

**Учебный курс**  
**«Термодинамика и теплопередача»**  
(Практическое занятие 2)

Для студентов по направлению подготовки  
**131000 Нефтегазовое дело**  
(квалификация (степень) «бакалавр»)

Преподаватель: д.т.н., профессор *Уразбахтин Фёдор Асхатович*

# Контрольная работа 1.

## Задача 2.

**Произвести термодинамический расчет многоступенчатого компрессора:**

- а) количество ступеней компрессора;
- б) температуру воздуха после сжатия в каждой ступени
- в) количество теплоты, отводимое в систему охлаждения цилиндров компрессора и в промежуточных теплообменниках;
- г) объемную производительность компрессора по входу и выходу.

# Контрольная работа 1.

## Задача 2.

### Произвести термодинамический расчет многоступенчатого компрессора

*Принимаемые допущения:*

- 1) Компрессор считать идеальным; трением и вредным пространством можно пренебречь.
- 2) Степень повышения давления в каждой ступени компрессора считать одинаковыми.

## Контрольная работа 1. Решение задачи 2.

### Исходные данные:

- 1) Компрессор производит  $G=0,45$  кг в секунду сжатого воздуха.
- 2) Максимальное давление  $p_K = 9,00$  МПа
- 3) Предельно допустимое повышение температуры газа в каждой ступени –  $\Delta t = 50^\circ \text{C}$ .
- 4) Сжатие происходит с начальным значением показателя политропы  $n = 1,30$

## Контрольная работа 1. Решение задачи 2.

### Исходные данные:

- 5) Состояние воздуха на входе в компрессор:
- а) давление  $p_1 = 0,10 \text{ МПа}$  ;
  - б) температура  $t_1 = 27^\circ \text{С}$  .
- 6) В промежуточных теплообменниках сжатый воздух охлаждается изобарно до первоначальной температуры момент окончания сжатия температура достигает значения  $t_1$ .

# Контрольная работа 1.

## Решение задачи 2.

### 1. Расчет теплофизических свойств сжимаемого газа

#### 1.1. Газовая постоянная и показатель адиабаты

Для рабочего тела, которым является воздух, газовую постоянную и показатель адиабаты определяем по табличным данным, в частности, *на стр.665 учебника*

*Теплотехника/В.Н.Луканин, М.Г.Шатров, Г.М.*

*Камфер и др. – М.: Высшая школа, 2000. – 671с.*

Универсальная газовая постоянная  $R_{cm} = 287, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$

Показатель адиабаты:  $k = 1,41$

# Контрольная работа 1.

## Решение задачи 2.

### 1.2. Начальная плотность сжимаемого газа

Расчетная формула: 
$$\rho = \frac{p_H}{\xi \cdot R \cdot T_H}$$

Имеем:

а) начальное давление сжимаемого газа

$$p_H = p_1 = 0,1 \text{ МПа} = 100000 \text{ Па}$$

б) начальная температура сжимаемого газа

$$T_H = t_1 + 273,15 = 27 + 273,15 = 300,15 \text{ K}$$

в) газовая постоянная воздуха  $R = 287 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$

г) коэффициент сжимаемости для двухатомных газов при давлении до 10 МПа  $\xi = 1$

$$\rho = \frac{p_H}{\xi \cdot R \cdot T_H} = \frac{100000}{1 \cdot 287 \cdot 300,15} = 1,161 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

# Контрольная работа 1.

## Решение задачи 2.

### 2. Предварительный термодинамический расчет компрессора

#### 2.1. Число ступеней компрессора

Расчетная формула: 
$$z_p = \frac{\ln(\Pi_0)}{\ln(\Pi_{CT})}$$

где  $\Pi_0 = \frac{P_K}{P_H}$  - общее отношение давлений в компрессоре;

$\Pi_{CT} = \frac{P_H}{P_H}$  - отношение давлений в ступени компрессора  
(находится в пределах – до 5,000);

$P_H$  - начальное давление сжимаемого газа

$P_K$  - конечное давление сжимаемого газа



# Контрольная работа 1.

## Решение задачи 2.

**Имеем:**  $p_H = p_1 = 0,1 \text{ МПа} = 100000 \text{ Па}$

$$p_K = 9,0 \text{ МПа} = 9000000 \text{ Па}$$

Принимаем:  $\Pi_{CT} = 5$

Вычисляем:  $\Pi_0 = \frac{p_K}{p_H} = \frac{9000000}{100000} = 90$

$$z_p = \frac{\ln(\Pi_0)}{\ln(\Pi_{CT})} = \frac{\ln(90)}{\ln(5)} = 2,796$$

Принимаем *число ступеней компрессора, равное*

$$z_p = 3$$

## **Контрольная работа 1.** Решение задачи 2.

### **2.2. Расчет параметров сжимаемого газа в ступенях компрессора**

2.2.1. Отношение давлений всасывания и нагнетания ступеней:  $\Pi_i = \sqrt[z_p]{\Pi_0} = \sqrt[3]{90} = 4,481$

2.2.2. Номинальные давления всасывания и нагнетания ступеней компрессора:

#### **Первая ступень**

$$p_{H1} = p_H = 100000 \text{ Па};$$

$$p_{K1} = p_{H1} \cdot \Pi_i = 100000 \cdot 4,481 = 448100 \text{ Па};$$

#### **Вторая ступень**

$$p_{H2} = p_{K1} = 448100 \text{ Па};$$

$$p_{K2} = p_{H2} \cdot \Pi_i = 448100 \cdot 4,481 = 2007936 \text{ Па};$$

#### **Третья ступень**

$$p_{H3} = p_{K2} = 2007936 \text{ Па};$$

$$p_{K3} = p_{H3} \cdot \Pi_i = 2007936 \cdot 4,481 = 9000000 \text{ Па};$$

# Контрольная работа 1.

## Решение задачи 2.

2.2.3. Показатели политропы в ступенях компрессора.

*Политропы сжатия*

**Расчетная формула:**

*Первая ступень*  $n_i = n + 0,015 \cdot (i - 1) \cdot k;$

$$n_1 = 1,30 + 0,015 \cdot (1 - 1) \cdot 1,41 = 1,30;$$

*Вторая ступень*

$$n_2 = 1,30 + 0,015 \cdot (2 - 1) \cdot 1,41 = 1,32;$$

*Третья ступень*

$$n_3 = 1,30 + 0,015 \cdot (3 - 1) \cdot 1,41 = 1,34;$$

# Контрольная работа 1.

Решение задачи 2.

Политропы расширения:

Расчетная формула:  $m_i = (0,92..0,98) \cdot n_i;$

Первая ступень  $n_1 = 1,30; m_1 = 1,196..1,274;$

Принимаем:  $m_1 = 1,235;$

Вторая ступень  $n_2 = 1,32; m_2 = 1,214..1,294;$

Принимаем:  $m_2 = 1,254;$

Третья ступень  $n_3 = 1,34; m_3 = 1,233..1,313;$

Принимаем:  $m_3 = 1,273;$

## **Контрольная работа 1.** Решение задачи 2.

### 2.2.4. Температурный режим в ступенях компрессора

**Первая ступень**  $T_{H1} = T_H = 300,15^{\boxtimes} \text{ K};$

$$T_{K1} = T_{H1} \cdot \Pi_i^{\frac{n_1-1}{n_1}} = 300,15 \cdot (4,481)^{\frac{1,30-1,00}{1,30}} = 423,58^{\boxtimes} \text{ K};$$

Необходимо охлаждение до температуры:

$$T_{K1o} = T_{H1} + \Delta t = 300,15 + 50 = 350,15^{\boxtimes} \text{ K};$$

**Вторая ступень**  $T_{H2} = T_{K1o} = 350,15^{\boxtimes} \text{ K};$

$$T_{K2} = T_{H2} \cdot \Pi_i^{\frac{n_2-1}{n_2}} = 350,15 \cdot (4,481)^{\frac{1,32-1,00}{1,32}} = 501,86^{\boxtimes} \text{ K};$$

Необходимо охлаждение до температуры:

$$T_{K2o} = T_{H2} + \Delta t = 350,15 + 50 = 400,15^{\boxtimes} \text{ K};$$

# Контрольная работа 1.

Решение задачи 2.

*Третья ступень*  $T_{H3} = T_{K2o} = 400,15^{\circ} K;$

$$T_{K3} = T_{H3} \cdot \Pi_i^{\frac{n_3-1}{n_3}} = 400,15 \cdot (4,481)^{\frac{1,34-1,00}{1,34}} = 627,53^{\circ} K;$$

*Необходимо охлаждение до температуры:*

$$T_{K3o} = T_{H3} + \Delta t = 400,15 + 50 = 450,15^{\circ} K;$$

# Контрольная работа 1.

## Решение задачи 2.

2.2.5. Количество теплоты, отводимое в систему охлаждения компрессора по ступеням

**Расчетные формулы:**  $q_i = c_i \cdot \Delta T_i$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ,

где  $c_i = c_V \cdot \frac{n_i - k}{n_i - 1}$ ,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ ,  $c_V = -0,7128 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$

$$\Delta T_i = T_{Ki} - T_{Kio}$$

**Первая ступень**

$$c_1 = 0,7128 \cdot \frac{1,30 - 1,41}{1,30 - 1,00} = -0,2614 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}},$$

$$\Delta T_1 = 350,15 - 423,58 = -73,43 \text{ K}$$

$$q_1 = (-0,2614) \cdot (-73,43) = 19,1946 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

# Контрольная работа 1.

Решение задачи 2.

**Вторая ступень**

$$c_2 = 0,7128 \cdot \frac{1,32 - 1,41}{1,32 - 1,00} = -0,2813 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}},$$

$$\Delta T_2 = 400,15 - 501,86 = -101,71 \text{ K}$$

$$q_2 = (-0,2813) \cdot (-101,71) = 28,6110 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

**Третья ступень**

$$c_3 = 0,7128 \cdot \frac{1,34 - 1,41}{1,34 - 1,00} = -0,1468 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}},$$

$$\Delta T_3 = 627,53 - 400,15 = -227,38 \text{ K}$$

$$q_3 = (-0,1468) \cdot (-227,38) = 33,3794 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$



## Контрольная работа 1. Решение задачи 2.

### 3. Производительность компрессора

3.1. Определение коэффициентов производительности ступеней компрессора

**Расчетные формулы:**  $\lambda_i = \lambda_{oi} \cdot \lambda_{pi} \cdot \lambda_{Ti}$ ;  $C = 0,01$ ;

$$\lambda_{oi} = 1 - a_i \cdot \left( \Pi_i^{\frac{1}{m_i}} - 1 \right); \quad \lambda_{pi} = 1 - \frac{1 + a_i}{n_1 \cdot \lambda_{oi}} w_i; \quad \lambda_{Ti} = 0,985 - C \cdot (\Pi_i - 1);$$

**Первая ступень**  $a_1 = 0,05..0,08$ ; Принимаем:  $a_1 = 0,06$ ;  
 $w_1 = 0,03..0,07$ ; Принимаем:  $w_1 = 0,05$ ;

$$\lambda_{o1} = 1 - 0,06 \cdot \left( 4,481^{\frac{1}{1,235}} - 1 \right) = 0,8578; \quad \lambda_1 = 0,8578 \cdot 0,9525 \cdot 0,9501 = 0,7763;$$

$$\lambda_{p1} = 1 - \frac{1 + 0,06}{1,30 \cdot 0,8578} \cdot 0,05 = 0,9525;$$

$$\lambda_{T1} = 0,985 - 0,01 \cdot (4,481 - 1) = 0,9501;$$

## **Контрольная работа 1.** Решение задачи 2.

### **Вторая ступень**

$$a_2 = a_1 + 0,01 \cdot (i - 1) = 0,06 + 0,01(2 - 1) = 0,07;$$

$$w_2 = 0,8^{(i-1)} \cdot w_1 = 0,8^{2-1} 0,05 = 0,04;$$

$$\lambda_{o_2} = 1 - 0,07 \cdot \left( 4,481^{\frac{1}{1,254}} - 1 \right) = 0,8385;$$

$$\lambda_{p_2} = 1 - \frac{1 + 0,07}{1,30 \cdot 0,8385} \cdot 0,04 = 0,9607;$$

$$\lambda_{T_2} = 0,985 - 0,01 \cdot (4,481 - 1) = 0,9501;$$

$$\lambda_2 = 0,8385 \cdot 0,9607 \cdot 0,9501 = 0,7654;$$

## **Контрольная работа 1.** Решение задачи 2.

### **Третья ступень**

$$a_3 = a_1 + 0,01 \cdot (i - 1) = 0,06 + 0,01(3 - 1) = 0,08;$$

$$w_3 = 0,8^{(i-1)} \cdot w_1 = 0,8^{3-1} 0,05 = 0,032;$$

$$\lambda_{o3} = 1 - 0,08 \cdot \left( 4,481^{\frac{1}{1,273}} - 1 \right) = 0,8201;$$

$$\lambda_{p3} = 1 - \frac{1 + 0,08}{1,30 \cdot 0,8201} \cdot 0,032 = 0,9676;$$

$$\lambda_{T3} = 0,985 - 0,01 \cdot (4,481 - 1) = 0,9501;$$

$$\lambda_3 = 0,8201 \cdot 0,9676 \cdot 0,9501 = 0,7539;$$

## Контрольная работа 1. Решение задачи 2.

### 3.2. Определение размеров и выбор базы компрессора

**Выбираем привод компрессора**, для которого

- частота вращения вала  $n = 25 \text{ с}^{-1}$
- ход поршня  $S = 0,075 \text{ м}$
- количество цилиндров в ступенях

$$j_1 = j_2 = j_3 = j = 2$$

**Плотности сжимаемого газа**

Первая ступень  $\rho_{H1} = 1,161 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Вторая ступень  $\rho_{H2} = \frac{p_{H2}}{\xi \cdot R \cdot T_{H2}} = \frac{448100}{1 \cdot 287 \cdot 350,15} = 4,459 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Третья ступень  $\rho_{H3} = \frac{p_{H3}}{\xi \cdot R \cdot T_{H3}} = \frac{2007936}{1 \cdot 287 \cdot 400,15} = 17,484 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

**Контрольная работа 1. Решение задачи 2.**  
**Диаметры цилиндров ступеней компрессора**

**Расчетное значение**  $D = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot S \cdot m \cdot \rho_H \cdot j \cdot \lambda_1}}$

*Первая ступень*

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,45}{3,141 \cdot 0,075 \cdot 25 \cdot 1,161 \cdot 2 \cdot 0,7763}} = 0,411 \text{ м}$$

*Вторая ступень*

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,45}{3,141 \cdot 0,075 \cdot 25 \cdot 4,459 \cdot 2 \cdot 0,7654}} = 0,212 \text{ м}$$

*Третья ступень*

$$D_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,45}{3,141 \cdot 0,075 \cdot 25 \cdot 17,484 \cdot 2 \cdot 0,7539}} = 0,108 \text{ м}$$

**Принимаем:**  $D_1 = 410 \text{ мм}$   $D_2 = 210 \text{ мм}$   $D_3 = 110 \text{ мм}$

# Контрольная работа 1. Решение задачи 2.

## 3.3. Определение индикаторной мощности компрессора

Расчетные формулы:

$$N_u = \eta \sum_{i=1}^{z_p} N_{ui}$$

Запас по мощности -  $\eta = 2,0$ ;

$$N_{ui} = p_{Hi} \cdot \frac{V_{hi}}{\lambda_i} \cdot \left[ (1 + a_i) A_{ci} - a_i \Pi_{\psi}^{\frac{1}{m_i}} A_{pi} \right];$$

$$V_{hi} = \frac{\pi D_i^2 \cdot S \cdot m}{4};$$

$$\Pi_{\psi} = \frac{p_{K1}}{p_{H1}} = \frac{p_{K2}}{p_{H2}} = \frac{p_{K3}}{p_{H3}};$$

$$A_{ci} = \frac{n_i}{n_i - 1} \left[ \Pi_{\psi}^{\frac{n_i - 1}{n_i}} - 1 \right];$$

$$A_{pi} = \frac{m_i}{m_i - 1} \left[ \Pi_{\psi}^{\frac{m_i - 1}{m_i}} - 1 \right];$$

## Контрольная работа 1. Решение задачи 2.

### 3.3. Определение индикаторной мощности компрессора

#### Первая ступень

$$V_{h1} = \frac{3,141 \cdot 0,410^2 \cdot 0,075 \cdot 25}{4} = 0,248 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$\Pi_{\text{ц}} = \frac{448100}{100000} = 4,481; \quad A_{c1} = \frac{1,30}{1,30 - 1,00} \left[ 4,481^{\frac{1,30-1,00}{1,30}} - 1 \right] = 1,7943;$$

$$A_{p1} = \frac{1,235}{1,235 - 1} \left[ 4,481^{\frac{1,235-1}{1,235}} - 1 \right] = 1,7328;$$

$$N_{u1} = 10^5 \cdot \frac{0,248}{0,7763}.$$

$$\cdot \left[ (1 + 0,06) \cdot 1,7943 - 0,06 \cdot 4,481^{\frac{1}{1,235}} \cdot 1,7328 \right] = 49,574 \text{ кВт};$$

## Контрольная работа 1. Решение задачи 2.

### 3.3. Определение индикаторной мощности компрессора

#### Вторая ступень

$$V_{h2} = \frac{3,141 \cdot 0,210^2 \cdot 0,075 \cdot 25}{4} = 0,065 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$A_{c2} = \frac{1,32}{1,32 - 1,00} \left[ 4,481^{\frac{1,32-1,00}{1,32}} - 1 \right] = 1,8050;$$

$$A_{p2} = \frac{1,254}{1,254 - 1} \left[ 4,481^{\frac{1,254-1}{1,254}} - 1 \right] = 1,7531;$$

$$N_{u1} = 448100 \cdot \frac{0,065}{0,7654} \cdot$$

$$\cdot \left[ (1 + 0,07) \cdot 1,8050 - 0,07 \cdot 4,481^{\frac{1}{1,254}} \cdot 1,7531 \right] = 58,053 \text{ кВт};$$



## Контрольная работа 1. Решение задачи 2.

### 3.3. Определение индикаторной мощности компрессора

#### Третья ступень

$$V_{h3} = \frac{3,141 \cdot 0,110^2 \cdot 0,075 \cdot 25}{4} = 0,018 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$A_{c3} = \frac{1,34}{1,34 - 1,00} \left[ 4,481^{\frac{1,34-1,00}{1,34}} - 1 \right] = 1,8249;$$

$$A_{p3} = \frac{1,273}{1,273 - 1} \left[ 4,481^{\frac{1,273-1}{1,273}} - 1 \right] = 1,7696;$$

$$N_{u3} = 2007936 \cdot \frac{0,018}{0,7539} \cdot$$

$$\cdot \left[ (1 + 0,08) \cdot 1,8249 - 0,08 \cdot 4,481^{\frac{1}{1,273}} \cdot 1,7696 \right] = 72,438 \text{ кВт};$$

## **Контрольная работа 1.** Решение задачи 2.

### *3.3. Определение индикаторной мощности компрессора*

**Общая индикаторная мощность компрессора составляет:**

$$N_u = 2,0 \cdot (49,574 + 58,053 + 72,438) = 360,130 \text{ кВт}$$

### *3.4. Мощность, потребляемая компрессором*

$$N_K = \frac{N_u}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{360,130}{0,8} = 450,163 \text{ кВт}$$

где  $\eta_{\text{мех}} = 0,80$  - механический КПД компрессора

# Контрольная работа 1.

## Результаты решения задачи 2.

1. Число ступеней компрессора -  $z_p = 3$
2. Номинальные давления всасывания и нагнетания ступеней компрессора:

$$p_{H1} = 0,1000 \text{ МПа}; \quad p_{K1} = 0,4481 \text{ МПа};$$

$$p_{H2} = 0,4481 \text{ МПа}; \quad p_{K2} = 2,0079 \text{ МПа};$$

$$p_{H3} = 2,0079 \text{ МПа}; \quad p_{K3} = 9,0000 \text{ МПа};$$

3. Политропы сжатия

$$n_1 = 1,30;$$

$$n_2 = 1,32;$$

$$n_3 = 1,34;$$

4. Политропы расширения

$$m_1 = 1,235;$$

$$m_2 = 1,254;$$

$$m_3 = 1,273;$$

# Контрольная работа 1.

## Результаты решения задачи 2.

5. Температурный режим в ступенях компрессора

$$T_{H1} = 300,15^{\circ} \text{K}; \quad T_{K1} = 423,58^{\circ} \text{K};$$

$$T_{H2} = 350,15^{\circ} \text{K}; \quad T_{K2} = 501,86^{\circ} \text{K};$$

$$T_{H3} = 400,15^{\circ} \text{K}; \quad T_{K3} = 627,53^{\circ} \text{K};$$

6. Количества теплоты, отводимое в систему охлаждения компрессора по ступеням

$$q_1 = 19,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$q_2 = 28,61 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$q_3 = 33,38 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

7. Определение коэффициентов производительности ступеней компрессора

$$\lambda_1 = 0,7763;$$

$$\lambda_2 = 0,7654;$$

$$\lambda_3 = 0,7539;$$

# Контрольная работа 1.

## Результаты решения задачи 2.

8. Плотности сжимаемого газа по ступеням

$$\rho_{H1} = 1,161 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{H2} = 4,459 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{H3} = 17,484 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

9. Индикаторные мощности компрессора по ступеням

$$N_{u1} = 49,57 \text{ кВт};$$

$$N_{u2} = 58,05 \text{ кВт};$$

$$N_{u3} = 72,44 \text{ кВт}.$$

10. Общая индикаторная мощность компрессора  $N_u = 360,13 \text{ кВт}$

11. Мощность, потребляемая компрессором  $N_K = 450,16 \text{ кВт}$