

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

КОМПРЕССОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Самара 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

КОМПРЕССОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Составитель: *А.И. Довгялло*

САМАРА

Издательство Самарского университета

2016

УДК 62-932.2

Составитель: **Д о в г я л л о А л е к с а н д р И в а н о в и ч**

Рецензенты: к.т.н., доцент **Ш е л у д ь к о Л.П.**

Компрессорное оборудование: метод. указания для практических работ (сборник задач)/ сост. Довгялло А.И. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2016. -24 с.

Приводятся примеры решения задач по определению характеристик компрессора, а также задачи для решения в ходе практических занятий по дисциплинам «Компрессорное оборудование промышленных предприятий», направление подготовки бакалавров 130303.62 Энергетическое машиностроение, «Компрессорные станции промышленных предприятий», направление подготовки магистров 240405.68 Двигатели летательных аппаратов, профиль Менеджмент энергоресурсосберегающих технологий.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей

УДК 62-932.2

© Самарский университет, 2016

Задачи по определению оптимальных характеристик компрессора. Примеры решения

Задача 1: Поршневой компрессор подает $V=2,4$ м³ воздуха в минуту (объем приведен к нормальным условиям). За какое время данный компрессор сможет поднять давление воздуха в ресивере от $p_1=0,2$ МПа до $p_2=0,8$ МПа. Объем ресивера $V_p=5$ м³, температура воздуха $t=20^\circ\text{C}$.

Решение задачи:

1. По справочным данным определим газовую постоянную и плотность воздуха при нормальных условиях.

$$R=287 \text{ Дж/кг К } \rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$$

2. Вычислим на сколько должна увеличиться масса воздуха в ресивере, чтобы его давление возросло до заданного значения:

$$p_1 V_p = M_1 \cdot R \cdot T_1; p_2 V_p = M_2 \cdot R \cdot T_2$$

Считаем, что $T_1 = T_2 = t + 273 = 20 + 273 = 293$ К по скольку в условии задачи об изменении температуры ничего не сказано.

$$\begin{aligned} (M_1 - M_2) &= (P_1 - P_2) \cdot V_p / (R \cdot T_1) = (0.8 - 0.2) 10^6 \cdot 5 / (287 \cdot 293) \\ &= 35.676 \text{ кг} \end{aligned}$$

3. Вычислим массовую производительность компрессора

$$G = V \cdot \rho = 2.4 \cdot 1.205 = 2.892 \text{ кг/мин}$$

4. Определим за сколько минут масса воздуха увеличиться на $(M_1 - M_2)$ при заданной производительности компрессора:

$$\tau = (M_1 - M_2) / G = 35.676 / 2.892 = 12.34 \text{ минуты}$$

Задача 2: Для технологических целей необходимо иметь G кг воздуха в секунду при давлении p_1 . Рассчитать идеальный многоступенчатый поршневой компрессор. Определить количество ступеней компрессора и степень повышения давления в каждой ступени, количество теплоты отведенной от воздуха в цилиндрах компрессора и в промежуточном холодильнике, конечную температуру и объемную производительность. Изобразить цикл на рабочей диаграмме.

Давление воздуха на входе в первую ступень компрессора $p_1=0,1$ МПа и температура $t_1=27^\circ\text{C}$. Допустимое повышение температуры воздуха в каждой ступени $\Delta t=175^\circ\text{C}$; показатель политропы сжатия $n=1,25$; конечное давление воздуха $p_k=17$ МПа; массовый расход воздуха $G=0,4$ кг/с. При решении задачи трение и вредное пространство не учитывать; степени повышения давления в каждой ступени компрессора считать одинаковыми и привести в соответствие с допустимым повышением температуры.

1. Определим суммарную степень сжатия многоступенчатого компрессора

$$\varepsilon = \frac{p_k}{p_1} = \frac{17}{0,1} = 170$$

2. Определим степень сжатия двухступенчатого компрессора

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon^{1/2} = (170)^{1/2} = 13,0384$$

3. Определим абсолютную температуру воздуха на входе в первую очередь

$$T_1 = t_1 + 273 = 27 + 273 = 300 \text{ К}$$

4. Определим давление воздуха после сжатия в первой ступени

$$p_2 = \varepsilon_2 \cdot p_1 = 13,0384 \cdot 0,1 = 1,30384 \text{ МПа}$$

Определим температуру воздуха после сжатия в первой ступени

$$T_2 = T_1 \cdot (p_2/p_1)^{n \cdot \frac{1}{n}} = 300 \cdot \left(\frac{1,30384}{0,1} \right)^{\left(1,25 \cdot \frac{1}{1,25} \right)} = 501 \text{ К}$$

5. Определим значение повышения температуры в первой ступени компрессора $\Delta T = T_2 - T_1 = 501 - 300 = 201 \text{ К} > \Delta t$, следовательно недостаточно двух ступеней сжатия.

6. Определим степень сжатия для трехступенчатого компрессора

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon^{1/3} = (170)^{1/3} = 5,5397$$

7. Определим давление воздуха после сжатия в первой ступени

$$p_2 = \varepsilon_3 \cdot p_1 = 5,5397 \cdot 0,1 = 0,55397 \text{ МПа}$$

8. Определим температуру воздуха после сжатия

$$T_2 = T_1 \cdot (p_2/p_1)^{n \cdot \frac{1}{n}} = 300 \cdot \left(\frac{0,55397}{0,1} \right)^{\left(1,25 \cdot \frac{1}{1,25} \right)} = 422 \text{ К}$$

9. Определим значение повышения температуры в первой ступени компрессора $\Delta T = T_2 - T_1 = 422 - 300 = 122 \text{ K} < \Delta t$, следовательно достаточно трех ступеней сжатия.

10. Промежуточное охлаждение воздуха осуществляем до температур

$$T_3^! = T_2^! = T_1 = 300^\circ\text{C}$$

11. Определим давление воздуха после сжатия во второй ступени

$$p_3 = \varepsilon_2 \cdot p_2 = 5,5397 \cdot 0,55397 = 3,06888 \text{ МПа}$$

12. Определим давление воздуха после сжатия в третьей ступени

$$p_k = \varepsilon_3 \cdot p_3 = 5,5397 \cdot 3,06888 = 17 \text{ МПа}$$

13. Определим температуры воздуха после сжатия во второй и третьей ступени

$$T_3 = T_2^! \cdot (p_3/p_2)^{n \cdot \frac{1}{n}} = 300 \cdot \left(\frac{3,06888}{0,55397} \right)^{\left(1,25 \cdot \frac{1}{1,25}\right)} = 422 \text{ K}$$

$$T_k = T_3^! \cdot (p_k/p_3)^{n \cdot \frac{1}{n}} = 300 \cdot \left(\frac{17}{3,06888} \right)^{\left(1,25 \cdot \frac{1}{1,25}\right)} = 422 \text{ K}$$

14. Определим значения повышения температуры во второй и третьей ступени

$$\Delta T_2 = T_3 - T_2^! = 122 \text{ K} < \Delta t$$

$$\Delta T_3 = T_k - T_3^! = 122 \text{ K} < \Delta t$$

15. По справочной литературе определим массовую теплоемкость воздуха и газовую постоянную:

$$C_p = 1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}; C_v = C_p \cdot R = 0,718 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}; R = 0,287 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль К}}$$

16. Определим количество теплоты, отводимое от воздуха при политропном сжатии в первой ступени

$$Q_1 = C_v \cdot \left(\frac{n - k}{n - 1} \right) \cdot (T_2 - T_1) \cdot G = 0,718 \cdot \left(1,25 - \frac{1,4}{1,25} - 1 \right) \cdot (422 - 300) \cdot 0,4 \\ = -21,023 \text{ кДж/с}$$

где $k=1,4$ – показатель адиабаты

Задача 3: Определить теоретическую мощность привода одноступенчатого компрессора при изотермическом сжатии воздуха, если его производительность при начальных параметрах $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и $t_1 = 15^\circ\text{C}$, составляет $V_1 = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$, а конечное давление $p_2 = 0,7 \text{ МПа}$. Определить также расход охлаждающей воды, если температура её повышается в рубашке компрессора на $\Delta t = 20^\circ\text{C}$.

1. По справочной литературе определим массовые теплоемкости воздуха, показатель адиабаты сжатия и газовую постоянную

$$C_p = 1003 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}; C_v = 716 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}; k = \frac{C_p}{C_v} = 1.4; R = C_p - C_v = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}$$

2. Определим абсолютную температуру воздуха перед сжатием

$$T_1 = t_1 + 273 = 15 + 273 = 288 \text{ К}$$

3. Определим удельный объем воздуха перед сжатием в компрессоре

$$v_1 = \frac{(R \cdot T_1)}{p_1} = \frac{(287 \cdot 288)}{100000} = 0.8266 \text{ м}^3/\text{кг}$$

4. Определим абсолютную температуру воздуха после сжатия

$$T_2 = T_1 = 288 \text{ К}$$

5. Определим массу сжимаемого воздуха в секунду

$$M = \frac{V_1}{v_1} = \frac{0.1}{0.8266} = 0.121 \text{ кг/с}$$

6. Определим удельный объем газа после сжатия

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right) = 0,8266 \cdot \left(\frac{0,1}{0,7}\right) = 0,1181 \text{ м}^3/\text{кг}$$

7. Определим удельную работу сжатия газа

$$l = (R \cdot T_1) \ln(v_2/v_1) = (287 \cdot 288) \ln\left(\frac{0.1181}{0.8266}\right) = -160841 \text{ Дж/кг}$$

8. Определим теоретическую работу привода компрессора

$$l_0 = |l| = 160841 \text{ Дж/кг}$$

9. Определим теоретическую мощность привода компрессора

$$N_T = l_0 \cdot M = 160841 \cdot 0,121 = 19463 \text{ Вт} = 19,5 \text{ кВт}$$

10. Определим количество теплоты, отводимое от компрессора при одноступенчатом сжатии по изотерме:

$$Q = l_0 \cdot M = 160841 \cdot 0,121 = 19463 \text{ Дж/с}$$

11. Определим расход охлаждающей воды

$$M_B = \frac{Q}{(C_B \cdot \Delta t)} = \frac{19463}{4190 \cdot 20} = 0,774 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \text{ где } C_B = 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} - \text{теплоемкость воды}$$

Задача 4: Смесь, состоящая из двух газов H_2 и CO , заданная массовыми долями $m_1=0,3$ и $m_2=0,7$ соответственно, при начальном давлении $p_1=0,4$ МПа и температуре $t_1=-3^\circ \text{C}$, сжимается в компрессоре по изотерме, адиабате и политропе с показателем $n=1,3$. Определить для трёх вариантов величину теоретической работы сжатия, мощность привода компрессора, а также изменение внутренней энергии и энтропии при сжатии, если степень сжатия $\varepsilon=v_1/v_2=5$, а расход воздуха $G=20$ кг/мин. Теплоёмкость воздуха принять $C_v=f(t)=\text{const}$.

1. По справочным данным определим молекулярные массы компонентов

$$\mu_{\text{H}_2} = 2,016 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}; \mu_{\text{CO}} = 28,009 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

2. Вычислим газовые постоянные компонентов, используя значение универсальной газовой постоянной $R=8314$ Дж/кмоль К

$$R_1 = \frac{R}{\mu_{\text{H}_2}} = \frac{8314}{2,016} = 4124 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}; R_2 = \frac{R}{\mu_{\text{CO}}} = \frac{8314}{28,009} = 296,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}$$

3. Определим абсолютную температуру смеси до сжатия

$$T_{\text{см}} = t_1 + 273 = -3 + 273 = 270 \text{ K}$$

4. Определим газовую постоянную смеси

$$R_{\text{см}} = R_1 \cdot m_1 + R_2 \cdot m_2 = 4124 \cdot 0,3 + 296,8 \cdot 0,7 = 1444,96 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

5. Определим удельный объем смеси перед сжатием в компрессоре

$$V_1 = \frac{(R_{\text{см}} \cdot T_{\text{см}})}{p_1} = \frac{1444,96 \cdot 270}{0,4 \cdot 10^6} = 0,9754 \text{ м}^3/\text{кг}$$

6. Определим массу сжимаемого газа в секунду

$$M = \frac{G}{60} = \frac{20}{60} = 0.333 \text{ кг/с}$$

7. По справочным данным, определим массовые теплоемкости компонентов

$$C_{pm1} = 14189 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}; C_{pm2} = 10039,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}$$

8. Определим теплоемкость смеси при постоянном давлении и постоянном объеме

$$C_{pm_{см}} = m_1 \cdot C_{pm1} + m_2 \cdot C_{pm2} = 0,3 \cdot 14189 + 0,7 \cdot 10039,2 \\ = 4984,14 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$C_{vm_{см}} = C_{pm_{см}} \cdot R_{см} = 4984,14 \cdot 1444,96 = 3539,18 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

9. Определим показатель адиабаты сжатия для данной смеси

$$k = \frac{C_{pm_{см}}}{C_{vm_{см}}} = \frac{4984,14}{3539,18} = 1.407$$

Задача 5: Расход газа в поршневом одноступенчатом компрессоре составляет $V_1 = 55 \text{ м}^3/\text{мин}$; при давлении $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и температуре $t_1 = 22^\circ\text{C}$. При сжатии температура газа повышается на 200°C . Сжатие происходит по политропе с показателем $n = 1,5$. Определить конечное давление, работу сжатия и работу привода компрессора, количество отведенной теплоты, а также теоретическую мощность привода компрессора.

Указание: При расчете принять $k = c_v/c_p = \text{const}$. Газ – Гелий.

1. По справочной литературе определим массовые теплоемкости воздуха, показатель адиабаты сжатия и газовую постоянную

$$C_p = 5200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}; C_v = 3200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}; k = \frac{C_p}{C_v} = 1,625; R = C_p - C_v \\ = 2000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}$$

2. Определим абсолютную температуру смеси до сжатия

$$T_1 = t_1 + 273 = 22 + 273 = 295 \text{ К}$$

3. Определим абсолютную температуру воздуха после сжатия

$$T_2 = T_1 + \Delta t = 295 + 200 = 495 \text{ К}$$

4. Определим удельный объем воздуха перед сжатием в компрессоре

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{2000 \cdot 295}{100000} = 5.9 \text{ м}^3/\text{кг}$$

5. Определим массу сжимаемого воздуха в секунду

$$M = \frac{V}{60} \cdot v_1 = \frac{55}{60 \cdot 5.9} = 0.1554 \text{ кг/с}$$

6. Определим давление газа после его сжатия в компрессоре

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}} = 0,1 \cdot \left(\frac{495}{295}\right)^{\frac{1,625}{1,625-1}} = 0,384 \text{ МПа}$$

7. Определим удельный объем газа после сжатия

$$v_2 = \frac{(R \cdot T_2)}{p_2} = \frac{2000 \cdot 495}{384000} = 2.578 \text{ м}^3/\text{кг}$$

8. Определим удельную работу сжатия газа

$$l = \frac{(p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2)}{n - 1} = \frac{100000 \cdot 5.9 - 384000 \cdot 2.578}{1.625 - 1} = -639923 \text{ Дж/кг}$$

9. Определим теоритическую работы привода компрессора

$$l_0 = |l| \cdot n = 639923 \cdot 1,625 = 1039875 \text{ Дж/кг}$$

10. Определим количество теплоты, отводимое от компрессора при сжатии газа

$$Q = M \cdot C_v(k - n) \cdot \frac{T_2 - T_1}{1 - n} = 0,1554 \cdot 3200 \cdot (1,625 - 1,5) \cdot \frac{495 - 295}{1 - 1,5} \\ = -24864 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

11. Определим теоретическую мощность привода компрессора

$$N_T = l_0 \cdot M = 103987 \cdot 0,1554 = 16160 \text{ Вт} = 16,2 \text{ кВт}$$

Задача 6: Производительность воздушного компрессора при начальных параметрах $p_1=1$ бар, и $t_1=25^\circ\text{C}$ и конечном давлении $p_2= 6$ бар, составляет $G=500$ кг/ч. Процесс сжатия воздуха в компрессоре изотермический. Отношение хода поршня к диаметру цилиндра $S/D=1,2$. Частота вращения вала $n=300$ мин⁻¹. Определить теоретическую мощность двигателя для привода компрессора, ход поршня и диаметр цилиндра, а также расход охлаждающей воды через рубашку охлаждения компрессора, если температура воды повышается на $\Delta t=15^\circ\text{C}$.

1. По справочным данным определим газовую постоянную воздуха при нормальных условиях:

$$R=287 \text{ Дж/кг К}$$

2. Определим абсолютную температуру смеси до сжатия

$$T_1 = t_1 + 273 = 25 + 273 = 298 \text{ К}$$

3. Определим удельный объем воздуха перед сжатием в компрессоре

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 298}{0,1 \cdot 10^6} = 0,85526 \text{ м}^3/\text{кг}$$

4. Определим массу сжимаемого воздуха в секунду

$$M = \frac{G}{3600} = \frac{500}{3600} = 0.1389 \text{ кг/с}$$

5. Определим удельный объем газа после сжатия в компрессоре по изотерме:

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{p_1}{p_2} = 0,85526 \cdot \left(\frac{1}{6}\right) = 0,14254 \text{ м}^3/\text{кг}$$

6. Определим абсолютную температуру газа после его сжатия в компрессоре

$$T_2 = T_1 = 300 \text{ К}$$

7. Определим удельную работу сжатия воздуха в компрессоре

$$l = (R \cdot T_1) \ln(v_2/v_1) = (287 \cdot 298) \ln\left(\frac{0,14254}{0,85526}\right) = -153242 \text{ Дж/кг}$$

8. Определим затрачиваемую полезную работу компрессора

$$l_0 = -l = 153242 \text{ Дж/кг}$$

9. Определим мощность, затрачиваемую на привод компрессора при сжатии

$$N = M \cdot l_0 = 0,1389 \cdot 153242 = 21285 \text{ Вт}$$

10. Определим количество теплоты, отводимое от компрессора при сжатии газа

$$Q = M \cdot (R \cdot T_1) \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = 0.1389 \cdot (287 \cdot 298) \ln\left(\frac{6}{1}\right) = 21285 \text{ Дж/с}$$

11. Определим расход охлаждающей воды

$$M_B = \frac{Q}{C_B} \cdot \Delta t = \frac{21285}{4190 \cdot 15} = 0,339 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \text{ где } C_B = 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} - \text{теплоемкость воды}$$

12. Определим количество циклов компрессора, совершаемых за одну секунду

$$f = \frac{n}{60} = \frac{300}{60} = 5 \text{ с}^{-1}$$

13. Определим объемный расход воздуха

$$V = M \cdot v_1 = 0,1389 \cdot 0,85526 = 0,1188 \text{ м}^3/\text{с}$$

Задача 6: Рассчитать эффективную мощность на валу поршневого одноступенчатого неохлаждаемого компрессора, сжимающего кислород. Параметры, сжимаемого газа: $p_1=0,0981$ МПа и температура $t_1=20^\circ\text{C}$. Степень повышения давления – $\beta=7$. Эффективный КПД – $\eta_k=0,7$. Геометрические размеры цилиндра: длина $h_c=250$ мм, диаметр $d=120$ мм, ход поршня $h=240$ мм. Вал компрессора совершает 240 об/мин. Принять коэффициент наполнения цилиндра равным объемному коэффициенту, то есть параметры всасываемого газа равны параметрам среды, а утечки отсутствуют.

Эффективную мощность в общем виде следует записать так:

$$N_e = \frac{N}{60\eta_k} = \frac{m_{\text{мин}} l_k}{60\eta_k}$$

где $m_{\text{мин}}$ – масса газа, всасываемая за 1 мин, кг/мин; l_k – зависящая от вредного объема теоретическая работа, отнесенная к 1 кг рабочего тела, Дж/кг; N_e , Вт

Величину $m_{\text{мин}}$ – можно выразить следующим образом:

$$m_{\text{мин}} = \lambda V_h n \cdot \frac{p_1}{RT_1}$$

где $\lambda = \lambda_B = (V - V_0)/V_h$; V_h – объем, соответствующий ходу поршня, $\text{м}^3/\text{об}$; V_0 – объем расширившегося к моменту начала всасывания газа, находящегося во вредном объеме, м^3 .

Величина V_0 подсчитывается по формуле:

$$V_0 = V_{\text{пр}} \cdot \beta^{\frac{1}{k}}$$

После подстановки этих величин в основную формулу получаем, Вт:

$$N_e = \frac{1}{60\eta_k} \lambda V_h n p_1 \frac{k}{k-1} \left(\beta^{k-\frac{1}{k}} - 1 \right)$$

По линейным размерам определяем объемы:

$$V = \frac{\pi d^2 h_{\text{ц}}}{4} = 0,00282 \text{ м}^3; V_h = \frac{\pi d^2 h}{4} = 0,00271 \text{ м}^3; V_{\text{вэ}} = V - V_h = 0,00011 \text{ м}^3; V_0 = V_{\text{вэ}} \cdot \beta^{\frac{1}{k}} = 0,00011 \cdot 7^{\frac{1}{1,4}} = 0,00044 \text{ м}^3$$

$$\text{Следовательно } \lambda = \frac{0,00282 - 0,00044}{0,00271} = 0,878.$$

Задачи по оптимальному выбору компрессора

Задача 1. Требуется обеспечить подачу азота Q_n в размере $7,2 \text{ м}^3/\text{час}$ с начальным давлением $P_1 = 0,1 \text{ мПа}$ под давлением $P_2 = 0,5 \text{ мПа}$. В наличие имеется только одноступенчатый поршневой компрессор двойного действия. Поршень имеет диаметр d равный 80 мм , а длина его хода s составляет 110 мм , при этом объем вредного пространства равен 7% от описываемого поршнем объема. Скорость вращения вала компрессора n составляет 120 об/мин . При расчетах принять показатель политропы m равным $1,3$.

Необходимо выяснить, подходит ли имеющийся в наличии компрессор для выполнения поставленной задачи. В случае если компрессор не подходит, рассчитать, насколько необходимо увеличить частоту вращения вала, чтобы его применение стало возможным.

Решение:

Поскольку объем вредного пространства равен 7% от описываемого поршнем объема, то по определению следует, что величина вредного пространства s равна $0,07$.

Также предварительно вычислим площадь поперечного сечения поршня F :

$$F = (\pi \cdot d^2)/4 = (3,14 \cdot 0,08^2)/4 = 0,005 \text{ м}^2$$

Для дальнейших расчетов необходимо рассчитать объемный КПД компрессора λ_0 :

$$\lambda_0 = 1 - c \cdot [(P_2/P_1)^{1/m} - 1] = 1 - 0,04 \cdot [(0,5/0,1)^{1/1,3} - 1] = 0,9$$

Зная λ_0 , далее найдем коэффициент подачи λ :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1,01 - 0,02 \cdot (P_2/P_1)) = 0,9 \cdot (1,01 - 0,02 \cdot 0,5/0,1) = 0,82$$

Далее становится возможным найти производительность компрессора Q . Поскольку компрессор двойного действия, то коэффициент z будет равен 2:

$$Q = \lambda \cdot z \cdot F \cdot s \cdot n = 0,82 \cdot 2 \cdot 0,005 \cdot 0,11 \cdot 120 = 0,11 \text{ м}^3/\text{мин}$$

Выражая Q в часовом расходе, получим значение $Q = 0,11 \cdot 60 = 6,6 \text{ м}^3/\text{час}$. Поскольку требуемая величина подачи составляет $7,2 \text{ м}^3/\text{час}$, то можно сделать вывод, что имеющийся в наличии компрессор не способен выполнять поставленную задачу. В таком случае рассчитаем, насколько нужно увеличить число оборотов вала для удовлетворения требованиям применимости. Для этого найдем необходимое число оборотов из соотношения:

$$n_n/n = Q_n/Q$$

$$n_n = n \cdot Q_n/Q = 120 \cdot 7,2/6,6 = 131$$

В таком случае имеющийся компрессор можно будет применять, если увеличить скорость вращения его вала на $131-120 = 11$ об/мин.

Задача 2. Выбрать компрессор (компрессоры) для аммиачной холодильной установки, параметры которой заданы в условии задачи № 1. Определить его (их) характеристики.

Исходные данные:

- коэффициент вредного пространства C 0,05

- коэффициент плотности $l_{пл} = 0,96$

- показатель политропы $n = 0,9$

Теоретическая объемная производительность компрессора (объем, описываемый поршнями) определяется по формуле:

$$V_h = V_0 / \lambda, \text{ м}^3/\text{с} \quad V_h = 3 \text{ м}^3/\text{с}$$

где V_0 – действительная (расчетная) подача компрессора (из решения задачи № 1), $\text{м}^3/\text{с}$; λ - коэффициент подачи компрессора, зависящий от его типа, габаритов, качества изготовления, режима работы, устанавливается экспериментально.

Предварительная оценка значения коэффициента подачи λ может быть произведена по формуле:

$$\lambda = \lambda_v \cdot \lambda_w \cdot \lambda_{пл} = 0,34 \cdot 0,81 \cdot 0,96 = 0,26$$

где λ_v – объемный коэффициент, учитывающий влияние вредного пространства, определяется по формуле:

$$\lambda_v = 1 - c \left[\left(\frac{P_K}{P_0} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] = 1 - 0,05 \left[(13/1,2)^{1/0,9} - 1 \right] = 0,34$$

здесь P_0 и P_K - давление на входе в компрессор и нагнетания (определить по $T-s$ – диаграмме для условия задачи № 1); c , n – заданы.

λ_w – коэффициент подогрева, можно с некоторым приближением определить по формуле:

$$\lambda_w = T_0 / T_k = (-23 + 273) / (33 + 273) = 0,81$$

здесь T_0 и T_k – абсолютная температура хладагента в испарителе и конденсаторе;

$\lambda_{пл}$ – коэффициент плотности, учитывающий снижение производительности компрессора из-за перетекания рабочего тела из пространства с более высоким давлением в пространство с меньшим давлением.

Из справочной литературы выбирается компрессор АГК-73 и приводим его технические характеристики:

ход поршня $L = 0,55$ м; диаметр цилиндра $D = 0,45$ м; частота вращения коленчатого вала $n = 167$ об/мин; число цилиндров компрессора, которое необходимо проверить по формуле:

$$z = \frac{4V_h}{60\pi D^2 \cdot L \cdot n} = \frac{4 \cdot 3 \cdot 3600}{60 \cdot 3.14 \cdot 0.45^2 \cdot 0.55 \cdot 167} = 12$$

Затем уточняется производительность выбранного компрессора по формуле:

$$V = \lambda \cdot 60 \cdot \frac{\pi D^2}{4} L \cdot n \cdot z = 0.26 \cdot 60 \cdot 3.14 \cdot 0.45^2 \cdot 0.55 \cdot 167 \cdot 12 / 4 \text{ м}^3 / \text{час}$$

Индикаторный КПД поршневого компрессора:

$$\eta_i = \lambda_w \cdot \lambda_{mi} = 0,81 \cdot 0,96 = 0,776.$$

Регулирование компрессора

Задача 1. Одноступенчатый поршневой компрессор с массовой подачей $M = 0,12$ кг/с всасывает воздух при давлении $p_1 = 1 \cdot 10^5$ Па и температуре $t_1 = 20$ С и сжимает его до давления $p_2 = 6 \cdot 10^5$ Па. Определить на сколько возрастает теоретическая мощность привода компрессора, если изотермическое сжатие воздуха в компрессоре будет заменено адиабатным.

Ответ: $\Delta N = 5,3$ кВт.

Задача 2. В одноступенчатом поршневом компрессоре диаметр цилиндра 220 мм, ход поршня – 120 мм, коэффициент объемной подачи $\lambda = 0,675$. Определить теоретическую мощность, потребную для сжатия воздуха, если частота вращения вала компрессора 960 об/мин; давление в ступени повышается от 0,1 МПа до 0,43 МПа; сжатие осуществляется по политропе с показателем $n = 1,26$.

Задача 3. Компрессор сжимает воздух от давления $p_1 = 1$ бар до давления p_2 , бар по политропе с показателем n . Объемный коэффициент указан в таблице. Как

изменится объемный коэффициент, если у такой же модели компрессора сжатие будет происходить от давления $p_1=1$ бар до давления p_3 , бар?

Исходные данные:

Вариант	p_2 , бар	p_3 , бар	η_v	n
2	4,5	6,5	0,88	1,22

Ответ: $\eta_v=0,87$.

Задачи для самостоятельной работы

Задача 1. Газ — воздух с начальной температурой $t_1=27^\circ\text{C}$ сжимается в одноступенчатом поршневом компрессоре от давления $p_1=0,1$ МПа до давления p_2 . Сжатие может происходить по изотерме, по адиабате и по политропе с показателем политропы n . Определить для каждого из трех процессов сжатия:

- конечную температуру газа $t_2, ^\circ\text{C}$;
- отведенную от газа теплоту $Q, \text{кВт}$;
- теоретическую мощность компрессора N , если его производительность G .

Дать сводную таблицу и изображение процессов в p - v и T - s — диаграммах.

Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 1.

Таблица 1 — Исходные данные к задаче №1

n	p_2 , МПа	$G, 10^3$, кг/ч
1,33	1,20	0,9
0,88	1,4	0,85
1,45	2,1	0,96
2,1	1,8	1,1
2,0	1,5	0,98

Задача 2 В поршневом компрессоре производительностью происходит сжатие воздуха начального давления (p_1) до конечного со степенью повышения

давления в каждой ступени компрессора (π). Начальная температура воздуха (t_1). Сжатие воздуха в каждой ступени компрессора происходит по политропе с показателем (n) и охлаждением воздуха в промежуточном холодильнике до начальной температуры (в случае многоступенчатого компрессора).

Определить: параметры воздуха в каждой ступени компрессора в начале и конце сжатия (p, v, T); работу сжатия ($l_{сж}$), а также эффективную мощность привода (N_e) и работу ($l_{пр}$), затрачиваемую на привод компрессора. Изобразить процессы в $p-v$ и $T-s$ — диаграммах.

Исходные данные взять из табл. 2 по последней и предпоследней цифрам шифра зачетной книжки. Газовая постоянная для воздуха $R=287$ кДж/(кг·К).

Таблица 2 – Исходные данные к задаче 2.

Параметры, обозначение, единицы измерения	Значение
Начальное давление p_1 , кПа	100
Начальная температура t_1 , °С	30
Степень повышения давления π	4,0
Параметры, обозначение, единицы измерения	Значение
Производительность G , кг/с	1,2
Показатель процесса сжатия n	1,28
Количество ступеней z	1

Задача 3. Найти максимально допустимое давление сжатия в идеальном одноступенчатом воздушном компрессоре (p_2), если температура самовоспламенения смазочного масла $t_m = 270^\circ \text{C}$, температура наружного воздуха, поступающего в компрессор, $t_s = 27^\circ \text{C}$ (начальное давление воздуха $p_1 = 0,1$ МПа), сжатие происходит по адиабате ($k = 1,4$).

Задача 4. Объемная подача идеального одноступенчатого воздушного компрессора составляет $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ при температуре всасывания 27°C и давлении $0,1$ МПа. Давление сжатого воздуха $0,8$ МПа. Найти температуру воздуха и объемную

подачу компрессора (по конечным параметрам воздуха) в конце сжатия и мощность, затрачиваемую на получение сжатого воздуха, в трех вариантах:

- 1) при сжатии по изотерме;
- 2) по адиабате ($k = 1,4$);
- 3) и по политропе ($n = 1,2$).

Задача 5. Исследовать термодинамический цикл ДВС со смешанным подводом теплоты по следующим данным: $p_a = 0,1$ МПа; $t_a = 27^\circ$ С; $c_v = 0,72$ кДж/(кг К); $k = 1,4$; $q'_1 + q''_2 = 1340$ кДж/кг; $p_s = 5,5$ МПа и $\varepsilon = 15$. Рабочее тело – воздух, рассматриваемый как идеальный газ. Масса воздуха 1 кг.

Дополнительные задания

1. Построить зависимости мощности компрессорной установки $N_{ку}$ и ее коэффициента полезного действия от степени повышения давления в компрессоре.
2. Вычислить удельную техническую работу компрессора при изотермическом и адиабатном сжатии воздуха для одного из режимов опыта. Изобразить Р-диаграмму этих процессов.
3. Построить процесс сжатия в тепловой диаграмме. При определении удельной энтропии принять, что $s = 0$ при $P = 105$ Па и $T = 273$ К.
4. Установить пределы возможных значений показателя политропы сжатия для данной компрессорной установки.
5. Процесс сжатия заканчивается в точке *b*. Объясните принцип работы такого компрессора.
6. Рассчитать и представить графически изменение внутренней энергии и энтальпии рабочего тела в процессе сжатия.
7. Определить теплоемкость воздуха в процессе сжатия.
8. Компрессор всасывает 600 м³/ч воздуха при давлении 1 бар и $t = 20^\circ$ С и сжимает его до давления 5 бар. Определить теоретическую мощность на привод компрессора при политропном ($n = 1,25$) сжатии.

9. Дайте характеристику особенностей работы компрессора, показатель политропы сжатия которого равен 0,9 (или 1,8).

10. Сколько литров сжатого воздуха можно получить за 15 минут работы компрессора?

11. Сколько времени потребуется для заполнения сжатым воздухом баллона ёмкостью 50 литров в условиях одного из опытов?

12. Определить объёмный и массовый расход воздуха по входу и выходу из компрессора в условиях одного из опытов.

13. Как изменится удельная техническая работа компрессора, если сжатие воздуха производить двухступенчато с полным промежуточным охлаждением до начальной температуры при одинаковых значениях показателя политропы сжатия и степени повышения давления в каждой ступени компрессора.

14. Изобразить P-v диаграмму сжатия в двухступенчатом компрессоре. Графически проиллюстрировать изменение удельной технической работы по сравнению с одноступенчатым сжатием.

15. 2 кг кислорода с начальным давлением $p_1 = 6$ МПа и начальной температурой $t_1 = 17^\circ \text{C}$ расширяются до конечного давления $p_2 = 0,1$ МПа. Определить объем кислорода в начале и в конце расширения и работу расширения. Процесс политропный с показателем политропы $n=1,25$.

16. 4 кг воздуха с начальным давлением $p_1 = 1,2$ МПа и начальной температурой $t_1 = -10^\circ \text{C}$ сжимаются адиабатно до конечного давления $p_2 = 2,4$ МПа. Определить объем и температуру воздуха в конце сжатия, работу сжатия и изменение внутренней энергии, если показатель адиабаты $k = 1,4$.

17. В закрытом сосуде емкостью $V = 2$ м³ находится газ, состоящий по массе из углекислого газа $\text{CO}_2 = 35\%$, азота $\text{N}_2 = 60\%$ и кислорода $\text{O}_2 = 5\%$, под давлением $p_1 = 0,6$ МПа и температуре $t_1 = 50^\circ \text{C}$. Газ нагревается до температуры $t_2 = 140^\circ \text{C}$ при постоянном давлении. Определить объемный состав, удельную газовую постоянную, среднюю молекулярную массу, массу газа и количество теплоты, затраченной на нагрев газа.

18. В закрытом сосуде емкостью $V = 1,2 \text{ м}^3$ находится газ, состоящий по объему из водорода $\text{H}_2 = 15 \%$, углекислого газа $\text{CO}_2 = 15 \%$ и азота $\text{N}_2 = 70 \%$, под давлением $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$ и температуре $t_1 = 20^\circ \text{С}$. К газу подведена теплота $Q = 170 \text{ кДж}$ при постоянном давлении. Определить удельную газовую постоянную, среднюю молекулярную массу, массу газа и конечную температуру газа.

19. В сосуде емкостью $V = 0,8 \text{ м}^3$ содержится азот под давлением $p_1 = 3 \text{ МПа}$ и при температуре $t_1 = 80^\circ \text{С}$. Определить количество теплоты, которое следует отвести от азота, чтобы понизить его давление при постоянном объеме до $p_2 = 0,3 \text{ МПа}$, и массу азота, находящегося в сосуде.

20. 2 кг воздуха с начальным давлением $p_1 = 0,12 \text{ МПа}$ и начальной температурой $t_1 = 20^\circ \text{С}$ сжимаются при постоянном давлении до удельного объема $v_2 = 0,05 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определить работу сжатия, изменение внутренней энергии и количество отведенной теплоты от воздуха.

21. 1 кг воздуха с начальным давлением $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$ и начальной температурой $t_1 = 60^\circ \text{С}$ сжимается политропно до конечной температуры $t_2 = 520^\circ \text{С}$. Определить работу сжатия, изменение внутренней энергии и количество отведенной теплоты от воздуха, если показатель политропы $n = 1,35$.

22. В одноступенчатом компрессоре сжимается политропно воздух до конечного давления $p_2 = 0,6 \text{ МПа}$. Начальная температура воздуха $t_1 = 17^\circ \text{С}$ и давление $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$. Определить конечную температуру воздуха и работу, затраченную на сжатие 1 кг воздуха, если показатель политропы $n = 1,25$.

23. В одноступенчатом компрессоре сжимается адиабатно двуокись углерода до давления $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$. Начальная температура двуокиси углерода $t_1 = -5^\circ \text{С}$ и давление $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$. Определить работу, затраченную на сжатие 1 кг двуокиси углерода, и конечную температуру двуокиси углерода, если показатель адиабаты $k = 1,28$.

24. 1 кг воздуха с начальным давлением $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и начальной температурой $t_1 = 20^\circ \text{С}$ сжимается политропно до конечного давления $p_2 = 1 \text{ МПа}$. Определить работу сжатия, изменение внутренней энергии и количество отведенной теплоты от воздуха, если показатель политропы $n = 1,3$.

25. Перегретый водяной пар с начальным давлением $p_1 = 0,1$ МПа и начальной температурой $t_1 = 230^\circ \text{C}$ сжимается изотермически до степени сухости $x_2 = 0,85$. Определить параметры пара в начальном и конечном состояниях, количество отведенной теплоты от пара, изменение внутренней энергии и работу сжатия. Изобразить тепловой процесс в is -диаграмме.

26. До какого давления должно быть произведено дросселирование перегретого водяного пара с начальным давлением $p_1 = 10$ МПа и начальной температурой $t_1 = 400^\circ \text{C}$, чтобы удельный объем пара увеличился в 1,5 раза. Определить уменьшение температуры при дросселировании, изменение удельной энтропии и потерю работоспособности 1 кг пара, приняв низшую температуру в рассматриваемой системе 30°C . Изобразите тепловой процесс в is -диаграмме.

27. Поршневой компрессор производительностью 150 м³/час сжимает воздух от давления 0,1 МПа до давления 0,4 МПа. Как изменится теоретическая мощность компрессора, если использовать его для сжатия азота, сохранив прежнюю производительность и давления. Начальная температура газов 20°C , процесс сжатия политропный $n = 1,2$.

28. Для идеального цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении определите работу цикла, подведенную и отведенную теплоту, термический КПД цикла. Начальные параметры рабочего тела (воздух): $p_1 = 0,1$ МПа, $T_1 = 300\text{K}$., степень повышения давления в компрессоре равна 10,5, максимальная температура в камере сгорания 1000 К.

29. ГТУ работает по идеальному циклу с подводом теплоты при постоянном давлении. Начальное состояние воздуха определяется давлением 1,2 бар и температурой 30°C . Давление в камере сгорания 6 бар, степень предварительного расширения 2,04. Количество подведенной теплоты – 500 кДж/кг. Расход газа 1,25 кг/с. Определить параметры воздуха во всех точках цикла, теоретическую мощность ГТУ.

30. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $v = \text{const}$ определить количество подведенной теплоты q_1 , полезную работу ι и термический к.п.д. цикла η_t , если количество отведенной

теплоты $q_2 = 500$ кДж/кг, степень сжатия $\varepsilon = 8$ и показатель адиабаты $k = 1,4$. Изобразить цикл в p - v -диаграмме.

31. Определить для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты параметры (p, v, T) в характерных для цикла точках, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и термический к.п.д. цикла, если начальное давление $p_1 = 0,12$ МПа, начальная температура $t_1 = 25^\circ \text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 18$, степень повышения давления $\lambda = 1,5$, степень предварительного расширения $\rho = 1,6$ и показатель адиабаты $k = 1,4$. Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Изобразить цикл в p - v -диаграмме.

32. В цикле идеального поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $p = \text{const}$ начальное давление $p_1 = 0,12$ МПа, начальная температура $t_1 = 10^\circ \text{C}$, степень сжатия $\varepsilon = 12$, степень предварительного расширения $\rho = 2,0$ и показатель адиабаты $k = 1,4$. Определить параметры (p, v, T) в характерных для цикла точках, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и термический к.п.д. цикла. Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Изобразить цикл в p - v -диаграмме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин, Н.В. Системы воздухообеспечения промышленных предприятий / Н.В. Калинин, И.А. Кабанова, В.А. Галковский, В.М. Костюченко // учеб. пособие по курсу «Технологические энергосистемы предприятий». – Смоленск. - 2005 г. - 132 с.
2. Дыскин, Л.М. Воздухообеспечение производственного предприятия. Л.М. Дыскин, Осипов Ю.В. - Нижний Новгород: ННГАСУ, 2010. – 52 с.
3. Кузнецов, Ю.В., Сжатый воздух. Ю.В. Кузнецов, М.Ю. Кузнецов - 2-е изд., перераб. и доп. - Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 511 с.

Методические указания

КОМПРЕССОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Методические указания

Составитель: *Довгялло Александр Иванович*

Редактор

Компьютерная вёрстка: Пулькина А.Ю.

Подписано в печать _____. Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная. Печ. л. _____.

Тираж _____ экз. Заказ _____. Арт. _____ / 2016.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Изд-во Самарского университета.

443086, Самара, Московское шоссе, 34.