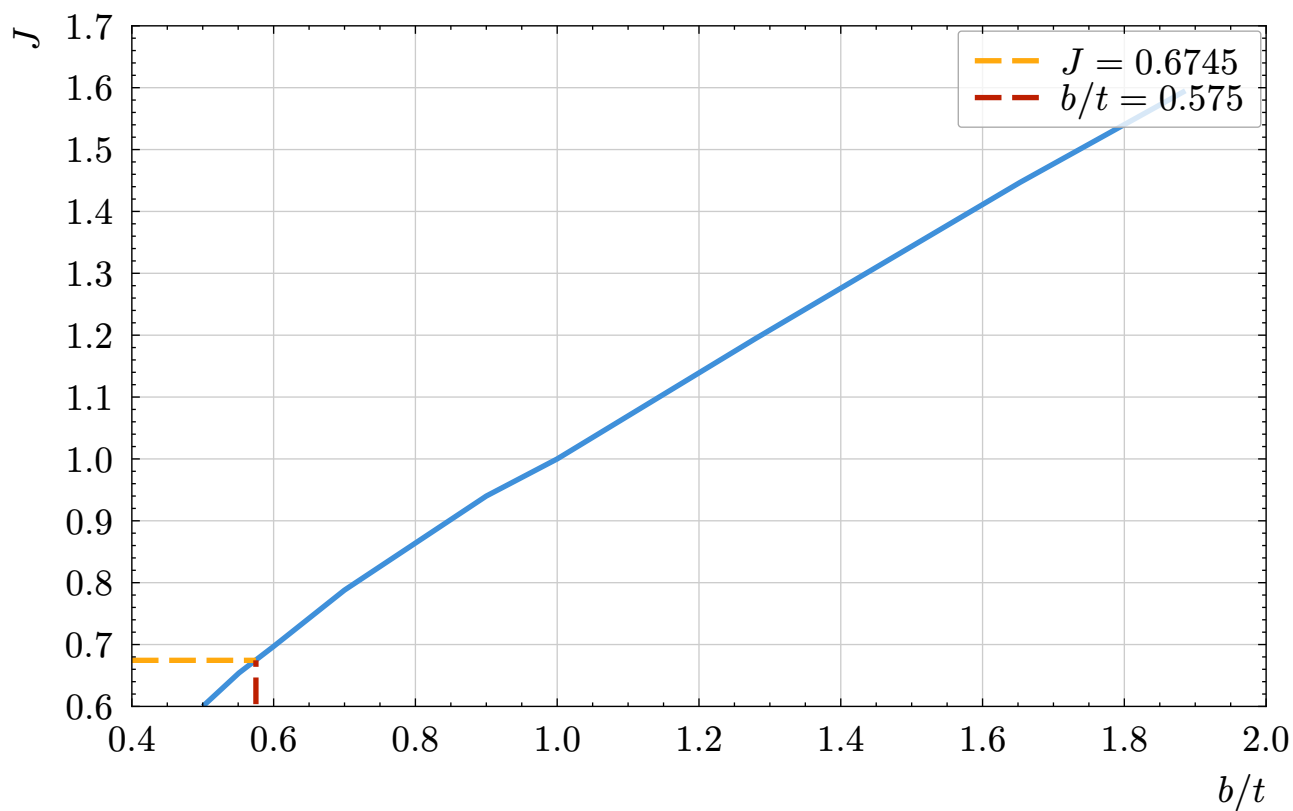


Рисунок 3.5 — график зависимости коэффициента  $J$  от густоты решетки

Окружные скорости на входе и на выходе из рабочего колеса принимаем одинаковыми, т. е.  $u_{cp1} = u_{cp2} = u = 264.7$  м/с.

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

$$\begin{aligned} C_{u_1} &= u(1 - \Omega) - \frac{h_1}{2u} = \\ &= 264.7 \cdot (1 - 0.5) - \frac{1.625 \cdot 10^4}{2 \cdot 264.7} = 101.7 \text{ м/с;} \end{aligned} \quad (3.31)$$

На выходе из рабочего колеса:

$$\begin{aligned} C_{u_2} &= u(1 - \Omega) + \frac{h_1}{2u} = \\ &= 264.7 \cdot (1 - 0.5) + \frac{1.625 \cdot 10^4}{2 \cdot 264.7} = 163.1 \text{ м/с;} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Абсолютная скорость на входе в рабочее колесо:

$$C_1 = \sqrt{C_{z_1}^2 + C_{u_1}^2} = \sqrt{140^2 + 120^2} = 173 \text{ м/с;} \quad (3.33)$$

Угол наклона вектора абсолютной скорости на входе в рабочее колесо:

$$a_1 = \text{arcctg} \left( \frac{C_{u_1}}{C_{z_1}} \right) = \text{arctg} \left( \frac{101.7}{140} \right) = 54.01^\circ; \quad (3.34)$$

Температура воздуха перед рабочим колесом:

$$T_1 = T_1^* - \frac{C_1^2}{2 \cdot \frac{k_B}{k_B - 1} \cdot R_B} = 288 - \frac{173^2}{2 \cdot \frac{1.386}{1.386 - 1} \cdot 287} = 273.5\text{K}; \quad (3.35)$$

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

$$W_{u_1} = C_{u_1} - u = 101.7 - 264.7 = -163.1 \text{ м/с}; \quad (3.36)$$

Относительная скорость на входе в колесо:

$$W_1 = \sqrt{C_{z_1}^2 + W_{u_1}^2} = \sqrt{140^2 + (-163.1)^2} = 214.9 \text{ м/с}; \quad (3.37)$$

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

$$M_{W_1} = \frac{W_1}{\sqrt{k_B \cdot R_B \cdot T_1}} = \frac{214.9}{\sqrt{1.386 \cdot 287 \cdot 273.5}} = 0.6516; \quad (3.38)$$

Наклон входной относительной скорости при отсчете от отрицательного направления оси  $u$  характеризуется углом  $\beta$ :

$$\beta_1 = \text{arccctg} \left( \frac{W_{u_1}}{C_{z_1}} \right) = \text{arccctg} \left( \frac{-163.1}{140} \right) = 40.65^\circ; \quad (3.39)$$

Уменьшение осевой составляющей скорости в одной ступени:

$$\Delta C_z = \frac{C_{z_1} - C_{z_2}}{i} = \frac{140 - 120}{16} = 1.25 \text{ м/с}; \quad (3.40)$$

Осевая составляющая скорости на выходе из рабочего колеса первой ступени:

$$C_{z_2} = C_{z_1} - \frac{\Delta C_z}{2} = 140 - \frac{1.25}{2} = 139.4 \text{ м/с}; \quad (3.41)$$

Абсолютная скорость на выходе в рабочее колесо:

$$C_2 = \sqrt{C_{z_2}^2 + C_{u_2}^2} = \sqrt{139.4^2 + 163.1^2} = 214.5 \text{ м/с}; \quad (3.42)$$

Угол наклона вектора для построения треугольников скоростей:

$$a_2 = \text{arctg} \left( \frac{C_{u_2}}{C_{z_2}} \right) = \text{arctg} \left( \frac{163.1}{139.4} \right) = 40.52^\circ; \quad (3.43)$$

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

$$W_{u_2} = C_{u_2} - u = 163.1 - 264.7 = -101.7 \text{ м/с}; \quad (3.44)$$

Относительная скорость на выходе из колеса:

$$W_2 = \sqrt{C_{z_2}^2 + W_{u_2}^2} = \sqrt{120^2 + (-101.7)^2} = 172.5 \text{ м/с}; \quad (3.45)$$

Наклон выходной относительной скорости:

$$\beta_2 = \text{arctg} \left( \frac{W_{u_2}}{C_{z_2}} \right) = \text{arctg} \left( \frac{-101.7}{120} \right) = 53.89^\circ; \quad (3.46)$$

Угол поворота в решетке рабочего колеса:

$$\varepsilon = \beta_2 - \beta_1 = 53.89^\circ - 40.65^\circ = 13.24^\circ; \quad (3.47)$$

Коэффициент расхода на внешнем диаметре:

$$\varphi_H = \frac{C_{z_1}}{u_{H_1}} = \frac{140}{353} = 0.3966; \quad (3.48)$$



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

$$M_{W_c} = u_{H_1} \cdot \frac{\sqrt{1 + \varphi_H^2}}{\sqrt{k_B \cdot R_B \cdot T_1^*}} = 353 \cdot \frac{\sqrt{1 + 0.3966^2}}{\sqrt{1.386 \cdot 287 \cdot 288}} = 1.122; \quad (3.49)$$

Сверхзвуковое число  $M_{W_c}$  свидетельствует о необходимости профилирования лопаточного аппарата первой ступени турбины по закону  $\Omega = \text{const}$  вдоль радиуса.

На рисунке 3.6 приведён построенный по полученным данным треугольник скоростей:

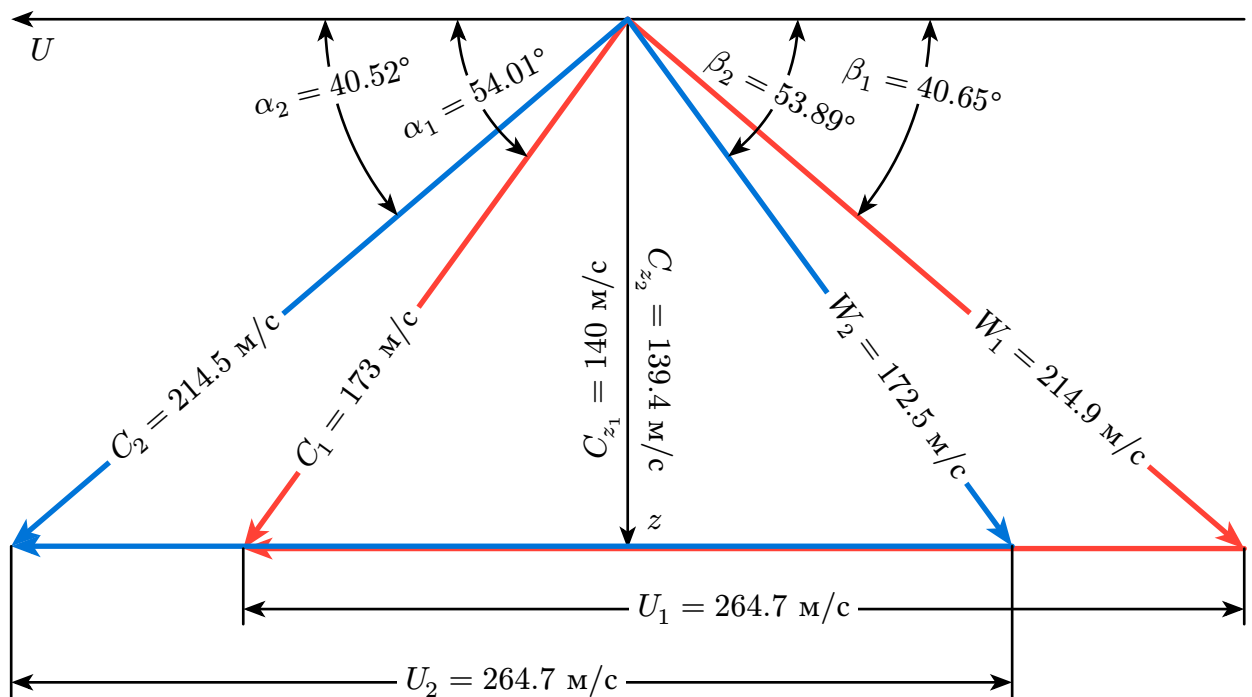


Рисунок 3.6 — Треугольник скоростей на среднем диаметре первой ступени компрессора

## 4 Расчет турбины

### 4.1 Исходные данные для расчета

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

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

$$P_0^* = \sigma_{\text{КС}}^* \cdot P_{\text{К}}^*, \text{ МПа}, \quad (4.1)$$

где  $P_{\text{К}}^*$  — давление на выходе из компрессора (найденно в разделе 2,  
 $P_{\text{К}}^* = 1.621 \cdot 10^6 \text{ Па}$ );

$\sigma_{\text{КС}}$  — коэффициент потерь полного давления в камере сгорания, заданное при расчете в программе A2GTP ( $\sigma_{\text{КС}} = 0.98$ );

$$P_0^* = 0.98 \cdot 1.621 \cdot 10^6 = 1.588 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$T_0^* = 1643 \text{ К}.$$

2. Рабочее тело — газ со следующими характеристиками [4]:

— Газовая постоянная:  $R_{\text{г}} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

— Показатель изобары:  $k_{\text{г}} = 1.33$ ;

— Изобарная теплоемкость при заданной температуре и давлении перед турбиной:  $C_{p_{\text{г}}} = 1160 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ .

3. Мощность проектируемой турбины  $N_{\text{т}}$ :

$$N_{\text{т}} = N_{\text{е}} + N_{\text{к}} = 6.5 \cdot 10^7 + 6.129 \cdot 10^7 = 1.263 \cdot 10^8 \text{ Вт}, \quad (4.2)$$

где  $N_{\text{к}}$  — мощность, потребляемая компрессором:

$$N_{\text{к}} = H_{\text{к}}^* \cdot G_{\text{в}} = 3.99 \cdot 10^5 \cdot 153.6 = 6.129 \cdot 10^7 \text{ Вт}. \quad (4.3)$$

4. Номинальный расход газа  $G_{\text{г}} = 157.6 \text{ кг/с}$ ;

5. Частота вращения турбины  $n = 5441 \text{ об/мин}$ ;

6. Адиабатный КПД процесса расширения  $\eta_{\text{ад. т.}} = 0.91$ ;

7. Безразмерная скорость потока за турбиной  $\lambda_{c_{2т}} = 0.5$ ;
8. Угол выхода потока из последней ступени турбины  $\alpha_{2т} = 90^\circ$ ;
9. Коэффициент, учитывающий механические потери и потери от утечек рабочего тела  $k_N = 1.02$ .

## 4.2 Предварительный расчет турбины

Удельная внутренняя мощность турбины:

$$H_{yt} = k_N \cdot \frac{N_t}{G_t} = 1.02 \cdot \frac{1.263 \cdot 10^8}{157.6} = 8.174 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \quad (4.4)$$

Температурный перепад на турбину по параметрам торможения:

$$\Delta T_t^* = \frac{H_{yt}}{c_{p_r}} = \frac{8.174 \cdot 10^5}{1160} = 704.6 \text{ К}; \quad (4.5)$$

Температура торможения за турбиной:

$$T_{2т}^* = T_0^* - \Delta T_t^* = 1643 - 704.6 = 938.4 \text{ К}; \quad (4.6)$$

Критическая скорость потока газа, выходящего из турбины:

$$\alpha_{кр2} = \sqrt{2 \frac{k_r}{k_r + 1} R_r T_{2т}^*} = \sqrt{2 \cdot \frac{1.33}{1.33 + 1} \cdot 287 \cdot 938.4} = 554.5 \text{ м/с}; \quad (4.7)$$

Скорость потока газа за турбиной:

$$c_{2т} = \lambda_{c_{2т}} \cdot \alpha_{кр2} = 0.5 \cdot 554.5 = 277.2 \text{ м/с}; \quad (4.8)$$

Адиабатный перепад энтальпий на турбину:

$$H_{ад.т.} = H_{yt} + \frac{C_{2т}^2}{2} = 8.174 \cdot 10^5 + \frac{277.2^2}{2} = 8.558 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \quad (4.9)$$

Изоэнтروпийный перепад энтальпий на турбину:

$$H_{от} = \frac{H_{ад.т.}}{\eta_{ад.т.}} = \frac{8.558 \cdot 10^5}{0.91} = 9.404 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \quad (4.10)$$

Температура в потоке за турбиной при изоэнтропийном процессе расширения:

$$T_{2t_T}^* = T_0^* - \frac{H_{от}}{c_{p_r}} = 1643 - \frac{9.404 \cdot 10^5}{1160} = 832.3 \text{ К}; \quad (4.11)$$

Давление в потоке за турбиной:

$$P_{2т} = P_0^* \left( \frac{T_{2t_T}^*}{T_0^*} \right)^{\frac{k_r}{k_r-1}} = 1.588 \cdot 10^6 \left( \frac{832.3}{1643} \right)^{4.03} = 1.025 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad (4.12)$$

Температура в потоке за турбиной:

$$T_{2т} = T_{2т}^* - \frac{C_{2т}^2}{2c_{p_r}} = 938.4 - \frac{277.2}{2 \cdot 1160} = 905.2 \text{ К}; \quad (4.13)$$

Плотность в потоке за турбиной:

$$\rho_{2т} = \frac{P_{2т}}{R_r \cdot T_{2т}} = \frac{1.025 \cdot 10^5}{287 \cdot 905.2} = 0.3943 \text{ кг/м}^3; \quad (4.14)$$

Площадь сечения на выходе из рабочего колеса последней ступени:

$$F_{2т} = \frac{G_r}{\rho_{2т} \cdot c_{2т} \cdot \sin(\alpha_{2т})} = \frac{157.6}{0.3943 \cdot 277.2 \cdot \sin(90^\circ)} = 1.441 \text{ м}^2; \quad (4.15)$$

Напряжения в корневом сечении рабочей лопатки:

$$\begin{aligned}\sigma_p &= 0.89 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 \cdot F_{2\tau} = \\ &= 0.89 \cdot 10^{-5} \cdot 5441 \cdot 1.441 = 3.798 \cdot 10^8 \text{ Па};\end{aligned}\quad (4.16)$$

Выберем материал для лопаток — сталь ЭИ437Б [5], для которой предел длительной прочности  $[\sigma_{500}] = 6.1 \cdot 10^8 \text{ Па}$  и находим коэффициент запаса прочности:

$$K_{\text{пр}} = \frac{[\sigma_{500}]}{\sigma_p} = \frac{6.1 \cdot 10^8}{3.798 \cdot 10^8} = 1.606, \quad (4.17)$$

коэффициент запаса имеет значение в допустимых пределах  $K_{\text{пр}} \geq 1.5$ , следовательно, 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 м/с. Если она меньше 300 м/с, то следует увеличить диаметр или частоту вращения ротора.

Для данного расчета примем  $d_{2\tau} = 1.4 \text{ м}$ . Тогда окружная скорость на среднем диаметре рабочего колеса последней ступени:

$$u_2 = \frac{\pi \cdot d_{2\tau} \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 1.4 \cdot 5441}{60} = 398.8 \text{ м/с}; \quad (4.18)$$

Высота лопаток последней ступени:

$$l_2 = \frac{F_{2\tau}}{\pi \cdot d_{2\tau}} = \frac{1.441}{\pi \cdot 1.4} = 0.3277 \text{ м}, \quad (4.19)$$

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

$$\frac{d_{2\tau}}{l_2} = \frac{1.4}{0.3277} = 4.272; \quad (4.20)$$

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

$$Y = \sqrt{\frac{\sum u_2^2}{2H_{\text{от}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 398.8^2}{2 \cdot 9.404 \cdot 10^5}} = 0.5816, \quad (4.21)$$

что соответствует рекомендованным значениям (0.5...0.6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

В результате теплового расчета была выявлена оптимальная температура перед турбиной  $T_3^* = 1643$  К. Были получены оптимальные параметры  $\eta_e = 0.35$  и  $\pi_k^* = 16$ .

После проведения расчета был получен 16-ступенчатый компрессор со степенью сжатия  $\pi_k^* = 16$ , габаритными параметрами  $D_{ср1} = 929$  мм,  $D_{н1} = 1239$  мм,  $D_{вт} = 620$  мм. Для наглядности был построен треугольник скоростей для последней ступени компрессора.

Подводя итог расчета турбинной части, была получена 4-ступенчатая турбина. Высота последней лопатки  $l_2 = 328$  мм. Средний диаметр рабочих лопаток  $d_{2т} = 1.4$  м.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Барсков В.В. и др. Стационарные газотурбинные установки. Технические характеристики. Расчет тепловых схем: учебное пособие. 2023.
2. Ю.С.Подобуев. Приближенный расчет осевого компрессора. 1981.
3. Лапшин К.Л. 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. Лапшин К.Л., Оленников С.Ю. Выбор параметров рабочего процесса газотурбинного двигателя с использованием ЭВМ. ЛПИ, 1988.
5. Локай В.И., МаксUTOва М.К., Стрункин В.А. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов. Машиностроение, 1979. сс. 430–431.
6. Цанев С.В. и др. Газотурбинные энергетические установки. Издательский дом МЭИ, 2011.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Схема ГТЭ-65, являющейся прототипом, взята из пособия [6].

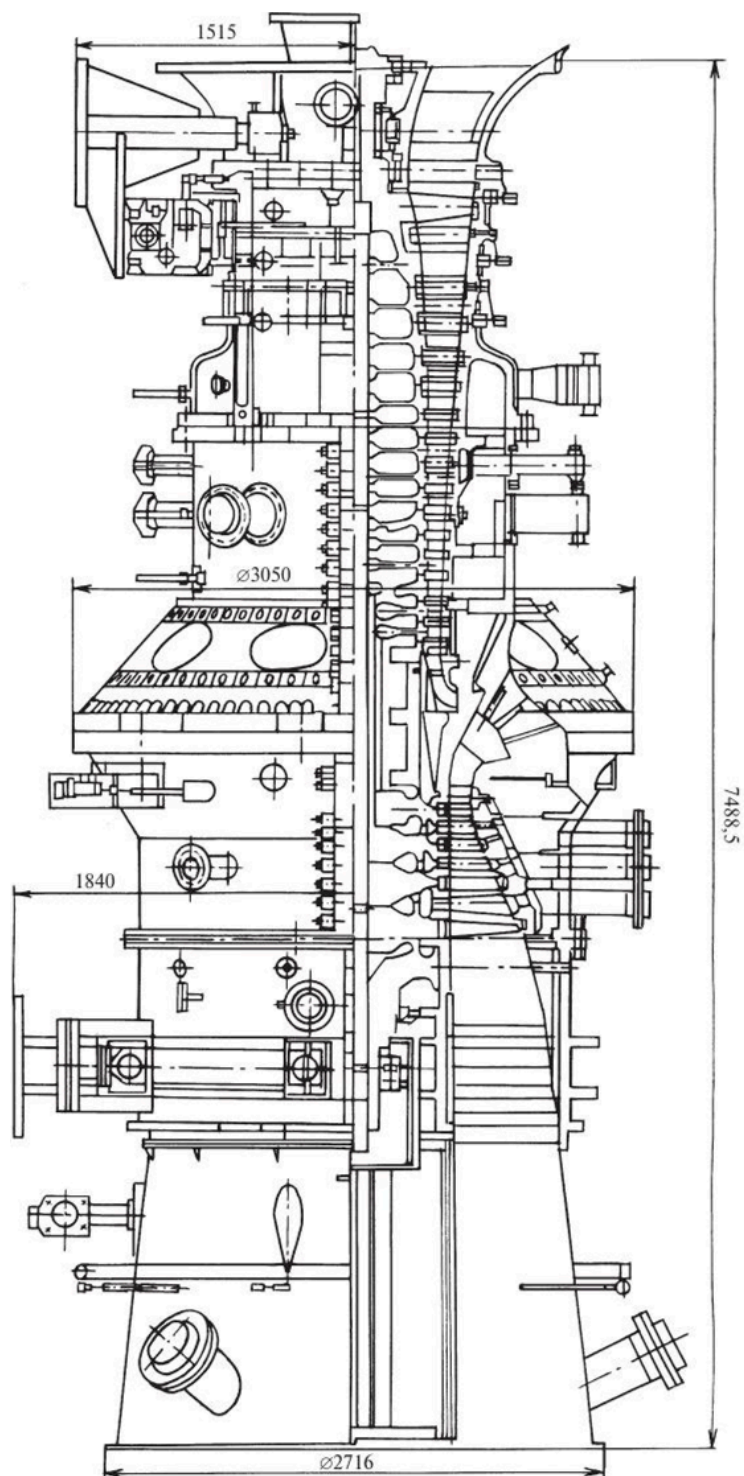


Рисунок 4.1 — Схематическое изображение прототипа — ГТЭ-65

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

1)  $T_3^* = 1443 \text{ K}$ :

-----  
Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса

ГТУ с охлаждаемой турбиной

Dmitriev A.K., gr.3231303/20001, 01.10.2025

Введены входные данные:

1 NE= 65000.0кВт T3\*=1443.0K TH=288.0K PH= .1013МПа  
2 МЮ= .000 TCT=1100.0K ДТВ= .0K НОСР=300.0кДж/кг  
3 КПДКС= .990 КПДКМ= .990 КПДТМ= .990 КИСП= .70 УТОХЛ=1.02  
4 СИГВХ= .987 СИГВТ= 1.000 СИГКС= .980 СИГВЫХ= .985 СИГГТ=1.000

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 | .842 | .834 | .826 | .818 |
| .810 | .802 | .794 | .786 | .778 | .770 | .762 | .754 | .746 | .738 |

7 Задан политропный к.п.д. турбины КПДТП= .870

8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты как для стандартного углеводородного топлива

### ----- Результаты расчета

| ПИК   | T2*   | ТОХЛ* | T5*   | T6     | TQ     | T4A*   | T4Q*   | T6*    | ПИТ  |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| -     | К     | К     | К     | К      | К      | К      | К      | К      | -    |
| 4.00  | 444.4 | 444.4 | 444.4 | 1253.5 | 1366.8 | 1103.2 | 1076.6 | 1076.6 | 3.8  |
| 6.00  | 504.0 | 504.0 | 504.0 | 1252.4 | 1366.8 | 1013.5 | 997.1  | 997.1  | 5.7  |
| 8.00  | 551.5 | 551.5 | 551.5 | 1252.4 | 1366.8 | 953.2  | 941.7  | 941.7  | 7.6  |
| 10.00 | 591.7 | 591.7 | 591.7 | 1252.4 | 1366.8 | 908.2  | 899.5  | 899.5  | 9.5  |
| 12.00 | 627.2 | 627.2 | 627.2 | 1252.4 | 1366.8 | 872.6  | 865.6  | 865.6  | 11.4 |
| 14.00 | 659.3 | 659.3 | 659.3 | 1252.4 | 1366.8 | 843.3  | 837.5  | 837.5  | 13.3 |
| 16.00 | 688.9 | 688.9 | 688.9 | 1252.4 | 1366.8 | 818.4  | 813.5  | 813.5  | 15.2 |
| 18.00 | 716.6 | 716.6 | 716.6 | 1252.4 | 1366.8 | 797.0  | 792.7  | 792.7  | 17.1 |
| 20.00 | 742.8 | 742.8 | 742.8 | 1252.4 | 1366.8 | 778.1  | 774.3  | 774.3  | 19.1 |
| 22.00 | 767.8 | 767.8 | 767.8 | 1252.4 | 1366.8 | 761.2  | 757.8  | 757.8  | 21.0 |
| 24.00 | 791.7 | 791.7 | 791.7 | 1252.4 | 1366.8 | 746.0  | 743.0  | 743.0  | 22.9 |
| 26.00 | 814.8 | 814.8 | 814.8 | 1252.4 | 1366.8 | 732.2  | 729.5  | 729.5  | 24.8 |
| 28.00 | 837.3 | 837.3 | 837.3 | 1252.4 | 1366.8 | 719.5  | 717.0  | 717.0  | 26.7 |
| 30.00 | 859.2 | 859.2 | 859.2 | 1252.4 | 1366.8 | 707.9  | 705.6  | 705.6  | 28.6 |
| 32.00 | 880.7 | 880.7 | 880.7 | 1252.4 | 1366.8 | 697.1  | 695.0  | 695.0  | 30.5 |
| 34.00 | 901.8 | 901.8 | 901.8 | 1252.4 | 1366.8 | 687.0  | 685.0  | 685.0  | 32.4 |
| 36.00 | 922.4 | 922.4 | 922.4 | 1252.4 | 1366.8 | 677.6  | 675.8  | 675.8  | 34.3 |
| 38.00 | 942.9 | 942.9 | 942.9 | 1252.4 | 1366.8 | 668.7  | 667.0  | 667.0  | 36.2 |
| 40.00 | 963.2 | 963.2 | 963.2 | 1252.4 | 1366.8 | 660.4  | 658.8  | 658.8  | 38.1 |
| 42.00 | 983.4 | 983.4 | 983.4 | 1252.4 | 1366.8 | 652.5  | 651.0  | 651.0  | 40.0 |

| ПИК  | НК     | СРМІВ      | НТОХЛ  | СРМІГ      | АЛЬФА | АЛЬФА* | Z  | QOXЛ   | ПІОХЛ | НОХЛ1  | КАППА |
|------|--------|------------|--------|------------|-------|--------|----|--------|-------|--------|-------|
| -    | кДж/кг | кДж/(кг*К) | кДж/кг | кДж/(кг*К) | -     | -      | шт | кДж/кг | -     | кДж/кг | -     |
| 4.0  | 157.9  | 1.0099     | 430.2  | 1.2512     | 2.39  | .048   | 3  | 41.3   | 2.1   | 6.4    | .033  |
| 6.0  | 219.1  | 1.0140     | 539.1  | 1.2397     | 2.53  | .032   | 3  | 27.5   | 3.0   | 7.5    | .031  |
| 8.0  | 268.1  | 1.0177     | 610.4  | 1.2312     | 2.66  | .024   | 3  | 20.5   | 4.0   | 7.9    | .029  |
| 10.0 | 310.2  | 1.0212     | 662.6  | 1.2244     | 2.77  | .019   | 3  | 16.4   | 4.9   | 8.2    | .028  |
| 12.0 | 347.5  | 1.0245     | 703.2  | 1.2188     | 2.88  | .016   | 3  | 13.6   | 5.9   | 8.5    | .027  |
| 14.0 | 381.6  | 1.0277     | 736.3  | 1.2139     | 2.99  | .014   | 3  | 11.7   | 6.8   | 8.7    | .026  |
| 16.0 | 413.2  | 1.0307     | 764.1  | 1.2095     | 3.10  | .012   | 3  | 10.2   | 7.8   | 8.9    | .025  |
| 18.0 | 443.0  | 1.0335     | 787.8  | 1.2056     | 3.21  | .011   | 3  | 9.1    | 8.7   | 9.2    | .025  |
| 20.0 | 471.3  | 1.0362     | 808.6  | 1.2020     | 3.32  | .010   | 3  | 8.1    | 9.7   | 9.5    | .025  |
| 22.0 | 498.5  | 1.0389     | 827.0  | 1.1987     | 3.44  | .009   | 3  | 7.4    | 10.6  | 9.9    | .025  |
| 24.0 | 524.6  | 1.0415     | 843.5  | 1.1957     | 3.56  | .008   | 3  | 6.8    | 11.6  | 10.3   | .025  |
| 26.0 | 550.0  | 1.0440     | 858.5  | 1.1928     | 3.68  | .007   | 3  | 6.2    | 12.5  | 10.8   | .025  |
| 28.0 | 574.8  | 1.0465     | 872.2  | 1.1900     | 3.81  | .007   | 3  | 5.8    | 13.5  | 11.4   | .025  |
| 30.0 | 599.2  | 1.0489     | 884.9  | 1.1874     | 3.95  | .006   | 3  | 5.4    | 14.4  | 12.1   | .026  |
| 32.0 | 623.1  | 1.0513     | 896.7  | 1.1849     | 4.09  | .006   | 3  | 5.0    | 15.4  | 12.9   | .026  |
| 34.0 | 646.6  | 1.0536     | 907.8  | 1.1825     | 4.25  | .006   | 3  | 4.7    | 16.4  | 14.0   | .026  |
| 36.0 | 669.8  | 1.0558     | 918.5  | 1.1802     | 4.41  | .005   | 3  | 4.5    | 17.3  | 15.2   | .026  |
| 38.0 | 693.0  | 1.0581     | 928.8  | 1.1780     | 4.58  | .005   | 3  | 4.2    | 18.3  | 16.9   | .027  |
| 40.0 | 716.0  | 1.0603     | 939.1  | 1.1758     | 4.77  | .005   | 3  | 4.0    | 19.2  | 19.0   | .027  |
| 42.0 | 738.9  | 1.0626     | 949.6  | 1.1737     | 4.97  | .005   | 3  | 3.8    | 20.2  | 21.9   | .028  |

| ПИК  | КПДКВ | КПДТВ | ОХЛ  | Q1     | GB      | ГГ      | HE     | КПДВ | КПДЕ | ВУТ        | ФИ   |
|------|-------|-------|------|--------|---------|---------|--------|------|------|------------|------|
| -    | -     | -     | %    | кДж/кг | кг/с    | кг/с    | кДж/кг | -    | -    | кГ/(кВт*ч) | -    |
| 4.0  | .890  | .887  | 10.9 | 1088.2 | 281.948 | 258.224 | 230.5  | .217 | .210 | .580       | .585 |
| 6.0  | .882  | .892  | 9.0  | 1051.1 | 234.368 | 218.968 | 277.3  | .271 | .261 | .466       | .551 |
| 8.0  | .874  | .895  | 8.0  | 1013.6 | 217.132 | 204.879 | 299.4  | .304 | .292 | .416       | .520 |
| 10.0 | .866  | .898  | 7.3  | 978.0  | 210.235 | 199.507 | 309.2  | .326 | .313 | .389       | .492 |
| 12.0 | .858  | .900  | 6.9  | 944.5  | 208.337 | 198.411 | 312.0  | .341 | .327 | .372       | .466 |
| 14.0 | .850  | .902  | 6.6  | 912.8  | 209.438 | 199.917 | 310.4  | .352 | .337 | .361       | .442 |
| 16.0 | .842  | .904  | 6.4  | 882.5  | 212.635 | 203.267 | 305.7  | .359 | .343 | .355       | .419 |
| 18.0 | .834  | .905  | 6.3  | 853.6  | 217.528 | 208.131 | 298.8  | .364 | .347 | .351       | .396 |
| 20.0 | .826  | .906  | 6.2  | 825.6  | 223.962 | 214.387 | 290.2  | .367 | .348 | .349       | .375 |
| 22.0 | .818  | .908  | 6.1  | 798.5  | 231.864 | 221.978 | 280.3  | .367 | .348 | .350       | .354 |
| 24.0 | .810  | .909  | 6.0  | 772.1  | 241.268 | 230.942 | 269.4  | .366 | .345 | .352       | .334 |
| 26.0 | .802  | .910  | 6.0  | 746.2  | 252.326 | 241.422 | 257.6  | .364 | .342 | .356       | .314 |
| 28.0 | .794  | .911  | 6.0  | 720.8  | 265.364 | 253.720 | 244.9  | .359 | .336 | .361       | .294 |
| 30.0 | .786  | .911  | 6.1  | 695.6  | 280.748 | 268.169 | 231.5  | .354 | .330 | .369       | .274 |
| 32.0 | .778  | .912  | 6.1  | 670.6  | 298.891 | 285.139 | 217.5  | .346 | .321 | .379       | .254 |
| 34.0 | .770  | .913  | 6.2  | 645.9  | 320.444 | 305.210 | 202.8  | .338 | .311 | .391       | .235 |
| 36.0 | .762  | .914  | 6.4  | 621.3  | 346.290 | 329.161 | 187.7  | .327 | .299 | .407       | .215 |
| 38.0 | .754  | .914  | 6.6  | 596.4  | 378.365 | 358.714 | 171.8  | .315 | .285 | .426       | .195 |
| 40.0 | .746  | .915  | 6.8  | 571.4  | 418.810 | 395.715 | 155.2  | .300 | .269 | .452       | .175 |
| 42.0 | .738  | .915  | 7.2  | 546.0  | 471.590 | 443.567 | 137.8  | .282 | .250 | .487       | .154 |

Нормальное завершение расчета

$$2) T_3^* = 1493 \text{ K:}$$

Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса

ГТУ с охлаждаемой турбиной

Dmitriev A.K., gr.3231303/20001, 01.10.2025

Введены входные данные:

1 NE= 65000.0кВт T3\*=1493.0K TH=288.0K PH= .1013МПа  
 2 МЮ= .000 ТСТ=1100.0K ДТВ= .0K НОСР=300.0кДж/кг  
 3 КПДКС= .990 КПДКМ= .990 КПДТМ= .990 КИСП= .70 УТОХЛ=1.02  
 4 СИГВХ= .987 СИГВТ= 1.000 СИГКС= .980 СИГВЫХ= .985 СИГГТ=1.000

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 .842 .834 .826 .818  
 .810 .802 .794 .786 .778 .770 .762 .754 .746 .738

7 Задан политропный к.п.д. турбины КПДТП= .870

8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты как 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 | 444.4 | 444.4 | 1290.0 | 1406.3 | 1144.1 | 1110.8 | 1110.8 | 3.8  |
| 6.00  | 504.0 | 504.0 | 504.0 | 1274.7 | 1405.7 | 1051.8 | 1031.7 | 1031.7 | 5.7  |
| 8.00  | 551.5 | 551.5 | 551.5 | 1274.7 | 1405.7 | 989.8  | 975.6  | 975.6  | 7.6  |
| 10.00 | 591.7 | 591.7 | 591.7 | 1274.7 | 1405.7 | 943.6  | 932.7  | 932.7  | 9.5  |
| 12.00 | 627.2 | 627.2 | 627.2 | 1274.7 | 1405.7 | 906.9  | 898.2  | 898.2  | 11.4 |
| 14.00 | 659.3 | 659.3 | 659.3 | 1274.7 | 1405.7 | 876.8  | 869.6  | 869.6  | 13.3 |
| 16.00 | 688.9 | 688.9 | 688.9 | 1274.7 | 1405.7 | 851.2  | 845.0  | 845.0  | 15.2 |
| 18.00 | 716.6 | 716.6 | 716.6 | 1274.7 | 1405.7 | 828.9  | 823.6  | 823.6  | 17.1 |
| 20.00 | 742.8 | 742.8 | 742.8 | 1274.7 | 1405.7 | 809.4  | 804.8  | 804.8  | 19.1 |
| 22.00 | 767.8 | 767.8 | 767.8 | 1274.7 | 1405.7 | 792.1  | 787.9  | 787.9  | 21.0 |
| 24.00 | 791.7 | 791.7 | 791.7 | 1274.7 | 1405.7 | 776.4  | 772.7  | 772.7  | 22.9 |
| 26.00 | 814.8 | 814.8 | 814.8 | 1274.7 | 1405.7 | 762.2  | 758.8  | 758.8  | 24.8 |
| 28.00 | 837.3 | 837.3 | 837.3 | 1274.7 | 1405.7 | 749.1  | 746.0  | 746.0  | 26.7 |
| 30.00 | 859.2 | 859.2 | 859.2 | 1274.7 | 1405.7 | 737.1  | 734.2  | 734.2  | 28.6 |
| 32.00 | 880.7 | 880.7 | 880.7 | 1274.7 | 1405.7 | 725.9  | 723.3  | 723.3  | 30.5 |
| 34.00 | 901.8 | 901.8 | 901.8 | 1274.7 | 1405.7 | 715.5  | 713.1  | 713.1  | 32.4 |
| 36.00 | 922.4 | 922.4 | 922.4 | 1274.7 | 1405.7 | 705.8  | 703.5  | 703.5  | 34.3 |
| 38.00 | 942.9 | 942.9 | 942.9 | 1274.7 | 1405.7 | 696.6  | 694.5  | 694.5  | 36.2 |
| 40.00 | 963.2 | 963.2 | 963.2 | 1274.7 | 1405.7 | 688.0  | 686.0  | 686.0  | 38.1 |
| 42.00 | 983.4 | 983.4 | 983.4 | 1274.7 | 1405.7 | 679.9  | 678.0  | 678.0  | 40.0 |

| ПИК  | НК     | СРМІВ      | НТОХЛ  | СРМІГ      | АЛЬФА | АЛЬФА* | Z  | QOXЛ   | ПІОХЛ | НОХЛ1  | КАППА |
|------|--------|------------|--------|------------|-------|--------|----|--------|-------|--------|-------|
| -    | кДж/кг | кДж/(кг*К) | кДж/кг | кДж/(кг*К) | -     | -      | шт | кДж/кг | -     | кДж/кг | -     |
| 4.0  | 157.9  | 1.0099     | 446.9  | 1.2622     | 2.26  | .051   | 3  | 51.5   | 2.1   | 7.9    | .028  |
| 6.0  | 219.1  | 1.0140     | 559.2  | 1.2507     | 2.38  | .034   | 3  | 33.8   | 2.8   | 8.7    | .038  |
| 8.0  | 268.1  | 1.0177     | 633.5  | 1.2423     | 2.49  | .026   | 3  | 25.3   | 3.7   | 9.3    | .036  |
| 10.0 | 310.2  | 1.0212     | 687.9  | 1.2355     | 2.60  | .021   | 3  | 20.2   | 4.6   | 9.7    | .034  |
| 12.0 | 347.5  | 1.0245     | 730.3  | 1.2298     | 2.69  | .017   | 3  | 16.8   | 5.4   | 10.0   | .033  |
| 14.0 | 381.6  | 1.0277     | 764.7  | 1.2249     | 2.79  | .015   | 3  | 14.4   | 6.3   | 10.3   | .032  |
| 16.0 | 413.2  | 1.0307     | 793.6  | 1.2205     | 2.88  | .013   | 3  | 12.6   | 7.2   | 10.6   | .031  |
| 18.0 | 443.0  | 1.0335     | 818.5  | 1.2166     | 2.98  | .011   | 3  | 11.1   | 8.0   | 11.0   | .031  |
| 20.0 | 471.3  | 1.0362     | 840.2  | 1.2130     | 3.08  | .010   | 3  | 10.0   | 8.9   | 11.4   | .031  |
| 22.0 | 498.5  | 1.0389     | 859.4  | 1.2097     | 3.18  | .009   | 3  | 9.1    | 9.8   | 11.8   | .031  |
| 24.0 | 524.6  | 1.0415     | 876.7  | 1.2066     | 3.28  | .009   | 3  | 8.3    | 10.6  | 12.3   | .031  |
| 26.0 | 550.0  | 1.0440     | 892.4  | 1.2036     | 3.38  | .008   | 3  | 7.7    | 11.5  | 12.9   | .031  |
| 28.0 | 574.8  | 1.0465     | 906.8  | 1.2008     | 3.49  | .007   | 3  | 7.1    | 12.4  | 13.7   | .031  |
| 30.0 | 599.2  | 1.0489     | 920.1  | 1.1982     | 3.61  | .007   | 3  | 6.6    | 13.3  | 14.5   | .031  |
| 32.0 | 623.1  | 1.0513     | 932.6  | 1.1957     | 3.73  | .006   | 3  | 6.2    | 14.2  | 15.6   | .031  |
| 34.0 | 646.6  | 1.0536     | 944.4  | 1.1933     | 3.86  | .006   | 3  | 5.8    | 15.0  | 16.8   | .031  |
| 36.0 | 669.8  | 1.0558     | 955.7  | 1.1909     | 3.99  | .006   | 3  | 5.5    | 15.9  | 18.4   | .031  |
| 38.0 | 693.0  | 1.0581     | 966.8  | 1.1886     | 4.13  | .005   | 3  | 5.2    | 16.8  | 20.4   | .032  |
| 40.0 | 716.0  | 1.0603     | 977.8  | 1.1864     | 4.29  | .005   | 3  | 5.0    | 17.7  | 22.9   | .032  |
| 42.0 | 738.9  | 1.0626     | 989.2  | 1.1843     | 4.45  | .005   | 3  | 4.7    | 18.6  | 26.4   | .032  |

| ПИК  | КПДКВ | КПДТВ | ОХЛ  | Q1     | GB      | ГГ      | HE     | КПДВ | КПДЕ | ВУТ        | ФИ   |
|------|-------|-------|------|--------|---------|---------|--------|------|------|------------|------|
| -    | -     | -     | %    | кДж/кг | кг/с    | кг/с    | кДж/кг | -    | -    | кГ/(кВт*ч) | -    |
| 4.0  | .890  | .887  | 12.8 | 1128.2 | 273.289 | 245.431 | 237.8  | .216 | .209 | .583       | .593 |
| 6.0  | .882  | .892  | 10.4 | 1099.2 | 225.099 | 207.398 | 288.8  | .269 | .260 | .468       | .561 |
| 8.0  | .874  | .895  | 9.2  | 1065.3 | 206.900 | 192.983 | 314.2  | .303 | .292 | .417       | .532 |
| 10.0 | .866  | .898  | 8.4  | 1031.9 | 199.087 | 187.031 | 326.5  | .326 | .313 | .388       | .505 |
| 12.0 | .858  | .900  | 7.9  | 999.9  | 196.221 | 185.176 | 331.3  | .342 | .328 | .371       | .481 |
| 14.0 | .850  | .902  | 7.6  | 969.2  | 196.309 | 185.811 | 331.1  | .353 | .338 | .360       | .457 |
| 16.0 | .842  | .904  | 7.3  | 939.7  | 198.332 | 188.094 | 327.7  | .361 | .345 | .352       | .435 |
| 18.0 | .834  | .905  | 7.1  | 911.3  | 201.847 | 191.668 | 322.0  | .367 | .350 | .348       | .414 |
| 20.0 | .826  | .906  | 7.0  | 883.8  | 206.767 | 196.480 | 314.4  | .370 | .352 | .345       | .394 |
| 22.0 | .818  | .907  | 6.9  | 856.9  | 212.944 | 202.409 | 305.2  | .372 | .353 | .345       | .374 |
| 24.0 | .810  | .908  | 6.8  | 830.7  | 220.348 | 209.432 | 295.0  | .372 | .352 | .346       | .354 |
| 26.0 | .802  | .909  | 6.8  | 805.0  | 229.055 | 217.622 | 283.8  | .370 | .349 | .348       | .335 |
| 28.0 | .794  | .910  | 6.8  | 779.6  | 239.293 | 227.185 | 271.6  | .367 | .345 | .353       | .316 |
| 30.0 | .786  | .911  | 6.9  | 754.4  | 251.290 | 238.323 | 258.7  | .362 | .339 | .358       | .296 |
| 32.0 | .778  | .912  | 7.0  | 729.4  | 265.322 | 251.273 | 245.0  | .357 | .332 | .366       | .277 |
| 34.0 | .770  | .913  | 7.1  | 704.6  | 281.827 | 266.414 | 230.6  | .349 | .324 | .375       | .258 |
| 36.0 | .762  | .913  | 7.2  | 679.7  | 301.353 | 284.204 | 215.7  | .341 | .314 | .387       | .239 |
| 38.0 | .754  | .914  | 7.5  | 654.6  | 325.187 | 305.744 | 199.9  | .330 | .302 | .402       | .220 |
| 40.0 | .746  | .915  | 7.8  | 629.1  | 354.633 | 332.094 | 183.3  | .317 | .288 | .422       | .200 |
| 42.0 | .738  | .915  | 8.2  | 603.1  | 392.137 | 365.229 | 165.8  | .303 | .272 | .447       | .180 |

Нормальное завершение расчета

$$3) T_3^* = 1543 \text{ K:}$$

Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса

ГТУ с охлаждаемой турбиной

Dmitriev A.K., gr.3231303/20001, 01.10.2025

Введены входные данные:

1 NE= 65000.0кВт T3\*=1543.0K TH=288.0K PH= .1013МПа  
 2 МЮ= .000 ТСТ=1100.0K ДТВ= .0K НОСР=300.0кДж/кг  
 3 КПДКС= .990 КПДКМ= .990 КПДТМ= .990 КИСП= .70 УТОХЛ=1.02  
 4 СИГВХ= .987 СИГВТ= 1.000 СИГКС= .980 СИГВЫХ= .985 СИГГТ=1.000

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 .842 .834 .826 .818  
 .810 .802 .794 .786 .778 .770 .762 .754 .746 .738

7 Задан политропный к.п.д. турбины КПДТП= .870

8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты как 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 | 444.4 | 444.4 | 1328.6 | 1448.0 | 1185.0 | 1143.3 | 1143.3 | 3.8  |
| 6.00  | 504.0 | 504.0 | 504.0 | 1321.5 | 1432.3 | 1090.3 | 1059.5 | 1059.5 | 5.7  |
| 8.00  | 551.5 | 551.5 | 551.5 | 1321.5 | 1432.3 | 1026.5 | 1004.8 | 1004.8 | 7.6  |
| 10.00 | 591.7 | 591.7 | 591.7 | 1321.5 | 1432.3 | 979.0  | 962.4  | 962.4  | 9.5  |
| 12.00 | 627.2 | 627.2 | 627.2 | 1321.5 | 1432.3 | 941.4  | 928.1  | 928.1  | 11.4 |
| 14.00 | 659.3 | 659.3 | 659.3 | 1321.5 | 1432.3 | 910.3  | 899.3  | 899.3  | 13.3 |
| 16.00 | 688.9 | 688.9 | 688.9 | 1321.5 | 1432.3 | 884.0  | 874.6  | 874.6  | 15.2 |
| 18.00 | 716.6 | 716.6 | 716.6 | 1321.5 | 1432.3 | 861.2  | 853.1  | 853.1  | 17.1 |
| 20.00 | 742.8 | 742.8 | 742.8 | 1321.5 | 1432.3 | 841.1  | 833.9  | 833.9  | 19.1 |
| 22.00 | 767.8 | 767.8 | 767.8 | 1321.5 | 1432.3 | 823.1  | 816.8  | 816.8  | 21.0 |
| 24.00 | 791.7 | 791.7 | 791.7 | 1321.5 | 1432.3 | 807.0  | 801.3  | 801.3  | 22.9 |
| 26.00 | 814.8 | 814.8 | 814.8 | 1321.5 | 1432.3 | 792.4  | 787.2  | 787.2  | 24.8 |
| 28.00 | 837.3 | 837.3 | 837.3 | 1321.5 | 1432.3 | 778.9  | 774.2  | 774.2  | 26.7 |
| 30.00 | 859.2 | 859.2 | 859.2 | 1321.5 | 1432.3 | 766.5  | 762.2  | 762.2  | 28.6 |
| 32.00 | 880.7 | 880.7 | 880.7 | 1321.5 | 1432.3 | 755.0  | 751.0  | 751.0  | 30.5 |
| 34.00 | 901.8 | 901.8 | 901.8 | 1321.5 | 1432.3 | 744.2  | 740.5  | 740.5  | 32.4 |
| 36.00 | 922.4 | 922.4 | 922.4 | 1321.5 | 1432.3 | 734.2  | 730.7  | 730.7  | 34.3 |
| 38.00 | 942.9 | 942.9 | 942.9 | 1321.5 | 1432.3 | 724.8  | 721.5  | 721.5  | 36.2 |
| 40.00 | 963.2 | 963.2 | 963.2 | 1321.5 | 1432.3 | 715.9  | 712.8  | 712.8  | 38.1 |
| 42.00 | 983.4 | 983.4 | 983.4 | 1321.5 | 1432.3 | 707.4  | 704.6  | 704.6  | 40.0 |

| ПИК  | НК     | СРМІВ      | НТОХЛ  | СРМІГ      | АЛЬФА | АЛЬФА* | Z  | QOXЛ   | ПІОХЛ | НОХЛ1  | КАППА |
|------|--------|------------|--------|------------|-------|--------|----|--------|-------|--------|-------|
| -    | кДж/кг | кДж/(кг*К) | кДж/кг | кДж/(кг*К) | -     | -      | шт | кДж/кг | -     | кДж/кг | -     |
| 4.0  | 157.9  | 1.0099     | 464.4  | 1.2730     | 2.14  | .055   | 3  | 64.4   | 2.1   | 10.0   | .022  |
| 6.0  | 219.1  | 1.0140     | 584.1  | 1.2615     | 2.25  | .037   | 4  | 51.0   | 3.0   | 13.7   | .015  |
| 8.0  | 268.1  | 1.0177     | 661.1  | 1.2531     | 2.35  | .027   | 4  | 38.2   | 3.9   | 14.5   | .016  |
| 10.0 | 310.2  | 1.0212     | 717.4  | 1.2464     | 2.44  | .022   | 4  | 30.5   | 4.7   | 15.0   | .017  |
| 12.0 | 347.5  | 1.0245     | 761.5  | 1.2407     | 2.53  | .018   | 4  | 25.4   | 5.6   | 15.4   | .017  |
| 14.0 | 381.6  | 1.0277     | 797.3  | 1.2357     | 2.61  | .016   | 4  | 21.7   | 6.5   | 15.8   | .017  |
| 16.0 | 413.2  | 1.0307     | 827.4  | 1.2313     | 2.69  | .014   | 4  | 19.0   | 7.4   | 16.3   | .017  |
| 18.0 | 443.0  | 1.0335     | 853.4  | 1.2274     | 2.78  | .012   | 4  | 16.8   | 8.2   | 16.8   | .017  |
| 20.0 | 471.3  | 1.0362     | 876.1  | 1.2237     | 2.86  | .011   | 4  | 15.1   | 9.1   | 17.3   | .017  |
| 22.0 | 498.5  | 1.0389     | 896.2  | 1.2204     | 2.95  | .010   | 4  | 13.7   | 10.0  | 18.0   | .018  |
| 24.0 | 524.6  | 1.0415     | 914.4  | 1.2173     | 3.04  | .009   | 4  | 12.6   | 10.9  | 18.8   | .018  |
| 26.0 | 550.0  | 1.0440     | 931.0  | 1.2143     | 3.13  | .008   | 4  | 11.6   | 11.8  | 19.7   | .018  |
| 28.0 | 574.8  | 1.0465     | 946.3  | 1.2115     | 3.22  | .008   | 4  | 10.8   | 12.6  | 20.8   | .018  |
| 30.0 | 599.2  | 1.0489     | 960.5  | 1.2088     | 3.32  | .007   | 4  | 10.0   | 13.5  | 22.1   | .019  |
| 32.0 | 623.1  | 1.0513     | 974.0  | 1.2063     | 3.42  | .007   | 4  | 9.4    | 14.4  | 23.7   | .019  |
| 34.0 | 646.6  | 1.0536     | 987.0  | 1.2038     | 3.53  | .006   | 4  | 8.8    | 15.3  | 25.6   | .019  |
| 36.0 | 669.8  | 1.0558     | 999.5  | 1.2015     | 3.64  | .006   | 4  | 8.3    | 16.2  | 27.9   | .020  |
| 38.0 | 693.0  | 1.0581     | 1011.9 | 1.1992     | 3.76  | .006   | 4  | 7.9    | 17.1  | 30.9   | .020  |
| 40.0 | 716.0  | 1.0603     | 1024.6 | 1.1969     | 3.89  | .005   | 4  | 7.5    | 18.0  | 34.8   | .021  |
| 42.0 | 738.9  | 1.0626     | 1038.2 | 1.1947     | 4.02  | .005   | 4  | 7.1    | 18.9  | 40.1   | .021  |

| ПИК  | КПДКВ | КПДТВ | ОХЛ  | Q1     | GB      | ГГ      | HE     | КПДВ | КПДЕ | ВУТ         | ФИ   |
|------|-------|-------|------|--------|---------|---------|--------|------|------|-------------|------|
| -    | -     | -     | %    | кДж/кг | кг/с    | кг/с    | кДж/кг | -    | -    | кВт/(кВт*ч) | -    |
| 4.0  | .890  | .887  | 15.0 | 1161.6 | 266.892 | 233.967 | 243.5  | .215 | .208 | .586        | .598 |
| 6.0  | .882  | .891  | 13.6 | 1121.9 | 221.912 | 197.323 | 292.9  | .268 | .258 | .470        | .564 |
| 8.0  | .874  | .895  | 11.9 | 1096.6 | 201.885 | 182.861 | 322.0  | .302 | .291 | .418        | .538 |
| 10.0 | .866  | .898  | 10.9 | 1068.7 | 192.787 | 176.550 | 337.2  | .325 | .312 | .389        | .513 |
| 12.0 | .858  | .900  | 10.1 | 1040.3 | 188.816 | 174.145 | 344.3  | .341 | .328 | .371        | .490 |
| 14.0 | .850  | .902  | 9.6  | 1012.3 | 187.840 | 174.073 | 346.0  | .353 | .338 | .359        | .468 |
| 16.0 | .842  | .903  | 9.3  | 984.8  | 188.844 | 175.575 | 344.2  | .362 | .346 | .351        | .447 |
| 18.0 | .834  | .905  | 9.0  | 957.9  | 191.327 | 178.273 | 339.7  | .368 | .351 | .346        | .427 |
| 20.0 | .826  | .906  | 8.8  | 931.5  | 195.088 | 182.029 | 333.2  | .372 | .354 | .343        | .408 |
| 22.0 | .818  | .907  | 8.7  | 905.5  | 199.993 | 186.743 | 325.0  | .374 | .355 | .342        | .388 |
| 24.0 | .810  | .908  | 8.6  | 879.9  | 206.004 | 192.394 | 315.5  | .374 | .355 | .343        | .369 |
| 26.0 | .802  | .909  | 8.6  | 854.7  | 213.153 | 199.012 | 304.9  | .373 | .353 | .344        | .351 |
| 28.0 | .794  | .910  | 8.6  | 829.6  | 221.594 | 206.730 | 293.3  | .371 | .350 | .347        | .332 |
| 30.0 | .786  | .911  | 8.7  | 804.5  | 231.500 | 215.694 | 280.8  | .368 | .346 | .352        | .314 |
| 32.0 | .778  | .912  | 8.8  | 779.5  | 243.083 | 226.071 | 267.4  | .363 | .340 | .358        | .295 |
| 34.0 | .770  | .912  | 8.9  | 754.5  | 256.621 | 238.076 | 253.3  | .357 | .332 | .366        | .277 |
| 36.0 | .762  | .913  | 9.2  | 729.3  | 272.640 | 252.125 | 238.4  | .349 | .324 | .376        | .258 |
| 38.0 | .754  | .914  | 9.5  | 703.6  | 292.138 | 269.005 | 222.5  | .339 | .313 | .388        | .239 |
| 40.0 | .746  | .914  | 10.0 | 677.2  | 316.194 | 289.509 | 205.6  | .328 | .301 | .405        | .219 |
| 42.0 | .738  | .915  | 10.6 | 649.8  | 346.806 | 315.092 | 187.4  | .314 | .286 | .426        | .199 |

Нормальное завершение расчета

$$4) T_3^* = 1593 \text{ K:}$$

Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса

ГТУ с охлаждаемой турбиной

Dmitriev A.K., gr.3231303/20001, 01.10.2025

Введены входные данные:

1 NE= 65000.0кВт T3\*=1593.0K TH=288.0K PH= .1013МПа  
 2 МЮ= .000 ТСТ=1100.0K ДТВ= .0K НОСР=300.0кДж/кг  
 3 КПДКС= .990 КПДКМ= .990 КПДТМ= .990 КИСП= .70 УТОХЛ=1.02  
 4 СИГВХ= .987 СИГВТ= 1.000 СИГКС= .980 СИГВЫХ= .985 СИГГТ=1.000

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 .842 .834 .826 .818  
 .810 .802 .794 .786 .778 .770 .762 .754 .746 .738

7 Задан политропный к.п.д. турбины КПДТП= .870

8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты как 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 | 444.4 | 444.4 | 1367.9 | 1490.3 | 1226.0 | 1175.1 | 1175.1 | 3.8  |
| 6.00  | 504.0 | 504.0 | 504.0 | 1353.7 | 1469.8 | 1128.8 | 1092.1 | 1092.1 | 5.7  |
| 8.00  | 551.5 | 551.5 | 551.5 | 1346.5 | 1469.8 | 1063.4 | 1037.5 | 1037.5 | 7.6  |
| 10.00 | 591.7 | 591.7 | 591.7 | 1346.5 | 1469.8 | 1014.6 | 994.8  | 994.8  | 9.5  |
| 12.00 | 627.2 | 627.2 | 627.2 | 1346.5 | 1469.8 | 975.9  | 960.0  | 960.0  | 11.4 |
| 14.00 | 659.3 | 659.3 | 659.3 | 1346.5 | 1469.8 | 944.0  | 930.8  | 930.8  | 13.3 |
| 16.00 | 688.9 | 688.9 | 688.9 | 1346.5 | 1469.8 | 916.9  | 905.7  | 905.7  | 15.2 |
| 18.00 | 716.6 | 716.6 | 716.6 | 1346.5 | 1469.8 | 893.5  | 883.8  | 883.8  | 17.1 |
| 20.00 | 742.8 | 742.8 | 742.8 | 1346.5 | 1469.8 | 872.8  | 864.3  | 864.3  | 19.1 |
| 22.00 | 767.8 | 767.8 | 767.8 | 1346.5 | 1469.8 | 854.4  | 846.8  | 846.8  | 21.0 |
| 24.00 | 791.7 | 791.7 | 791.7 | 1346.5 | 1469.8 | 837.8  | 831.0  | 831.0  | 22.9 |
| 26.00 | 814.8 | 814.8 | 814.8 | 1346.5 | 1469.8 | 822.7  | 816.5  | 816.5  | 24.8 |
| 28.00 | 837.3 | 837.3 | 837.3 | 1346.5 | 1469.8 | 808.9  | 803.2  | 803.2  | 26.7 |
| 30.00 | 859.2 | 859.2 | 859.2 | 1346.5 | 1469.8 | 796.1  | 790.9  | 790.9  | 28.6 |
| 32.00 | 880.7 | 880.7 | 880.7 | 1346.5 | 1469.8 | 784.3  | 779.5  | 779.5  | 30.5 |
| 34.00 | 901.8 | 901.8 | 901.8 | 1346.5 | 1469.8 | 773.2  | 768.8  | 768.8  | 32.4 |
| 36.00 | 922.4 | 922.4 | 922.4 | 1346.5 | 1469.8 | 762.9  | 758.8  | 758.8  | 34.3 |
| 38.00 | 942.9 | 942.9 | 942.9 | 1346.5 | 1469.8 | 753.2  | 749.3  | 749.3  | 36.2 |
| 40.00 | 963.2 | 963.2 | 963.2 | 1346.5 | 1469.8 | 744.0  | 740.4  | 740.4  | 38.1 |
| 42.00 | 983.4 | 983.4 | 983.4 | 1346.5 | 1469.8 | 735.3  | 731.9  | 731.9  | 40.0 |



| ПИК  | НК     | СРМІВ      | НТОХЛ  | СРМІГ      | АЛЬФА | АЛЬФА* | Z  | QOXЛ   | ПІОХЛ | НОХЛ1  | КАППА |
|------|--------|------------|--------|------------|-------|--------|----|--------|-------|--------|-------|
| -    | кДж/кг | кДж/(кг*К) | кДж/кг | кДж/(кг*К) | -     | -      | шт | кДж/кг | -     | кДж/кг | -     |
| 4.0  | 157.9  | 1.0099     | 482.5  | 1.2836     | 2.03  | .058   | 3  | 78.7   | 2.2   | 12.5   | .015  |
| 6.0  | 219.1  | 1.0140     | 605.9  | 1.2723     | 2.13  | .039   | 4  | 60.7   | 2.9   | 16.1   | .013  |
| 8.0  | 268.1  | 1.0177     | 685.1  | 1.2638     | 2.22  | .029   | 4  | 45.4   | 3.7   | 16.7   | .019  |
| 10.0 | 310.2  | 1.0212     | 743.7  | 1.2571     | 2.30  | .023   | 4  | 36.3   | 4.5   | 17.3   | .020  |
| 12.0 | 347.5  | 1.0245     | 789.5  | 1.2514     | 2.38  | .019   | 4  | 30.2   | 5.3   | 17.8   | .020  |
| 14.0 | 381.6  | 1.0277     | 826.8  | 1.2465     | 2.45  | .017   | 4  | 25.8   | 6.1   | 18.3   | .020  |
| 16.0 | 413.2  | 1.0307     | 858.2  | 1.2421     | 2.52  | .015   | 4  | 22.6   | 6.9   | 18.9   | .020  |
| 18.0 | 443.0  | 1.0335     | 885.1  | 1.2381     | 2.60  | .013   | 4  | 20.0   | 7.7   | 19.5   | .020  |
| 20.0 | 471.3  | 1.0362     | 908.8  | 1.2344     | 2.67  | .012   | 4  | 18.0   | 8.5   | 20.2   | .020  |
| 22.0 | 498.5  | 1.0389     | 929.9  | 1.2310     | 2.75  | .011   | 4  | 16.3   | 9.4   | 21.0   | .021  |
| 24.0 | 524.6  | 1.0415     | 948.9  | 1.2279     | 2.82  | .010   | 4  | 15.0   | 10.2  | 21.9   | .021  |
| 26.0 | 550.0  | 1.0440     | 966.2  | 1.2249     | 2.90  | .009   | 4  | 13.8   | 11.0  | 22.9   | .022  |
| 28.0 | 574.8  | 1.0465     | 982.3  | 1.2221     | 2.99  | .008   | 4  | 12.8   | 11.8  | 24.3   | .021  |
| 30.0 | 599.2  | 1.0489     | 997.3  | 1.2194     | 3.07  | .008   | 4  | 11.9   | 12.7  | 25.8   | .022  |
| 32.0 | 623.1  | 1.0513     | 1011.5 | 1.2168     | 3.16  | .007   | 4  | 11.2   | 13.5  | 27.6   | .022  |
| 34.0 | 646.6  | 1.0536     | 1025.1 | 1.2143     | 3.25  | .007   | 4  | 10.5   | 14.3  | 29.9   | .022  |
| 36.0 | 669.8  | 1.0558     | 1038.4 | 1.2119     | 3.34  | .006   | 4  | 9.9    | 15.1  | 32.6   | .023  |
| 38.0 | 693.0  | 1.0581     | 1051.8 | 1.2096     | 3.44  | .006   | 4  | 9.4    | 16.0  | 36.1   | .023  |
| 40.0 | 716.0  | 1.0603     | 1065.5 | 1.2073     | 3.55  | .006   | 4  | 8.9    | 16.8  | 40.7   | .023  |
| 42.0 | 738.9  | 1.0626     | 1080.3 | 1.2051     | 3.66  | .006   | 4  | 8.5    | 17.6  | 46.9   | .024  |

| ПИК  | КПДКВ | КПДТВ | ОХЛ  | Q1     | GB      | ГГ      | HE     | КПДВ | КПДЕ | ВУТ        | ФИ   |
|------|-------|-------|------|--------|---------|---------|--------|------|------|------------|------|
| -    | -     | -     | %    | кДж/кг | кг/с    | кг/с    | кДж/кг | -    | -    | кГ/(кВт*ч) | -    |
| 4.0  | .890  | .886  | 17.3 | 1191.5 | 261.503 | 223.409 | 248.6  | .213 | .207 | .589       | .603 |
| 6.0  | .882  | .891  | 15.5 | 1160.6 | 215.452 | 187.842 | 301.7  | .266 | .257 | .473       | .571 |
| 8.0  | .874  | .895  | 13.5 | 1140.6 | 194.913 | 173.673 | 333.5  | .300 | .289 | .420       | .546 |
| 10.0 | .866  | .897  | 12.3 | 1116.0 | 184.987 | 166.994 | 351.4  | .324 | .312 | .390       | .523 |
| 12.0 | .858  | .900  | 11.4 | 1090.0 | 180.274 | 164.125 | 360.6  | .341 | .327 | .371       | .502 |
| 14.0 | .850  | .901  | 10.9 | 1063.6 | 178.554 | 163.495 | 364.0  | .353 | .339 | .359       | .481 |
| 16.0 | .842  | .903  | 10.4 | 1037.3 | 178.765 | 164.337 | 363.6  | .362 | .347 | .350       | .461 |
| 18.0 | .834  | .904  | 10.1 | 1011.3 | 180.408 | 166.297 | 360.3  | .369 | .353 | .345       | .442 |
| 20.0 | .826  | .906  | 9.9  | 985.6  | 183.245 | 169.206 | 354.7  | .373 | .356 | .341       | .423 |
| 22.0 | .818  | .907  | 9.8  | 960.1  | 187.117 | 172.952 | 347.4  | .376 | .358 | .339       | .404 |
| 24.0 | .810  | .908  | 9.7  | 934.9  | 191.953 | 177.482 | 338.6  | .377 | .359 | .339       | .386 |
| 26.0 | .802  | .909  | 9.6  | 909.9  | 197.779 | 182.825 | 328.6  | .377 | .358 | .340       | .368 |
| 28.0 | .794  | .910  | 9.7  | 884.9  | 204.698 | 189.065 | 317.5  | .376 | .355 | .342       | .350 |
| 30.0 | .786  | .910  | 9.7  | 859.9  | 212.856 | 196.321 | 305.4  | .373 | .352 | .346       | .332 |
| 32.0 | .778  | .911  | 9.9  | 834.8  | 222.394 | 204.697 | 292.3  | .369 | .347 | .351       | .314 |
| 34.0 | .770  | .912  | 10.1 | 809.5  | 233.556 | 214.371 | 278.3  | .363 | .340 | .357       | .296 |
| 36.0 | .762  | .913  | 10.3 | 784.0  | 246.667 | 225.572 | 263.5  | .357 | .333 | .365       | .277 |
| 38.0 | .754  | .913  | 10.7 | 757.8  | 262.566 | 238.933 | 247.6  | .349 | .323 | .376       | .259 |
| 40.0 | .746  | .914  | 11.3 | 730.7  | 282.076 | 255.006 | 230.4  | .338 | .312 | .389       | .239 |
| 42.0 | .738  | .914  | 12.0 | 702.2  | 306.794 | 274.872 | 211.9  | .326 | .299 | .407       | .219 |

Нормальное завершение расчета

$$5) T_3^* = 1643 \text{ K:}$$

Программа A2GTP - вариантный расчет параметров рабочего процесса

ГТУ с охлаждаемой турбиной

Dmitriev A.K., gr.3231303/20001, 01.10.2025

Введены входные данные:

1 NE= 65000.0кВт T3\*=1643.0K TH=288.0K PH= .1013МПа  
 2 МЮ= .000 ТСТ=1100.0K ДТВ= .0K НОСР=300.0кДж/кг  
 3 КПДКС= .990 КПДКМ= .990 КПДТМ= .990 КИСП= .70 УТОХЛ=1.02  
 4 СИГВХ= .987 СИГВТ= 1.000 СИГКС= .980 СИГВЫХ= .985 СИГГТ=1.000

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 .842 .834 .826 .818  
 .810 .802 .794 .786 .778 .770 .762 .754 .746 .738

7 Задан политропный к.п.д. турбины КПДТП= .870

8 Теплоемкость и другие параметры продуктов сгорания приняты как 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 | 444.4 | 444.4 | 1407.7 | 1533.0 | 1267.1 | 1206.3 | 1206.3 | 3.8  |
| 6.00  | 504.0 | 504.0 | 504.0 | 1389.8 | 1508.7 | 1167.4 | 1123.1 | 1123.1 | 5.7  |
| 8.00  | 551.5 | 551.5 | 551.5 | 1389.7 | 1498.2 | 1100.4 | 1063.5 | 1063.5 | 7.6  |
| 10.00 | 591.7 | 591.7 | 591.7 | 1389.6 | 1498.2 | 1050.3 | 1022.1 | 1022.1 | 9.5  |
| 12.00 | 627.2 | 627.2 | 627.2 | 1389.6 | 1498.2 | 1010.6 | 988.0  | 988.0  | 11.4 |
| 14.00 | 659.3 | 659.3 | 659.3 | 1389.6 | 1498.2 | 977.8  | 959.1  | 959.1  | 13.3 |
| 16.00 | 688.9 | 688.9 | 688.9 | 1389.6 | 1498.2 | 950.0  | 934.1  | 934.1  | 15.2 |
| 18.00 | 716.6 | 716.6 | 716.6 | 1389.6 | 1498.2 | 925.9  | 912.1  | 912.1  | 17.1 |
| 20.00 | 742.8 | 742.8 | 742.8 | 1389.6 | 1498.2 | 904.8  | 892.6  | 892.6  | 19.1 |
| 22.00 | 767.8 | 767.8 | 767.8 | 1389.6 | 1498.2 | 885.8  | 875.0  | 875.0  | 21.0 |
| 24.00 | 791.7 | 791.7 | 791.7 | 1389.6 | 1498.2 | 868.8  | 859.1  | 859.1  | 22.9 |
| 26.00 | 814.8 | 814.8 | 814.8 | 1389.6 | 1498.2 | 853.2  | 844.4  | 844.4  | 24.8 |
| 28.00 | 837.3 | 837.3 | 837.3 | 1389.6 | 1498.2 | 839.0  | 831.0  | 831.0  | 26.7 |
| 30.00 | 859.2 | 859.2 | 859.2 | 1389.6 | 1498.2 | 825.9  | 818.5  | 818.5  | 28.6 |
| 32.00 | 880.7 | 880.7 | 880.7 | 1389.6 | 1498.2 | 813.7  | 806.9  | 806.9  | 30.5 |
| 34.00 | 901.8 | 901.8 | 901.8 | 1389.6 | 1498.2 | 802.3  | 796.0  | 796.0  | 32.4 |
| 36.00 | 922.4 | 922.4 | 922.4 | 1389.6 | 1498.2 | 791.7  | 785.8  | 785.8  | 34.3 |
| 38.00 | 942.9 | 942.9 | 942.9 | 1389.6 | 1498.2 | 781.7  | 776.2  | 776.2  | 36.2 |
| 40.00 | 963.2 | 963.2 | 963.2 | 1389.6 | 1498.2 | 772.3  | 767.1  | 767.1  | 38.1 |
| 42.00 | 983.4 | 983.4 | 983.4 | 1389.6 | 1498.2 | 763.3  | 758.5  | 758.5  | 40.0 |

| ПИК  | НК     | СРМІВ      | НТОХЛ  | СРМІГ      | АЛЬФА | АЛЬФА* | Z  | QOXЛ   | ПІОХЛ | НОХЛ1  | КАППА |
|------|--------|------------|--------|------------|-------|--------|----|--------|-------|--------|-------|
| -    | кДж/кг | кДж/(кг*К) | кДж/кг | кДж/(кг*К) | -     | -      | шт | кДж/кг | -     | кДж/кг | -     |
| 4.0  | 157.9  | 1.0099     | 501.2  | 1.2943     | 1.93  | .062   | 3  | 94.2   | 2.2   | 15.3   | .007  |
| 6.0  | 219.1  | 1.0140     | 628.9  | 1.2829     | 2.02  | .041   | 4  | 73.1   | 2.9   | 19.4   | .007  |
| 8.0  | 268.1  | 1.0177     | 715.7  | 1.2745     | 2.10  | .031   | 5  | 64.0   | 3.8   | 24.2   | .001  |
| 10.0 | 310.2  | 1.0212     | 776.1  | 1.2677     | 2.17  | .025   | 5  | 51.1   | 4.6   | 24.9   | .004  |
| 12.0 | 347.5  | 1.0245     | 823.4  | 1.2621     | 2.24  | .021   | 5  | 42.5   | 5.4   | 25.5   | .006  |
| 14.0 | 381.6  | 1.0277     | 862.1  | 1.2571     | 2.31  | .018   | 5  | 36.4   | 6.2   | 26.1   | .007  |
| 16.0 | 413.2  | 1.0307     | 894.7  | 1.2527     | 2.37  | .015   | 5  | 31.8   | 7.0   | 26.8   | .008  |
| 18.0 | 443.0  | 1.0335     | 922.8  | 1.2487     | 2.44  | .014   | 5  | 28.2   | 7.9   | 27.7   | .008  |
| 20.0 | 471.3  | 1.0362     | 947.5  | 1.2450     | 2.50  | .012   | 5  | 25.4   | 8.7   | 28.6   | .009  |
| 22.0 | 498.5  | 1.0389     | 969.6  | 1.2416     | 2.57  | .011   | 5  | 23.0   | 9.5   | 29.7   | .010  |
| 24.0 | 524.6  | 1.0415     | 989.6  | 1.2384     | 2.64  | .010   | 5  | 21.1   | 10.3  | 31.0   | .010  |
| 26.0 | 550.0  | 1.0440     | 1008.0 | 1.2354     | 2.71  | .009   | 5  | 19.4   | 11.1  | 32.5   | .010  |
| 28.0 | 574.8  | 1.0465     | 1025.2 | 1.2326     | 2.78  | .009   | 5  | 18.0   | 11.9  | 34.4   | .011  |
| 30.0 | 599.2  | 1.0489     | 1041.3 | 1.2299     | 2.85  | .008   | 5  | 16.8   | 12.8  | 36.5   | .011  |
| 32.0 | 623.1  | 1.0513     | 1056.7 | 1.2273     | 2.93  | .008   | 5  | 15.7   | 13.6  | 39.1   | .012  |
| 34.0 | 646.6  | 1.0536     | 1071.6 | 1.2248     | 3.01  | .007   | 5  | 14.8   | 14.4  | 42.2   | .013  |
| 36.0 | 669.8  | 1.0558     | 1086.5 | 1.2223     | 3.09  | .007   | 5  | 14.0   | 15.3  | 46.1   | .013  |
| 38.0 | 693.0  | 1.0581     | 1101.6 | 1.2200     | 3.17  | .006   | 5  | 13.2   | 16.1  | 51.0   | .014  |
| 40.0 | 716.0  | 1.0603     | 1117.6 | 1.2177     | 3.26  | .006   | 5  | 12.5   | 16.9  | 57.5   | .015  |
| 42.0 | 738.9  | 1.0626     | 1135.2 | 1.2155     | 3.36  | .006   | 5  | 11.9   | 17.7  | 66.2   | .015  |

| ПИК  | КПДКВ | КПДТВ | ОХЛ  | Q1     | GB      | ГГ      | HE     | КПДВ | КПДЕ | ВУТ        | ФИ   |
|------|-------|-------|------|--------|---------|---------|--------|------|------|------------|------|
| -    | -     | -     | %    | кДж/кг | кг/с    | кг/с    | кДж/кг | -    | -    | кГ/(кВт*ч) | -    |
| 4.0  | .890  | .886  | 19.7 | 1217.8 | 257.012 | 213.632 | 252.9  | .212 | .206 | .591       | .607 |
| 6.0  | .882  | .891  | 17.6 | 1192.3 | 210.743 | 179.285 | 308.4  | .265 | .256 | .475       | .576 |
| 8.0  | .874  | .895  | 17.0 | 1156.2 | 193.551 | 165.724 | 335.8  | .298 | .288 | .423       | .548 |
| 10.0 | .866  | .897  | 15.4 | 1139.0 | 182.297 | 158.934 | 356.6  | .322 | .310 | .392       | .527 |
| 12.0 | .858  | .899  | 14.3 | 1118.1 | 176.541 | 155.754 | 368.2  | .339 | .326 | .373       | .507 |
| 14.0 | .850  | .901  | 13.6 | 1095.4 | 173.940 | 154.715 | 373.7  | .352 | .338 | .360       | .487 |
| 16.0 | .842  | .903  | 13.0 | 1072.0 | 173.363 | 155.083 | 374.9  | .361 | .346 | .351       | .468 |
| 18.0 | .834  | .904  | 12.6 | 1048.1 | 174.238 | 156.486 | 373.1  | .368 | .352 | .345       | .450 |
| 20.0 | .826  | .905  | 12.3 | 1024.0 | 176.320 | 158.775 | 368.6  | .373 | .356 | .341       | .432 |
| 22.0 | .818  | .906  | 12.1 | 999.8  | 179.417 | 161.821 | 362.3  | .376 | .359 | .339       | .414 |
| 24.0 | .810  | .908  | 12.0 | 975.6  | 183.438 | 165.564 | 354.3  | .378 | .360 | .338       | .397 |
| 26.0 | .802  | .908  | 11.9 | 951.2  | 188.378 | 170.004 | 345.1  | .378 | .359 | .339       | .379 |
| 28.0 | .794  | .909  | 11.9 | 926.7  | 194.338 | 175.223 | 334.5  | .377 | .357 | .340       | .362 |
| 30.0 | .786  | .910  | 12.0 | 901.8  | 201.456 | 181.326 | 322.7  | .375 | .354 | .343       | .344 |
| 32.0 | .778  | .911  | 12.2 | 876.6  | 209.857 | 188.395 | 309.7  | .371 | .350 | .348       | .327 |
| 34.0 | .770  | .912  | 12.5 | 851.1  | 219.756 | 196.566 | 295.8  | .366 | .344 | .353       | .309 |
| 36.0 | .762  | .912  | 12.9 | 825.0  | 231.464 | 206.036 | 280.8  | .360 | .337 | .361       | .290 |
| 38.0 | .754  | .913  | 13.4 | 797.8  | 245.775 | 217.348 | 264.5  | .352 | .328 | .371       | .271 |
| 40.0 | .746  | .914  | 14.1 | 769.3  | 263.518 | 231.000 | 246.7  | .343 | .317 | .383       | .252 |
| 42.0 | .738  | .914  | 15.1 | 738.9  | 286.321 | 247.982 | 227.0  | .331 | .304 | .400       | .231 |

Нормальное завершение расчета