

Задача 1.

В процессе изменения состояния 1 кг газа (воздуха) внутренняя энергия его увеличивается на $\Delta u = 4$ кДж/кг. При этом над газом совершается работа, равная $l = 10$ кДж/кг. Начальная температура газа $t_1 = 17^\circ\text{C}$, конечное давление $p_2 = 0,7$ МПа.

Определить для заданного газа показатель политропы n , начальные и конечные параметры, изменение энтропии Δs и изменение энтальпии Δh . Представить процесс в $p - v$ и $T - s$ - диаграммах. Изобразите также (без расчета) изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный процессы, проходящие через ту же начальную точку, и дать их сравнительный анализ.

Решение:

1. Определение показателя политропы:

$$\Delta u = \frac{n-1}{1-k} l \Rightarrow n = \frac{\Delta u(1-k)}{l} + 1,$$

где k – показатель адиабаты, для воздуха $k = 1,4$.

$$n = \frac{4(1-1,4)}{10} + 1 = 0,84.$$

2. Определение начальных и конечных параметров

$$p_2 \cdot v_2 = R \cdot T_2 \Rightarrow T_2 = \frac{p_2 \cdot v_2}{R},$$

$$l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) \Rightarrow T_2 = T_1 - \frac{l(n-1)}{R},$$

где R – газовая постоянная, Дж/кг, для воздуха $R = 287$ Дж/кг.

$$T_1 = t_1 + 273 = 17 + 273 = 290 \text{ К};$$

$$T_2 = 290 - \frac{10 \cdot 10^3 (0,84 - 1)}{287} = 324,8 \text{ К};$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow P_1 = \frac{P_2}{\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}} = \frac{0,7 \cdot 10^6}{\left(\frac{324,8}{290} \right)^{\frac{0,84}{0,84-1}}} = 1,27 \text{ МПа};$$

$$p_2 \cdot v_2 = R \cdot T_2 \Rightarrow v_2 = \frac{R \cdot T_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 324,8}{0,7 \cdot 10^6} = 0,13 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$p_1 \cdot v_1 = R \cdot T_1 \Rightarrow v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 290}{1,27 \cdot 10^6} = 0,065 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

3. Определение изменения энтропии

$$\Delta s = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1},$$

где c_v – массовая изохорная теплоемкость, Дж/кгК.

$$c_v = \frac{\mu c_{v0}}{\mu} = \frac{20,93}{28,96} = 0,72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

где μc_v – мольная изохорная теплоемкость, кДж/кмольК, для воздуха $\mu c_v = 20,93$ кДж/кмольК;

μ – молярная масса, для воздуха $\mu = 28,96$.

Тогда

$$\Delta s = 0,72 \cdot \frac{0,84-1,4}{0,84-1} \cdot \ln \frac{324,8}{290} = 0,29 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

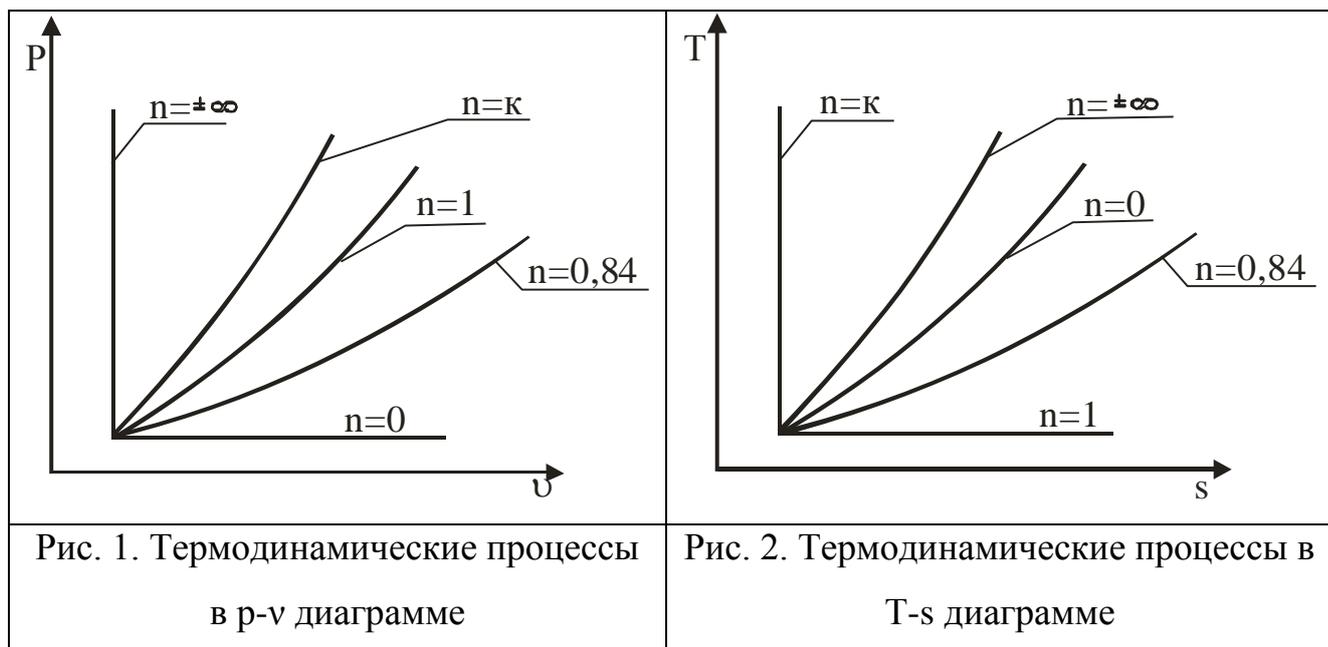
4. Определение изменения энтальпии

$$\Delta i = c_p \cdot (T_2 - T_1) = 1,01 \cdot (324,8 - 290) = 35,15 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где c_p – массовая изобарная теплоемкость, Дж/кгК.

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,31}{28,96} = 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

где μc_p – мольная изохорная теплоемкость, кДж/кмольК, для воздуха $\mu c_p = 29,31$ кДж/кмольК.



Задача 2.

Определить параметры рабочего тела в характерных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с изохорно-изобарным подводом теплоты (смешанный цикл), если известны давление $p_1 = 0,135$ МПа и температура $t_1 = 25^\circ\text{C}$ рабочего тела в начале сжатия. Степень сжатия $\varepsilon = 16,0$, степень повышения давления $\lambda = 2,1$, степень предварительного расширения $\rho = 1,4$.

Определить работу, получаемую от цикла, его термический КПД и изменение энтропии отдельных процессов цикла. За рабочее тело принять воздух, считая теплоемкость его в расчетном интервале температур постоянной.

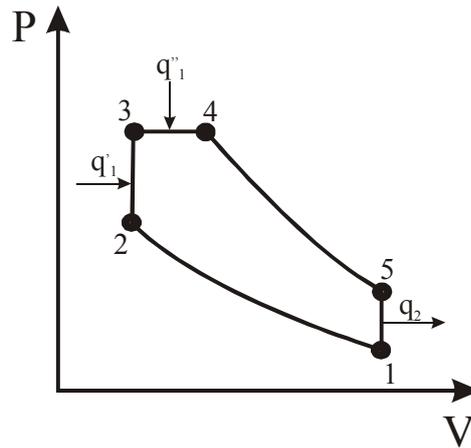


Рис. 1. Идеальный цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания с изохорно-изобарным расширением

Решение:

Точка 1.

$$p_1 = 0,135 \text{ Мпа}, T_1 = t_1 + 273 = 25 + 273 = 298 \text{ К}.$$

Из уравнения состояния газа определяем первоначальный удельный объем

$$p_1 \cdot v_1 = RT_1 \Rightarrow v_1 = \frac{RT_1}{p_1}.$$

Газовая постоянная воздуха, определится

$$R = \frac{8314}{\mu_v},$$

где μ_v – молярная масса воздуха, кмоль, $\mu_v = 28,96$ кмоль.

Тогда

$$R = \frac{8314}{28,96} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$v_1 = \frac{287 \cdot 298}{0,135 \cdot 10^6} = 0,63 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Точка 2.

Процесс 1 – 2 адиабатное сжатие.

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,63}{16} = 0,039 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} = \varepsilon^{\kappa-1} \Rightarrow T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1},$$

где κ – показатель адиабаты, для воздуха $\kappa = 1,4$.

$$T_2 = 298 \cdot 16^{1,4-1} = 903,4 \text{ К.}$$

Давление в конце адиабатического сжатия определяем из уравнения состояния газа

$$p_2 \cdot v_2 = R \cdot T_2 \Rightarrow p_2 = \frac{RT_2}{v_2};$$

$$p_2 = \frac{287 \cdot 903,4}{0,039} = 6,65 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Точка 3.

Процесс 2 – 3 изохорный, т.е. $v = \text{const}$. Тогда $v_2 = v_3 = 0,039 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$.

Давление находим из соотношения

$$\frac{p_3}{p_2} = \lambda \Rightarrow p_3 = \lambda \cdot p_2 = 2,1 \cdot 6,65 \cdot 10^6 = 14 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Так как

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow T_3 = \frac{p_3}{p_2} \cdot T_2;$$

$$T_3 = \frac{14 \cdot 10^6}{6,65 \cdot 10^6} \cdot 903,4 = 1901,9 \text{ К.}$$

Точка 4.

Процесс 3 – 4 изобарный, т.е. $p = \text{const}$. Тогда $p_3 = p_4 = 14 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

Объем и температура определяются из соотношения

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{v_4}{v_3} = \rho \Rightarrow$$

$$T_4 = T_3 \cdot \rho = 1901,9 \cdot 1,4 = 2662,7\text{K};$$

$$v_4 = v_3 \cdot \rho = 0,039 \cdot 1,4 = 0,055 \frac{\text{M}^3}{\text{кг}}$$

Точка 5.

Процесс 4 – 5 адиабатное сжатие.

Зависимость между объемами и температурами запишется в виде

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^{\kappa-1},$$

причем $v_4 = v_2 \cdot \rho$; $v_5 = v_1 = 0,63 \frac{\text{M}^3}{\text{кг}}$, то

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{\rho \cdot v_2}{v_1} \right)^{\kappa-1},$$

где $\frac{v_2}{v_1} = \varepsilon$, тогда $\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right)^{\kappa-1} \Rightarrow T_5 = T_4 \cdot \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \right)^{\kappa-1} = 2662,7 \cdot \left(\frac{1,4}{16} \right)^{1,4-1} = 1004,9\text{K}$.

Давление определяем из уравнения состояния газа для 1 кг.

$$p_5 \cdot v_5 = R \cdot T_5 \Rightarrow p_5 = \frac{R \cdot T_5}{v_5} = \frac{287 \cdot 1004,9}{0,63} = 0,46 \cdot 10^6 \text{Па}.$$

Работа цикла может быть определена как разность между работой расширения и работой сжатия.

Работа определится

$$l = q_1 - q_2,$$

где q_1 – количество теплоты, подводимое к рабочему телу, кДж;

q_2 - количество теплоты, отводимое от рабочего тела, кДж.

$$q_1 = q'_1 + q''_1 = C_v(T_3 - T_2) + C_p(T_4 - T_3),$$

где C_v - массовая теплоемкость при постоянном объеме, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$;

C_p - массовая теплоемкость при постоянном давлении, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

$$C_v = \frac{\mu C_v}{\mu},$$

где μC_v - мольная теплоемкость при постоянном объеме, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, для

$$\text{воздуха } \mu C_v = 20,93 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Тогда

$$C_v = \frac{20,93}{28,96} = 0,72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$C_p = \frac{\mu C_p}{\mu},$$

где μC_p - мольная теплоемкость при постоянном давлении, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, для

$$\text{воздуха } \mu C_p = 29,31 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$C_p = \frac{29,31}{28,96} = 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Тогда

$$q_1 = 0,72(1901,9 - 903,4) + 1,01(2662,7 - 1901,9) = 1487,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

$$q_2 = C_v(T_5 - T_1) = 0,72(1004,9 - 298) = 509 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Работа цикла

$$l = 1487,3 - 509 = 978,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Термический КПД цикла равен

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{509}{1487,3} = 0,66.$$

Определяем изменение энтропии в различных процессах

- для процессов 1 - 2 и 4 - 5

$\Delta S_{1-2} = 0$ и $\Delta S_{4-5} = 0$, т.к. процесс адиабатический;

- для процесса 2 - 3

$$\Delta S_{2-3} = C_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,72 \cdot \ln \frac{1901,9}{903,4} = 0,54 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

- для процесса 3 - 4

$$\Delta S_{3-4} = C_p \cdot \ln \frac{T_4}{T_3} = 1,01 \cdot \ln \frac{2662,7}{1901,9} = 0,34 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

- для процесса 5 - 1

$$\Delta S_{5-1} = C_v \cdot \ln \frac{T_5}{T_1} = 0,72 \cdot \ln \frac{298}{1004,9} = -0,88 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Задача 3.

Смесь газов с начальной температурой $t_1 = 25^\circ\text{C}$ сжимается в одноступенчатом поршневом компрессоре от давления $p_1 = 0,1$ МПа до давления $p_2 = 0,95$ МПа. Сжатие может проходить по изотерме, по адиабате и по политропе с показателем политропы $n = 1,33$. Определить для каждого из трех процессов сжатия конечную температуру газа t_2 , отведенное от смеси тепло Q кВт, изменение внутренней энергии и энтропии смеси и теоретическую мощность компрессора, если его производительность $G = 0,3 \cdot 10^3$ кг/ч. Дать сводную таблицу и изображение процессов сжатия в $p - v$ и $T - s$ - диаграммах, а также какое количество воды необходимо прокачивать через рубашку цилиндра при сжатии газа по изотерме и по политропе, если температура воды при этом повышается на 20°C ? Состав смеси: $2\text{кг O}_2 + 8\text{кг N}_2$.

Указание. Расчет провести без учета зависимости теплоемкости от температуры.

Решение:

1. Определяем газовую постоянную смеси

$$R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}},$$
$$\mu_{см} = \frac{1}{\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}}.$$

массовые доли определяются как:

$$m_1 = \frac{M_{O_2}}{M} = \frac{2}{10} = \frac{1}{5},$$
$$m_2 = \frac{M_{N_2}}{M} = \frac{8}{10} = \frac{4}{5}.$$

Молярная масса кислорода $\mu_{O_2} = 32 \text{ кмоль}$, $\mu_{N_2} = 28,16 \text{ кмоль}$, тогда

$$\mu_{см} = \frac{1}{\frac{1}{5 \cdot 32} + \frac{4}{5 \cdot 28,16}} = 28,85 \frac{\text{кмоль}}{\text{кг}},$$
$$R_{см} = \frac{8314}{28,85} = 288,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

2. Определение первоначального объема смеси v_1 .

$$T_1 = t_1 + 273 = 25 + 273 = 298 \text{ К},$$
$$p_1 \cdot v_1 = R_{см} \cdot T_1 \Rightarrow v_1 = \frac{R_{см} \cdot T_1}{p_1} = \frac{288,2 \cdot 298}{0,1 \cdot 10^6} = 0,86 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

3. Сжатие компрессора по изотерме

$$T_2 = T_1 = 298 \text{ К}.$$

- теоретическая работа компрессора определится

$$l = R_{см} \cdot T \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} = 288,2 \cdot 298 \cdot \ln \frac{0,95}{0,1} = 193,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$
$$L = l \cdot G = 193,3 \cdot \frac{0,3 \cdot 10^3}{3600} = 16,1 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}.$$

- изменение внутренней энергии

$$\Delta U = 0$$

- изменение энтропии смеси

$$\Delta s = R_{см} \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = 288,2 \cdot \ln \frac{0,1}{0,95} = -648,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot G = -648,8 \cdot \frac{0,3 \cdot 10^3}{3600} = -54,1 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{с}}.$$

- количество отведенного от смеси тепла

$$Q = L = 16,1 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}.$$

- теоретическая мощность компрессора

$$N = Q = 16,1 \text{ кВт}.$$

4. Сжатие компрессора по адиабате.

$\kappa = 1,4$ – показатель адиабаты.

- конечная температура

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 298 \cdot \left(\frac{0,95}{0,1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 567 \text{ К}.$$

- теоретическая работа компрессора

$$l = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot R_{см} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 288,2 \cdot 298 \cdot \left[\left(\frac{0,95}{0,1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 271,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$L = l \cdot G = 271,3 \cdot \frac{0,3 \cdot 10^3}{3600} = 22,6 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}.$$

- изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_{всм}(T_2 - T_1),$$

$$c_{всм} = m_{O_2} \cdot c_{vO_2} + m_{N_2} \cdot c_{vN_2} = \frac{1 \cdot 20,93}{5 \cdot 32} + \frac{4 \cdot 20,93}{5 \cdot 28,16} = 0,72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$\Delta u = 0,72 \cdot (567 - 298) = 193,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot G = 193,7 \cdot \frac{0,3 \cdot 10^3}{3600} = 16,1 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}.$$

- изменение энтропии смеси

$$\Delta S = 0.$$

- количество отведенного от смеси тепла

$$dQ = 0.$$

- теоретическая мощность компрессора

$$N = L = 22,6 \text{ кВт}.$$

5. Сжатие компрессора по политропе.

$n = 1,33$ – показатель политропы.

- конечная температура

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 298 \cdot \left(\frac{0,95}{0,1} \right)^{\frac{1,33-1}{1,33}} = 521 \text{ К}.$$

- теоретическая работа компрессора

$$l = \frac{n}{n-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{1,33}{1,33-1} \cdot 0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,86 \cdot \left[\left(\frac{0,95}{0,1} \right)^{\frac{1,33-1}{1,33}} - 1 \right] = 259,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$L = l \cdot G = 259,3 \cdot \frac{0,3 \cdot 10^3}{3600} = 21,6 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}.$$

- теоретическая мощность компрессора

$$N = L = 21,6 \text{ кВт}.$$

- количество отведенного от смеси тепла

$$Q = G_T \cdot c_v \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{0,3 \cdot 10^3}{3600} \cdot 0,72 \cdot 10^3 \cdot \frac{1,33-1,4}{1,33-1} \cdot (521-298) = -28382 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

- изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1) = 0,72 \cdot 10^3 \cdot (521-298) = 160,6 \text{ кДж/кг}.$$

$$\Delta U = \Delta u \cdot G = 160,6 \cdot \frac{0,3 \cdot 10^3}{3600} = 13,4 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}.$$

- изменение энтропии смеси

$$\Delta s = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 0,72 \cdot 10^3 \cdot \frac{1,33-1,4}{1,33-1} \cdot \ln \frac{521}{298} = -85,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}},$$

$$\Delta S = \Delta s \cdot G = -85,3 \cdot \frac{0,3 \cdot 10^3}{3600} = -7,1 \frac{\text{кДж}}{\text{К} \cdot \text{с}}.$$

6. Количество воды, которое необходимо прокачивать через рубашку цилиндра при сжатии:

- по изотерме

$$Q = c_B \cdot m_B \cdot \Delta t \Rightarrow m_B = \frac{Q}{c_B \cdot \Delta t},$$

где $c_B = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – теплоемкость воды.

$$m_B = \frac{16100}{4,19 \cdot 10^3 \cdot 20} = 0,19 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

- по политропе

$$m_B = \frac{28382}{4,19 \cdot 10^3 \cdot 20} = 0,34 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Задача 4.

Определить потребную поверхность рекуперативного теплообменника, в котором вода нагревается горячими газами. Расчет произвести для противоточной и прямоточной схем. Привести графики изменения температур для обеих схем движения, если расход воды $2,5 \text{ кг/с}$. Значения температур газа $t_{1,н} = 450^\circ\text{C}$, $t_{1,к} = 225^\circ\text{C}$, воды $t_{2,н} = 20^\circ\text{C}$, $t_{2,к} = 100^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплопередачи $K = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Решение:

Количество теплоты переданное от газов к воде при заданных условиях равно:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t,$$

откуда

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}.$$

Определим количество теплоты, полученное водой при нагревании воды с 20°C до 100°C в теплообменнике.

$$Q = M \cdot C_B (t_{2,к} - t_{2,н}) = 2,5 \cdot 4,187(100 - 20) = 838 \text{ кДж/с}.$$

Для определения температурного напора построим графики изменения температур

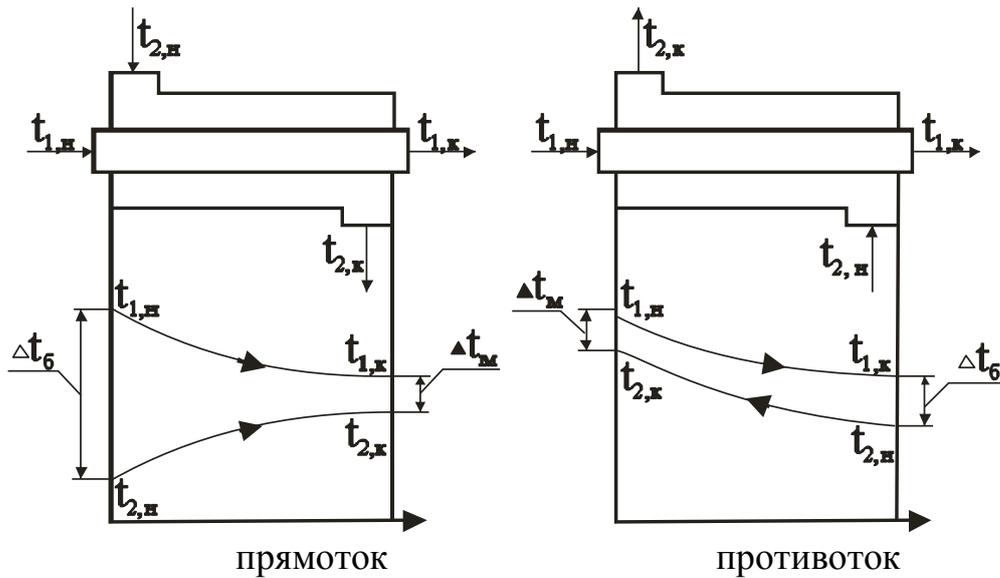


Рис. 2. Графики изменения температур

Для прямотока: $\Delta t_{\text{б}} = t_{1,\text{н}} - t_{2,\text{н}} = 450 - 20 = 430^{\circ}\text{C}$;

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{1,\text{к}} - t_{2,\text{к}} = 225 - 100 = 125^{\circ}\text{C};$$

Для противотока: $\Delta t_{\text{б}} = t_{1,\text{н}} - t_{2,\text{к}} = 450 - 100 = 350^{\circ}\text{C}$;

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{1,\text{к}} - t_{2,\text{н}} = 225 - 20 = 205^{\circ}\text{C};$$

В обоих случаях $\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} > 1,7$. Следовательно, температурный напор

определяется как среднелогарифмическое значение по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}.$$

Тогда для прямотока:

$$\Delta t_1 = \frac{430 - 125}{\ln \frac{430}{125}} = 247^{\circ}\text{C}.$$

Для противотока:

$$\Delta t_2 = \frac{350 - 205}{\ln \frac{350}{205}} = 274^{\circ} \text{C}.$$

Следовательно, необходимая поверхность рекуперативного теплообменника равна:

для прямотока:

$$F_1 = \frac{835 \cdot 10^3}{20 \cdot 247} = 169 \text{ м}^2.$$

для противотока

$$F_2 = \frac{835 \cdot 10^3}{20 \cdot 274} = 152 \text{ м}^2.$$

Значит, при одинаковых выходных тепловых параметрах на изготовление противоточного теплообменника требуется значительно меньше материала.

Задача 5.

Рассчитать теплотребление производственного корпуса на 100 грузовых автомобилей размером 60х36х7,2 м с 2^х этажным пристроем – административно – бытовым корпусом 18х12х7,2 м с количеством рабочих, равным 50 человек.

Решение:

Определяем максимальный расход теплоты, расходуемой на отопление производственного здания:

$$\Phi_{\text{от}} = q_{\text{от}} \cdot V_{\text{н}}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot a, \text{ кВт},$$

где $q_{\text{от}} = 0,6 \text{ Вт/м}^3 \text{ К}$ – удельная отопительная характеристика здания (таблица 2. Приложения);

$V_{\text{н}} = 15552 \text{ м}^3$ – объем здания по наружному обмеру;

$t_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C}$ – внутренняя расчетная температура;

$t_n = -35^{\circ}\text{C}$ – наружная температура воздуха (для условий Кировской области);

$a = 0,54 + 22/(t_b - t_n) = 0,54 + 22 / [20-(-35)] = 0,58$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние на удельную тепловую характеристику местных климатических условий.

Тогда

$$\Phi_{от} = 0,6 \cdot 15552[20-(-35)] \cdot 0,58 = 297,7 \text{ кВт.}$$

Находим максимальный расход теплоты на отопление общественного помещения

$$\Phi_{от} = 0,5 \cdot 1555[20-(-35)] \cdot 0,58 = 24,8 \text{ кВт.}$$

Определяем максимальный поток теплоты на вентиляцию производственного здания.

$$\Phi_v = q_v \cdot V_n(t_b - t_{н,в}), \text{ кВт,}$$

где $q_v = 0,2 \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{К}$ – удельная вентиляционная характеристика здания (таблица 2. Приложения).

$$\Phi_v = 0,2 \cdot 15552[20-(-35)] = 171 \text{ кВт.}$$

Расход теплоты на горячее водоснабжение на один автомобиль в производственном помещении определится:

$$\Phi_{г.в.пр} = 0,278 \cdot V_{г.в.} \cdot C_v(t_r - t_x), \text{ Вт,}$$

где $V_{г.в.} = 250 \text{ л/сут} = 10,4 \text{ кг/ч}$ – часовой расход горячей воды.

$C_v = 4,187 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ – теплоемкость воды при $t = 55^{\circ}\text{C}$ [2];

$t_r = 55^{\circ}\text{C}$ – расчетная температура горячей воды;

$t_x = 5^{\circ}\text{C}$ – расчетная температура холодной воды.

Тогда

$$\Phi_{г.в.пр} = 0,278 \cdot 10,4 \cdot 4,187(55-5) = 0,605 \text{ кВт.}$$

На 100 грузовых автомобилей $\Phi_{г.в.пр} = 0,605 \cdot 100 = 60,5 \text{ кВт.}$

Максимальный расход теплоты на горячее водоснабжение общественного здания:

$$\Phi_{г.в.о} = 2 \cdot \Phi_{г.в.сп} = 2 \cdot 16 = 32 \text{ кВт,}$$

где $\Phi_{г.в.сп} = q_{г.в.} \cdot n = 50 \cdot 320 = 16000 \text{ Вт,}$

где $n = 50$ – количество рабочих;

$q_{г.в.} = 320$ Вт – укрупненный показатель.

В летний период

$$\Phi_{г.в.об} = 0,65 \cdot \Phi_{г.в.о} = 0,65 \cdot 32 = 20,8 \text{ кВт},$$

$$\Phi_{г.в.пр} = 0,82 \cdot \Phi_{г.в.пр} = 0,82 \cdot 60,5 = 49,6 \text{ кВт}.$$

Определяем расход теплоты на технологические нужды автопредприятия:

$$\Phi_T = 0,278 \cdot \psi \cdot G(i - k_B \cdot i_{вод}), \text{ Вт},$$

где ψ_T – коэффициент спроса на теплоту, равный $0,6 \dots 0,7$, принимаем

$$\psi = 0,65;$$

G – расход теплоносителя, кг/ч;

i – энтальпия теплоносителя, кДж/кг. Принимаем $i = 398$ кДж/кг для воды при $t = 95^\circ\text{C}$ [2];

$i_{вод} = 280$ кДж/кг – энтальпия обратной воды [2];

$k_B = 0,7$ – коэффициент возврата обратной воды.

Расход теплоносителя (воды при $t = 95^\circ\text{C}$) для получения смешанной воды с температурой $t_{см} = 60^\circ\text{C}$ равен:

$$G = \frac{G_{см}(t_{см} - t_x)}{95 - t_x}, \text{ кг/ч},$$

где $t_x = 10^\circ\text{C}$ – температура холодной воды;

$G_{см} = n \cdot q / 24$ кг/ч – количество смешанной воды;

n – число автомобилей, подвергающихся мойке в течение суток.

Принимаем $n = 20$ автомобилей.

$Q = 250$ кг/сут – среднесуточный расход воды на мойку одного автомобиля.

Тогда

$$G_{см} = \frac{20 \cdot 250}{24} = 208 \text{ кг/ч},$$

$$G = \frac{208(60 - 10)}{95 - 10} = 122,4 \text{ кг/ч.}$$

Следовательно

$$\Phi_T = 0,278 \cdot 0,65 \cdot 122,4 \cdot (398 - 0,7 \cdot 280) = 4450 \text{ Вт} = 4,5 \text{ кВт.}$$

Средневзвешенная расчетная температура равна

$$t_{в.ср} = (15552 \cdot 18 + 1555 \cdot 20) / 17107 = 18^{\circ}\text{C.}$$

Строим годовой график потребления теплоты производственного корпуса на 100 грузовых автомобилей.

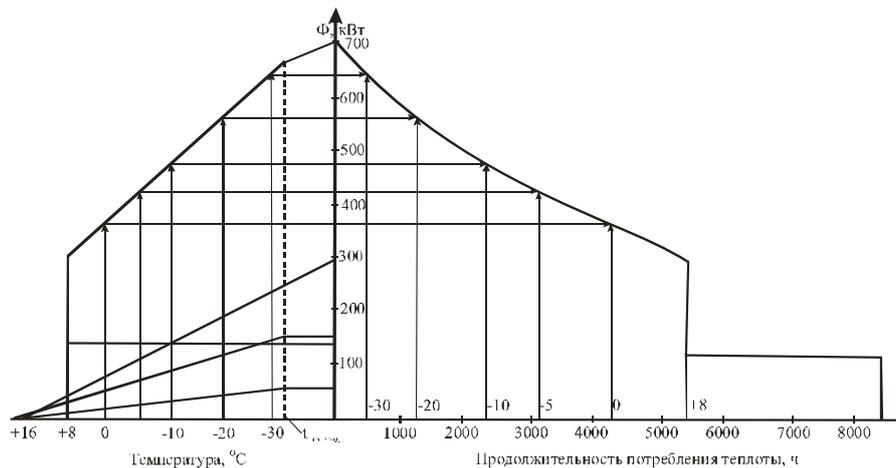


Рис. 3. Годовой график потребления тепла производственным корпусом на 100 грузовых автомобилей.

Находим суммарный годовой расход теплоты:

$$Q_{\text{год}} = 3,6 \cdot 10^{-6} F \cdot m_{\text{ср}} \cdot m_i, \text{ ГДж/год,}$$

где $F = 4178 \text{ мм}^2$ – площадь годового графика;

$m_{\text{ср}} = 8,3 \text{ Вт/мм}$ – масштаб расход теплоты;

$m_i = 66,7 \text{ ч/мм}$ – масштаб времени потребления теплоты.

Тогда

$$Q_{\text{год}} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 4178 \cdot 8,3 \cdot 66,7 = 8,7 \text{ ГДж/год}$$

ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Задача 1. В процессе изменения состояния 1 кг газа внутренняя энергия его увеличивается на Δu . При этом над газом совершается работа, равная l . Начальная температура газа t_1 , конечное давление p_2 .

Определить для заданного газа показатель политропы n , начальные и конечные параметры, изменение энтропии Δs и изменение энтальпии Δh . Представить процесс в $p - v$ и $T - s$ - диаграммах. Изобразите также (без расчета) изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный процессы, проходящие через ту же начальную точку, и дать их сравнительный анализ. Данные для решения задачи выбрать из таблицы 1.

Таблица 1

Последняя цифра шифра	Род газа	Предпоследняя цифра шифра	Δu , кДж/кг	l , кДж/кг	t_1 , °С	p_2 , Мпа
0	воздух	0	2	5	15	0,5
1	O ₂	1	4	10	17	0,7
2	N ₂	2	6	15	19	0,9
3	CO	3	8	20	25	1,1
4	CO ₂	4	10	25	27	1,3
5	H ₂	5	12	30	30	1,5
6	H ₂ S	6	14	35	32	1,7
7	SO ₂	7	16	40	35	1,9
8	NO ₂	8	18	45	40	2,0
9	воздух	9	20	50	45	2,2

Контрольный вопрос. Какова общая формулировка и математическое выражение первого закона термодинамики?

Задача 2. Определить параметры рабочего тела в характерных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с изохорно-изобарным подводом теплоты (смешанный цикл), если известны давление p_1 и температура t_1 рабочего тела в начале сжатия. Степень сжатия ϵ , степень повышения давления λ , степень предварительного расширения ρ заданы.

Определить работу, получаемую от цикла, его термический КПД и

изменение энтропии отдельных процессов цикла. За рабочее тело принять воздух, считая теплоемкость его в расчетном интервале температур постоянной.

Построить на "миллиметровке" в масштабе этот цикл в координатах $p - v$ и $T - s$. Дать к полученным диаграммам соответствующие пояснения. Данные для решения задачи выбрать из таблицы 2.

Таблица 2

Последняя цифра шифра	p_1 , МПа	t_1 , °С	Предпоследняя цифра шифра	ϵ	λ	ρ
0	0,089	15	0	16,3	1,7	1,11
1	0,092	17	1	16,2	1,8	1,0
2	0,095	20	2	16,1	1,9	1,1
3	0,100	22	3	16,0	2,0	1,2
4	0,110	25	4	15,9	2,1	1,3
5	0,120	27	5	15,8	2,2	1,4
6	0,125	30	6	15,7	2,3	1,5
7	0,130	32	7	16,0	2,4	1,1
8	0,135	35	8	15,9	2,5	1,2
9	0,140	37	9	16,3	2,6	1,3

Контрольный вопрос. В чем смысл второго закона термодинамики?

Задача 3. Смесь газов 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 проходить по изотерме, по адиабате и по политропе с показателем политропы n . Определить для каждого из трех процессов сжатия конечную температуру газа t_2 , отведенное от смеси тепло Q кВт, изменение внутренней энергии и энтропии смеси и теоретическую мощность компрессора, если его производительность G . Дать сводную таблицу и изображение процессов сжатия в $p - v$ и $T - s$ - диаграммах, а также какое количество воды необходимо прокачивать через рубашку цилиндра при сжатии газа по изотерме и по политропе, если температура воды при этом повышается на 20°C ?

Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 3.

Указание. Расчет провести без учета зависимости теплоемкости от температуры.

Таблица 3

Последняя цифра шифра	Состав смеси	n	Предпоследняя цифра шифра	p_2 , МПа	$10^{-3} G$, кг/ч
0	2 кг O ₂ + 8 кг N ₂	1,25	0	0,9	0,3
1	5 кг CO + 5 кг CO ₂	1,22	1	1,0	0,4
2	3 кг CO + 7 кг O ₂	1,30	2	0,85	0,5
3	6 кг N ₂ + 4 кг CO ₂	1,35	3	0,8	0,6
4	5 кг H ₂ O + 5 кг CO ₂	1,29	4	0,95	0,7
5	2 кг N ₂ + 8 кг H ₂	1,23	5	0,9	0,8
6	4 кг CO + 6 кг H ₂	1,27	6	0,85	0,9
7	2 кг CO ₂ + 8 кг CO	1,25	7	0,9	1,0
8	1 кг H ₂ + 9 кг N ₂	1,33	8	0,8	1,1
9	5 кг N ₂ + 5 кг CO ₂	1,28	9	0,85	1,2

Контрольный вопрос. В каком из процессов сжатия мощность, затрачиваемая на привод компрессора, будет больше?

Задача 4. Определить потребную поверхность рекуперативного теплообменника, в котором вода нагревается горячими газами. Расчет провести для прямоточной и противоточной схем. Привести графики изменения температур для обеих схем движения. Значения температур газа t'_1 и t''_1 , воды t'_2 и t''_2 , расхода воды M и коэффициента теплопередачи K выбрать из таблицы 4.

Таблица 4

Последняя цифра шифра	t'_1 , °C	t''_1 , °C	t'_2 , °C	t''_2 , °C	Предпоследняя цифра шифра	M , кг/с	K , Вт/(м ² К)
0	300	150	10	80	0	1,4	30
1	325	175	15	90	1	1,3	32
2	350	200	20	100	2	1,2	34
3	375	225	25	110	3	1,1	36
4	400	250	30	120	4	1,0	38
5	425	275	25	130	5	0,9	40
6	450	300	20	140	6	0,8	42
7	475	325	15	130	7	0,7	44
8	500	350	10	120	8	0,6	46
9	525	375	20	110	9	0,5	48

Контрольный вопрос. Какая из схем теплообменников (прямоточная или противоточная) имеет меньшую поверхность и почему?

Задача 5. Рассчитать теплотребление производственного корпуса на N грузовых автомобилей размером $L \times V \times H$ м с 2^x этажным пристроем – административно-бытовым корпусом $L_1 \times V_1 \times H_1$ м с количеством рабочих, равным M человек. Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 5.

Таблица 5

Последняя цифра шифра	N , шт	$L \times V \times H$, м	Предпоследняя цифра шифра	$L_1 \times V_1 \times H_1$, м	M , чел
0	50	18x36x7,2	0	6x6x7,2	25
1	60	36x36x7,2	1	6x12x7,2	30
2	70	48x48x7,2	2	12x18x7,2	35
3	80	48x36x7,2	3	12x12x7,2	40
4	90	54x36x7,2	4	18x12x7,2	45
5	100	60x36x7,2	5	18x12x7,2	50
6	60	36x36x7,2	6	12x18x7,2	32
7	80	48x48x7,2	7	6x12x7,2	41
8	50	48x36x7,2	8	12x12x7,2	27
9	70	18x36x7,2	9	6x6x7,2	38

Контрольный вопрос: Эффективность систем отопления