

1.6 Основные термодинамические процессы

Изохорным называют процесс, протекающий при неизменном объеме рабочего тела. Зависимость между конечными и начальными параметрами (закон Шарля):

$$P_2 / P_1 = T_2 / T_1. \quad (69)$$

Работа расширения в изохорном процессе равна нулю, так как изменение объема равно нулю. Следовательно,

$$q = du = C_v dT, \quad Q = m C_v dT \quad (70)$$

или для конечного изменения температуры и произвольной массы газа:

$$\Delta U = m C_v (T_2 - T_1). \quad (71)$$

Изобарным называют процесс, протекающий при постоянном давлении. Зависимость между конечными и начальными параметрами процесса (закон Гей – Люссака):

$$V_2 / V_1 = T_2 / T_1. \quad (72)$$

Работа, которую выполняет газ при расширении, в данном случае определяется следующим образом:

$$L = P (V_2 - V_1) = m R (T_2 - T_1). \quad (73)$$

Количество теплоты, затраченное на расширение газа при постоянном давлении, равно изменению **энтальпии** газа:

$$q = \Delta h = C_p (T_2 - T_1). \quad (74)$$

Изотермическим называют процесс, протекающий при постоянной температуре. Зависимость между конечными и начальными параметрами процесса (закон Бойля-Мариотта):

$$P_2 / P_1 = V_1 / V_2 \quad \text{или} \quad PV = \text{const}. \quad (75)$$

Изменение внутренней энергии равно нулю, т.к. $T = \text{const}$.

Работа изотермического процесса определяется по формуле:

$$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{P_1}{P_2} = P_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = P_1 v_1 \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (76)$$

Адиабатным называют процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой. Уравнение адиабаты имеет следующий вид:

$$P v^k = \text{const} \quad \text{или} \quad P_1 v_1^k = P_2 v_2^k, \quad (77)$$

где k - показатель адиабаты.

Зависимость между начальными и конечными параметрами:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k. \quad (78)$$

Работа расширения при адиабатном процессе совершается за счет уменьшения внутренней энергии:

$$q = \Delta u + l = 0; \quad l = -\Delta u = C_v(T_1 - T_2). \quad (79)$$

Работу расширения 1 кг газа в адиабатном процессе можно вычислить и по другой формуле:

$$l = \frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2). \quad (80)$$

Если масса газа равна m , то

$$L = \frac{1}{k-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{R m}{k-1} (T_1 - T_2). \quad (81)$$

Политропными процессами называют процессы, которые протекают при постоянной теплоемкости. Уравнение политропы имеет вид

$$P v^n = \text{const}, \quad (82)$$

где n – показатель политропы, может принимать любое численное значение в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, но для данного процесса эта величина постоянная.

Зависимость между основными параметрами процесса:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{n-1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (83)$$

Работа расширения в политропном процессе определяется по формуле

$$L = \frac{1}{n-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{R m}{n-1} (T_1 - T_2). \quad (84)$$

Количество подведенного (или отведенного) тепла можно определить с помощью 1-го закона термодинамики:

$$q = C_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) = C_n (T_2 - T_1), \quad (85)$$

где C_n - теплоемкость идеального газа в политропном процессе.

Примеры решения задач

27 В закрытом сосуде заключен газ при разрежении 50 мм рт. ст. и температуре 70°C. Показание барометра — 760 мм рт. ст. До какой температуры нужно охладить газ, чтобы разрежение стало равным 100 мм. рт. ст.?

Решение:

Так как процесс происходит при $V = \text{const}$, то согласно формуле (69) получаем:

$$\frac{760 - 50}{760 - 100} = \frac{273 + 70}{T_2} \quad \text{или} \quad T_2 = \frac{660 \cdot 343}{710} = 318,8 \text{ К}; \quad t_2 = 45,8^\circ \text{C}.$$

28 В закрытом сосуде емкостью 0,6 м³ содержится воздух при давлении 5 бар и температуре 20°C. В результате охлаждения сосуда воздух, содержащийся в нем, теряет 105 кДж. Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, какое давление и какая температура устанавливаются после этого в сосуде.

Решение:

Пользуясь уравнением состояния (15), определяем массу воздуха в сосуде:

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 0,6}{287 \cdot 293} = 3,57 \text{ кг.}$$

Количество тепла, отводимого от воздуха при $V = \text{const}$, определяется уравнением (70):

$$Q = m C_v (t_2 - t_1) .$$

Теплоемкость определим по уравнению (45):

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1,4-1} = 717,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

Определим конечную температуру:

$$t_2 = \frac{Q}{m C_v} + t_1 = \frac{-105000}{3,57 \cdot 717,5} + 20 = -20,7^\circ \text{C} .$$

Исходя из соотношения параметров в изохорном процессе (69) имеем:

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 5 \cdot \frac{273-20,7}{293} = 4,3 \text{ бар.}$$

29 Сосуд емкостью 90 л содержит воздух при давлении 8 бар и температуре 30°C . Определить количество тепла, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление при $V=\text{const}$ до 16 бар. Принять зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Решение:

Из соотношения параметров изохорного процесса – уравнение (69) – получаем:

$$T_2 = T_1 \frac{P_2}{P_1} = 303 \cdot \frac{16}{8} = 606 \text{ К}; \quad t_2 = 606 - 273 = 333^\circ \text{С}.$$

Пользуясь данными приложения Б, находим:

$$\bar{C}_{v1} = 0,7173 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad \bar{C}_{v2} = 0,7351 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Масса воздуха, находящегося в резервуаре, определяется из уравнения Клапейрона (15):

$$m = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0,09}{287 \cdot 303} = 0,8278 \text{ кг}.$$

Количество тепла, которое необходимо сообщить воздуху,

$$Q = 0,8278 \cdot (0,7351 \cdot 333 - 0,7173 \cdot 30) = 184,8 \text{ кДж}.$$

30 Какое количество тепла необходимо затратить, чтобы нагреть 2 м^3 воздуха при постоянном избыточном давлении 2 бар от 100 до 500°С ? Какую работу при этом совершит воздух? Давление атмосферы принять равным 760 мм рт. ст.

Решение:

Пользуясь данными приложения Б (табл. Б.3), находим:

$$C_{p1} = 1,0061 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad C_{p2} = 1,0387 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

$$q_p = 1,0387 \cdot 500 - 1,0061 \cdot 100 = 418,7 \text{ кДж/кг}.$$

Массу воздуха определяем из уравнения (15):

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{(2 + 1,013) \cdot 10^5 \cdot 5}{287 \cdot 373} = 5,63 \text{ кг}.$$

Количество тепла

$$Q = m \cdot q = 5,63 \cdot 418,7 = 2357 \text{ кДж}.$$

Найденное количество тепла можно определить не только по массе воздуха, но и по его объему. В этом случае в уравнении (41) используем объемные теплоемкости.

Пользуясь приложением Б, табл. Б.5, находим:

$$C'_{p1} = 1,3004 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)} ; C'_{p2} = 1,3427 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)} .$$

Следовательно,

$$q_p = 1,3427 \cdot 500 - 1,3004 \cdot 100 = 541,4 \text{ кДж/м}^3.$$

Объем воздуха должен быть приведен к нормальным условиям по уравнению (21).

Отсюда

$$V_H = \frac{P V T_H}{T P_H} = \frac{3,013 \cdot 2 \cdot 273}{373 \cdot 1,01} = 4,35 \text{ м}^3.$$

Таким образом,

$$Q_p = 541,4 \cdot 4,35 = 2356 \text{ кДж}.$$

Работа газа по уравнению (73)

$$L = m R \Delta T = 5,63 \cdot 287 \cdot 400 = 646,4 \text{ кДж}.$$

31 В цилиндре находится воздух при давлении 5 бар и температуре 400°C. От воздуха отнимается тепло при постоянном давлении таким образом, что в конце процесса устанавливается температура 0°C. Объем цилиндра, в котором находится воздух, равен 400 л . Определить количество отнятого тепла, конечный объем, изменение внутренней энергии и совершенную работу сжатия. Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

Решение:

Объем воздуха при нормальных условиях легко определить из выражения (21):

$$V_H = \frac{P V T_H}{P_H T} = \frac{5 \cdot 0,4 \cdot 273}{1,013 \cdot 673} = 0,8 \text{ м}^3.$$

Теплоемкость воздуха находим по приложению Б (табл. Б.5):

$$C'_p = 1,3289 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Количество тепла на основании формулы (74) равно:

$$Q_p = 0,8 \cdot 1,3289 \cdot (0 - 400) = - 425 \text{ кДж}.$$

Количество тепла можно определить не только по объему воздуха, но и по его массе. Масса воздуха определяется из характеристического уравнения (15):

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 0,4}{287 \cdot 673} = 1,035 \text{ кг}.$$

Теплоемкость воздуха находим по приложению Б:

$$C_p = 1,0283 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Следовательно,

$$Q_p = 1,035 \cdot 1,0283 \cdot (0 - 400) = - 425 \text{ кДж}.$$

Конечный объем определяется из уравнения (72):

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,4 \cdot \frac{273}{673} = 0,1622 \text{ м}^3.$$

Изменение внутренней энергии определяем по уравнению (53), данные по объемной теплоемкости взяты из приложения Б:

$$\Delta U = 0,8 \cdot 0,9579 \cdot (0 - 400) = - 306,5 \text{ кДж}.$$

Работа, затраченная на сжатие, по формуле (73)

$$L = 5 \cdot 10^5 \cdot (0,1622 - 0,4) = - 118,9 \text{ кДж}.$$

32 Определить, какая часть тепла, подводимого к газу в изобарном процессе, расходуется на работу и какая — на изменение внутренней энергии.

Решение:

Аналитическое выражение первого закона термодинамики (50) может быть представлено в виде

$$\frac{du}{dq} + \frac{dl}{dq} = 1.$$

Величина

$$\frac{dl}{dq} = 1 - \frac{du}{dq}$$

определяет ту долю от всего подводимого к газу тепла, которая превращается в работу расширения. Для идеального газа в изобарном процессе du определяется по уравнению (52), dq – по уравнению (74), тогда, принимая $k = 1,4$, получаем:

$$\frac{dl}{dq} = 1 - \frac{1}{1,4} = 0,285.$$

Следовательно, в изобарном процессе только 28,5% тепла, подводимого к газу, превращается в работу. Все остальное тепло (71,5%) расходуется на увеличение внутренней энергии.

33 К газообразным продуктам сгорания, находящимся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, подводится при постоянном давлении столько тепла, что температура смеси поднимается с 500 до 1900°C. Массовый состав газовой смеси следующий: $\text{CO}_2 = 15\%$; $\text{O}_2 = 5\%$; $\text{H}_2\text{O} = 6\%$; $\text{N}_2 = 74\%$. Определить количество тепла, подведенное к 1 кг газообразных продуктов сгорания, считая теплоемкость нелинейно зависящей от температуры.

Решение:

Количество тепла, участвующее в изобарном процессе, определяется на основании формулы (74), оно равно разности

энтальпий конечного и начального состояний или произведению теплоемкости газовой смеси на разность температур. Следовательно,

$$q = \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{p2i} g_i) t_2 - \sum_{i=1}^n (\bar{C}_{p1i} g_i) t_1.$$

На основании табл. Б.3 получаем:

$$Q_p = (1,2259 \cdot 0,15 + 1,0940 \cdot 0,05 + 2,4166 \cdot 0,06 + 1,1857 \cdot 0,74) \cdot 1900 - \\ - (1,0828 \cdot 0,15 + 0,9793 \cdot 0,05 + 1,9778 \cdot 0,06 + 1,0660 \cdot 0,74) \cdot 500 = 1836 \text{ кДж/кг.}$$

34 1 кг воздуха при температуре 30 °С и начальном давлении 1 бар сжимается изотермически до конечного давления 10 бар. Определить конечный объем, затрачиваемую работу и количество тепла, отводимого от газа.

Решение:

Определяем начальный удельный объем воздуха из уравнения состояния (15):

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 303}{1 \cdot 10^5} = 0,87 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Исходя из зависимости между параметрами в изотермическом процессе (75), определяем конечный объем:

$$v_2 = v_1 \frac{P_1}{P_2} = 0,87 \cdot \frac{1}{10} = 0,087 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг воздуха, по уравнению (76)

$$l = R T \ln \frac{P_1}{P_2} = 2,303 \cdot 287 \cdot 303 \cdot \lg \frac{1}{10} = - 200 \text{ кДж/кг.}$$

Количество тепла, отводимого от газа в изотермическом процессе, равно работе, затраченной на сжатие.

35 Как будут соотноситься между собой значения работы изотермического сжатия, вычисленные для равной массы различных газов, при прочих одинаковых условиях?

Решение:

Значения работы изотермического сжатия для 1 кг различных газов при одинаковых условиях выражаются следующими уравнениями (76):

$$l_1 = R_1 T \ln \frac{P_2}{P_1}; \quad l_2 = R_2 T \ln \frac{P_2}{P_1}; \quad l_3 = R_3 T \ln \frac{P_2}{P_1} \text{ и так далее,}$$

поэтому

$$l_1 : l_2 : l_3 = R_1 : R_2 : R_3,$$

т.е. работа изотермического сжатия пропорциональна газовой постоянной.

36 1 кг воздуха при начальной температуре 30 °С и давлении 1 бар сжимается адиабатно до конечного давления 10 бар. Определить затрачиваемую работу, конечные объем и температуру.

Решение:

Из соотношения параметров в адиабатном процессе по уравнению (78) находим:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Принимая $k = 1,4$, получаем:

$$T_2 = 303 \cdot 10^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 303 \cdot 10^{0,286} = 585 \text{ К}; \quad t_2 = 312^\circ \text{С}.$$

Затраченная работа по уравнению (80)

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{287}{1,4-1} (303 - 585) = -202 \text{ кДж/кг}.$$

Конечный объем определяется из уравнения состояния (16):

$$v_2 = \frac{R T_2}{P_2} = \frac{287 \cdot 585}{10 \cdot 10^5} = 0,168 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

37 В двигателе смесь газа и воздуха адиабатно сжимается так, что к концу сжатия ее температура оказывается на 200°C ниже температуры самовоспламенения газа. В начале сжатия $P_1 = 0,9$ бар и $t_1 = 70^\circ\text{C}$. Показатель адиабаты $k = 1,36$, $R = 314$ Дж/(кг·К), температура самовоспламенения равна 650°C. Определить величину работы сжатия и степень сжатия.

Решение:

Из уравнения (78) имеем:

$$\epsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(\frac{723}{343} \right)^{\frac{1}{0,36}} = 2,108^{2,776} = 7,29.$$

Работа сжатия по уравнению (80)

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{314}{0,36} (343 - 723) = - 331,4 \text{ кДж / кг}.$$

38 Адиабатным сжатием повысили температуру воздуха в двигателе так, что она стала равной температуре воспламенения нефти; объем при этом уменьшился в 14 раз.

Определить конечную температуру и конечное давление воздуха, если начальные параметры $P_1 = 1$ бар и $t_1 = 100^\circ\text{C}$.

Решение:

Конечная температура определяется по формуле (78), отсюда

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 373 \cdot 14^{0,4} = 1067 \text{ К}.$$

Конечное давление определяется соответственно (78):

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 1 \cdot \left(\frac{1067}{373} \right)^{\frac{1.4}{0.4}} = 40 \text{ бар}.$$

39 В баллоне емкостью 100 л находится воздух при давлении 50 бар и температуре 20 °С. Давление окружающей среды 1 бар. Определить работу, которая может быть произведена содержащимся в баллоне воздухом при расширении его до давления окружающей среды по изотерме и по адиабате. Определить также минимальную температуру, которую будет иметь воздух в баллоне, если открыть вентиль и выпускать воздух из баллона до тех пор, пока давление в нем не станет равным давлению окружающей среды, и при условии, что теплообмен воздуха с окружающей средой будет отсутствовать.

Решение:

Работа изотермического расширения определяется по уравнению (76):

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = 2.303 \cdot 50 \cdot 10^5 \cdot 0.1 \cdot \lg 50 = 1956 \text{ кДж}.$$

Конечный объем воздуха (75)

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = 0.1 \cdot 50 = 5 \text{ м}^3.$$

Для преодоления атмосферного давления должна быть затрачена работа

$$P_2 (V_2 - V_1) = 10^5 \cdot (5 - 0.1) = 490 \text{ кДж}.$$

Таким образом, полезная работа воздуха составит:

$$1956 - 490 = 1466 \text{ кДж}.$$

Работа адиабатного расширения определяется по формуле

$$L_{ад} = \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{50 \cdot 0.1 \cdot 10^5}{0.4} \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{50} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} \right] = 840 \text{ кДж.}$$

Конечный объем воздуха (78)

$$V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0.1 \cdot 50^{\frac{1}{1.4}} = 1.636 \text{ м}^3.$$

Для преодоления атмосферного давления должна быть затрачена работа

$$P_2 (V_2 - V_1) = 10^5 \cdot 1.536 = 153.6 \text{ кДж.}$$

Полезная работа воздуха составит:

$$840 - 153.6 = 686.4 \text{ кДж.}$$

Минимальная температура определяется из соотношения параметров адиабатного процесса (78):

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = 98 \text{ К; } t_2 = -177^\circ \text{C.}$$

40 Из сосуда, содержащего углекислоту при давлении 12 бар и температуре 20 °С, вытекает 2/3 содержимого. Определить конечное давление и температуру, если в процессе истечения не происходит теплообмена со средой (k принять равным 1,28).

Решение:

Если из сосуда вытекает 2/3 содержимого, то удельный объем оставшейся в сосуде углекислоты возрастает втрое. Поэтому

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = 3^{0.28} = 1.36.$$

Следовательно,

$$T_2 = \frac{T_1}{1,36} = \frac{293}{1,36} = 215,4 \text{ К}; \quad t_2 = 57,6^\circ \text{С}.$$

Конечное давление

$$P_2 = P_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = \frac{12}{4,081} = 2,94 \text{ бар}.$$

41 Воздушный буфер состоит из цилиндра, плотно закрытого подвижным поршнем. Длина цилиндра 50 см, а диаметр 20 см. Параметры воздуха, находящегося в цилиндре, соответствуют параметрам окружающей среды: $P_1 = 1$ бар и $t_1 = 20^\circ \text{С}$.

Определить энергию, которую может принять воздушный буфер при адиабатном сжатии воздуха, если движущийся без трения поршень продвинется на 40 см. Определить также конечное давление и конечную температуру воздуха.

Решение:

Начальный объем воздуха

$$V_1 = \frac{\pi d^3}{4} l = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot 0,5 = 0,0157 \text{ м}^3,$$

а конечный объем

$$V_2 = \frac{1}{5} V_1 = 0,00314 \text{ м}^3.$$

На адиабатное сжатие воздуха, находящегося в цилиндре, будет затрачена работа

$$L = \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \right] = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,0157}{0,4} (1 - 0,5^{0,4}) = -3570 \text{ Дж}.$$

Затрата работы для преодоления атмосферного давления составит:

$$P_1(V_2 - V_1) = 10^5 \left(-\frac{4}{5} \right) \cdot 0,9157 = 1256 \text{ Дж.}$$

Следовательно, аккумулированная в воздушном буфере энергия составит:

$$3570 - 1256 = 2314 \text{ Дж.}$$

Температура и давление в конце процесса определяются из соотношения параметров адиабатного процесса (78):

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = 293 \cdot 1,91 = 558 \text{ К}; \quad P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = 1,5^{1,4} = 9,52 \text{ бара.}$$

42 1 кг воздуха при давлении 5 бар и температуре 111 °С расширяется политропно до давления 1 бар. Определить конечное состояние воздуха, изменение внутренней энергии, количество подведенного тепла и полученную работу, если показатель политропы равен 1,2.

Решение:

Определяем начальный объем воздуха:

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 384}{5 \cdot 10^5} = 0,22 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Конечный объем воздуха находим из уравнения (83):

$$v_2 = v_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,22 \cdot 5^{\frac{1}{1,2}} = 0,84 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Конечную температуру проще всего найти из характеристического уравнения (16):

$$T_2 = \frac{P_2 v_2}{R} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 0,84}{287} = 293 \text{ К.}$$

Величину работы находим из уравнения (84):

$$l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{287}{0.2} \cdot (384 - 293) = 130600 \text{ Дж / кг.}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = C_v (T_2 - T_1) = \frac{287}{1.4-1} \cdot (293 - 384) = -65,8 \text{ кДж / кг.}$$

Количество тепла, сообщенного воздуху, по уравнению (85)

$$q = C_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 0.72 \cdot \frac{1.2-1.4}{1.2-1} \cdot (20 - 111) = 65.8 \text{ кДж / кг.}$$

Нетрудно видеть, что в этом процессе внешняя работа совершается за счет подведенного тепла и уменьшения внутренней энергии. Исходя из этого можно проверить полученные результаты следующим образом:

$$q = \Delta u + l; \quad l = q - \Delta u = 65,8 - (-65,8) = 131,6 \text{ кДж / кг.}$$

43 1,5 кг воздуха сжимают политропно от $P_1=0,9$ бар и $t_1=18^\circ\text{C}$ до $P_2=10$ бар; температура при этом повышается до $t_2=125^\circ\text{C}$. Определить показатель политропы, конечный объем, затраченную работу и количество отведенного тепла.

Решение:

Из соотношения между параметрами политропного процесса

(83) можно получить:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{P_2}{P_1}} = \frac{\lg \frac{398}{291}}{\lg \frac{10}{0,9}} = 0,13,$$

отсюда

$$n = \frac{1}{1-0,13} = 1,149.$$

Конечный объем определяем из характеристического уравнения (15):

$$V_2 = \frac{m R T_2}{P_2} = \frac{1,5 \cdot 287 \cdot 398}{10 \cdot 10^5} = 0,171 \text{ м}^3.$$

Затраченная работа по уравнению (84)

$$L = \frac{m R}{n-1} (t_1 - t_2) = \frac{1,5 \cdot 287}{0,149} \cdot (18 - 125) = - 309200 \text{ Дж}.$$

Количество отведенного тепла определяем по уравнению (85), считая теплоемкость воздуха не зависящей от температуры:

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1,4-1} = 717,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$Q = m C_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 1,5 \cdot 0,7175 \cdot \frac{1,149-1,4}{1,149-1} \cdot (125 - 18) = - 195,4 \text{ кДж}.$$

44 Воздух в количестве 0,01 м³ при давлении 10 бар и температуре 25 °С расширяется в цилиндре с подвижным поршнем до 1 бар. Определить конечный объем, конечную температуру, работу, произведенную газом, и подведенное тепло, если расширение в цилиндре происходит: а) изотермически, б) адиабатно и в) политропно с показателем $n = 1,3$.

Решение:

а) Изотермическое расширение

Конечный объем определяется по формуле (75):

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = 0,01 \cdot \frac{10}{1} = 0,1 \text{ м}^3.$$

Так как в изотермическом процессе $t = \text{const}$, то конечная температура $t_2 = t_1 = 25^\circ\text{C}$.

Работа газа по уравнению (76)

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = 10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 \cdot 2,303 \cdot \lg 10 = 23000 \text{ Дж.}$$

Количество подведенного тепла по 1-му закону термодинамики равно работе, т.к. изменение внутренней энергии равно нулю.

б) Адиабатное расширение

Конечный объем определяется по уравнению (77):

$$V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,01 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,05188 \text{ м}^3.$$

Конечная температура воздуха на основании уравнения (78)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 298 \cdot (0,1)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 298 \cdot \frac{1}{1,931} = 154,3 \text{ К; } t_2 = -118,7^\circ \text{С.}$$

Работа газа по уравнению (81)

$$L = \frac{1}{1,4-1} \cdot (10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 10^5 \cdot 0,05188) = 12000 \text{ кДж.}$$

в) Политропное расширение

Конечный объем определяется из уравнения (82):

$$V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,01 \cdot 10^{\frac{1}{1,3}} = 0,05885 \text{ м}^3.$$

Конечная температура по уравнению (83)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 298 \cdot \left(\frac{1}{10} \right)^{\frac{0,3}{1,3}} = 175,2 \text{ К; } t_2 = -97,8^\circ \text{С.}$$

Работа газа по уравнению (84)

$$L = \frac{1}{1,25-1} \cdot (10 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 10^5 \cdot 0,05188) = 13700 \text{ кДж.}$$

Подведенное тепло можно определить по следующему уравнению, полученному из уравнений (84) и (85):

$$Q = L \frac{k - n}{k - 1} = 13,7 \cdot \frac{0,1}{0,4} = 3,425 \text{ кДж}.$$

45 20 м³ воздуха при давлении 1 бар и температуре 18°C сжимаются по политропе до давления 8 бар, причем показатель политропы равен 1,25. Какую работу надо затратить для получения 1 м³ сжатого воздуха и какое количество тепла отводится при сжатии?

Решение:

Конечная температура определяется по уравнению (83):

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 291 \cdot \left(\frac{8}{1} \right)^{\frac{0,25}{1,25}} = 291 \cdot 1,51 = 439 \text{ К}.$$

Масса газа определится из характеристического уравнения (15) для начального состояния газа:

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{10^5 \cdot 20}{287 \cdot 291} = 23,95 \text{ кг}.$$

Объем воздуха в конце сжатия

$$V_2 = \frac{m R T_2}{P_2} = \frac{23,95 \cdot 287 \cdot 439}{8 \cdot 10^5} = 3,77 \text{ м}^3.$$

Работа газа по формуле (84)

$$L = \frac{1}{n-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{10^5}{0,25} \cdot (1 \cdot 20 - 8 \cdot 3,77) = -4064000 \text{ Дж}.$$

Работа, затрачиваемая на получение 1 м³ сжатого воздуха,

$$l = \frac{-L}{V_2} = -\frac{4064}{3,77} = -1078 \text{ кДж / м}^3.$$

Количество тепла, отводимого при сжатии воздуха, по уравнению (85) составит:

$$Q = m C_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) = 23,95 \cdot \frac{287}{1,4-1} \cdot \frac{1,25-1,4}{1,25-1} \cdot 148 = -1548 \text{ кДж}.$$

Задачи

113 Газ при давлении 10 бар и температуре 20 °C нагревается при постоянном объеме до температуры 300 °C. Определить конечное давление газа.

Ответ: $P_2 = 19,56$ бар.

114 В закрытом сосуде емкостью 0,3 м³ содержится 2,75 кг воздуха при давлении 8 бар и температуре 25 °C. Определить давление и удельный объем после охлаждения воздуха до 0 °C.

Ответ: $P_2 = 7,32$ бар; $v = 0,109$ м³/кг.

115 В закрытом сосуде заключен газ при давлении 28 бар и температуре 120 °C. Чему будет равно конечное давление, если температура упадет до 25 °C?

Ответ: $P_2 = 21,2$ бар.

116 В закрытом сосуде находится газ при разрежении 20 мм рт. ст. и температуре 10 °C. Показание барометра составляют 750 мм рт. ст. После охлаждения газа разрежение стало равным 150 мм рт. ст. Определить конечную температуру газа.

Ответ: $t_2 = -40,4$ °C.

117 До какой температуры нужно нагреть газ при $V = \text{const}$, если начальное давление газа 2 бар и температура 20 °C, а конечное давление 5 бар.

Ответ: до $t_2 = 459,5$ °C.

118 В закрытом сосуде емкостью 0,5 м³ содержится двуокись углерода при $P_1 = 6$ бар и $t_1 = 527$ °C. Как изменится давление газа, если от него отнять 100 ккал? Принять зависимость $C = f(t)$ линейной.

Ответ: $P_2 = 4,2$ бар.

119 До какой температуры нужно охладить $0,8 \text{ м}^3$ воздуха с начальным давлением 3 бар и температурой 15°C , чтобы давление при постоянном объеме понизилось до 1 бар? Какое количество тепла нужно для этого отвести? Теплоемкость воздуха принять постоянной.

Ответ: до $t_2 = -177^\circ\text{C}$; $Q = -402 \text{ кДж}$.

120 Сосуд объемом 60 л заполнен кислородом при давлении 125 бар. Определить конечное давление кислорода и количество сообщенного ему тепла, если начальная температура кислорода 10°C , а конечная - 30°C . Теплоемкость кислорода считать постоянной, не зависящей от температуры.

Ответ: $P_2 = 134 \text{ бар}$; $Q = 133 \text{ кДж}$.

121 В цилиндре диаметром 400 мм содержится 80 л воздуха при давлении 2,9 бар и температуре 15°C . Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, до какой величины должна увеличиться сила, действующая на поршень, чтобы последний оставался неподвижным, если к воздуху подводятся 20 ккал тепла.

Ответ: $N = 51,1 \text{ кН}$.

122 В калориметрической бомбе емкостью 300 см^3 находится кислород при давлении 26 бар и температуре 22°C . Определить температуру кислорода после подвода к нему тепла в количестве 1 ккал, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Ответ: $t_2 = 593^\circ\text{C}$.

123 Газовая смесь, имеющая следующий массовый состав: CO_2 - 14%; O_2 - 6%; N_2 - 75%; H_2O - 5%, нагревается при постоянном давлении от 600 до 2000°C . Определить количество тепла, подведенного к 1 кг газовой смеси. Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

Ответ: $q_p = 1841 \text{ кДж/кг}$.

124 Определить количество тепла, необходимое для нагревания 2000 м^3 воздуха при постоянном давлении 5 бар от 150 до 600°C . Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

Ответ: $Q_p = 3937 \text{ МДж}$.

125 В установке воздушного отопления внешний воздух при температуре -15°C нагревается в калорифере при $P = \text{const}$ до 60°C . Какое количество тепла надо затратить для нагрева 1000 м^3 наружного воздуха? Теплоемкость воздуха считать постоянной. Давление воздуха принять равным 760 мм рт. ст.

Ответ: $Q = 103\,033 \text{ кДж}$.

126 $0,2 \text{ м}^3$ воздуха, имеющего начальную температуру 18°C , подогреваются в цилиндре диаметром 50 см при постоянном давлении 2 бар до температуры 200°C . Определить работу расширения, перемещение поршня и количество затраченного тепла, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Ответ: $L = 25\,000 \text{ Дж}$; $h = 0,64 \text{ м}$; $Q = 88,3 \text{ кДж}$.

127 На отходящих газах двигателя мощностью $N = 2500 \text{ кВт}$ установлен подогреватель, через который проходит $60\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха при температуре 15°C и давлении 1,01 бар. Температура воздуха после подогревателя равна 75°C . Определить, какая часть тепла топлива использована в подогревателе? Коэффициент полезного действия двигателя принять равным 0,33. Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

Ответ: 17,4%.

128 К 1 м^3 воздуха, находящемуся в цилиндре со свободно движущимся нагруженным поршнем, подводится при постоянном давлении 335 кДж тепла. Объем воздуха при этом увеличивается

до $1,5 \text{ м}^3$. Начальная температура воздуха равна 15°C . Какая устанавливается в цилиндре температура и какова работа расширения? Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

Ответ: $t_2 = 159^\circ\text{C}$; $L = 95,1 \text{ кДж}$.

129 2 м^3 воздуха с начальной температурой 15°C расширяются при постоянном давлении до 3 м^3 вследствие сообщения газу 837 кДж тепла. Определить конечную температуру, давление газа в процессе и работу расширения.

Ответ: $t_2 = 159^\circ\text{C}$; $P = 2,4 \text{ бар}$; $L = 239 \text{ кДж}$.

130 Отходящие газы котельной установки проходят через воздухоподогреватель. Начальная температура газов 300°C , конечная – 160°C ; расход газов равен 1000 кг/ч . Начальная температура воздуха составляет 15°C , а расход его равен 910 кг/ч . Определить температуру нагретого воздуха, если потери воздухоподогревателя составляют 4%. Средние теплоемкости для отходящих из котла газов и воздуха принять соответственно равными $1,0467$ и $1,0048 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$.

Ответ: $168,9^\circ\text{C}$.

131 В цилиндре двигателя внутреннего сгорания находится воздух при температуре 500°C . Вследствие подвода тепла конечный объем воздуха увеличился в 2,2 раза. В процессе расширения воздуха давление в цилиндре практически оставалось постоянным. Определить конечную температуру воздуха и удельные количества тепла и работы, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Ответ: $t_2 = 1428^\circ\text{C}$; $q_p = 1088,7 \text{ кДж/кг}$; $l = 266,3 \text{ кДж/кг}$.

132 Воздух, выходящий из компрессора с температурой 190°C , охлаждается в охладителе при постоянном давлении 5 бар до

температуры 20°C . При этих параметрах производительность компрессора равна $30 \text{ м}^3/\text{ч}$. Определить часовой расход охлаждающей воды, если она нагревается на 10°C .

Ответ: $V = 733 \text{ л/ч}$.

133 При сжигании в топке парового котла каменного угля объем продуктов сгорания составляет $11,025 \text{ м}^3/\text{кг}$. Анализ продуктов сгорания показывает следующий их объемный состав: CO_2 - 10,3%; O_2 - 7,8%; N_2 - 75,3%; H_2O - 6,6%. Считая количество и состав продуктов сгорания неизменными по всему газовому тракту парового котла, а зависимость теплоемкости от температуры — нелинейной, определить количество тепла, теряемого с уходящими газами (на 1 кг топлива), если на выходе из котла температура газов равна 180°C , а температура окружающей среды 20°C . Давление продуктов сгорания принято равным атмосферному.

Ответ: $Q_{yx}=2418 \text{ кДж/кг}$.

134 Воздух в количестве 0,5 кг при $P_1 = 5 \text{ бар}$ и $t_1 = 30^{\circ}\text{C}$ расширяется изотермически до пятикратного объема. Определить работу, совершаемую газом, конечное давление и количество тепла, сообщаемого газу.

Ответ: $P_2 = 1 \text{ бар}$; $L = Q = 70 \text{ кДж}$.

135 Для осуществления изотермического сжатия 0,8 кг воздуха при $P_1 = 1 \text{ бар}$ и $t = 25^{\circ}\text{C}$ затрачена работа в 100 кДж. Как велико давление P_2 сжатого воздуха и сколько тепла необходимо при этом отвести от газа?

Ответ: $P_2 = 3,22 \text{ бар}$; $Q = - 90 \text{ кДж}$.

136 8 м^3 воздуха при $P_1 = 0,9 \text{ бар}$ и $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ сжимаются при постоянной температуре до 8,1 бар. Определить конечный объем,

затраченную работу и количество тепла, которое необходимо отвести от газа.

Ответ: $V_2 = 0,889 \text{ м}^3$; $L = Q = - 1581 \text{ кДж}$.

137 При изотермическом сжатии $0,3 \text{ м}^3$ воздуха с начальными параметрами $P_1 = 10 \text{ бар}$ и $t_1 = 300^\circ\text{C}$ отводится 500 кДж тепла. Определить конечный объем и конечное давление.

Ответ: $V_2 = 0,057 \text{ м}^3$; $P_2 = 52.6 \text{ бар}$.

138 В воздушный двигатель подается $0,0139 \text{ м}^3/\text{с}$ воздуха при давлении 5 бар и $t_1 = 40^\circ\text{C}$. Определить мощность, полученную при изотермическом расширении воздуха в машине, если $P_2 = 1 \text{ бар}$.

Ответ: $L = 11,188 \text{ кВт}$.

139 Воздух при давлении 1 бар и температуре 27°C сжимается в компрессоре до давления 35 бар . Определить величину работы, затраченной на сжатие 100 кг воздуха, если сжатие производится изотермически.

Ответ: $L = - 30 576 \text{ кДж}$.

140 При изотермическом сжатии $2,1 \text{ м}^3$ азота, взятого при давлении 1 бар , от газа отводится 335 кДж тепла. Определить конечный объем, конечное давление и затраченную работу.

Ответ: $V_2 = 0,426 \text{ м}^3$; $L = - 335 \text{ кДж}$; $P_2 = 4,93 \text{ бар}$.

141 $0,5 \text{ м}^3$ кислорода при давлении 10 бар и температуре 30°C сжимаются изотермически до объема, в 5 раз меньше начального. Определить объем и давление кислорода после сжатия, работу сжатия и количество тепла, отнятого у газа.

Ответ: $P_2 = 50 \text{ бар}$; $V_2 = 0,1 \text{ м}^3$; $L = - 805 \text{ кДж}$.

142 Газ расширяется в цилиндре изотермически до объема, в 5 раз больше первоначального. Сравнить величины работ: полного расширения и расширения на первой половине хода поршня.

Ответ: $L_2/L_1 = 0,684$.

143 Воздуху в количестве $0,1 \text{ м}^3$ при давлении 10 бар и температуре 200°C сообщается 125 кДж тепла; температура его при этом не изменяется. Определить конечное давление, конечный объем и получаемую работу.

Ответ: $P_2 = 2,86 \text{ бар}$; $V_2 = 0,35 \text{ м}^3$; $L = 125 \text{ кДж}$.

144 1 кг воздуха при температуре 15°C и начальном давлении 1 бар адиабатно сжимается до 8 бар. Определить работу, конечный объем и конечную температуру.

Ответ: $t_2 = 248^\circ\text{C}$; $v_2 = 0,187 \text{ м}^3/\text{кг}$; $l = -167,2 \text{ кДж/кг}$.

145 Воздух при давлении 4,5 бар, расширяясь адиабатно до 1,2 бар, охлаждается до $t_2 = -45^\circ\text{C}$. Определить начальную температуру и работу, совершенную 1 кг воздуха.

Ответ: $t_1 = 61^\circ\text{C}$; $l = 75,3 \text{ кДж/кг}$.

146 1 кг воздуха, занимающий объем $0,0887 \text{ м}^3/\text{кг}$ при давлении 10 бар, расширяется до 10-кратного объема. Определить конечное давление и работу, совершенную воздухом, в изотермическом и адиабатном процессах.

Ответ: 1) $T = \text{const}$; $P_2 = 1 \text{ бар}$; $l = 204 \text{ кДж/кг}$;

2) $dQ = 0$; $P_2 = 0,4 \text{ бар}$; $l = 133,5 \text{ кДж/кг}$.

147 Воздух при температуре 25°C адиабатно охлаждается до $t_2 = 55^\circ\text{C}$; давление при этом падает до 1 бар. Определить начальное давление и работу расширения 1 кг воздуха.

Ответ: $P_1 = 3 \text{ бар}$; $l = 57,4 \text{ кДж/кг}$.

148 $0,8 \text{ м}^3$ углекислого газа при температуре 20°C и давлении 7 бар адиабатно расширяются до трехкратного объема. Определить конечные параметры, величину полученной работы (показатель адиабаты принять равным 1,28).

Ответ: $P_2 = 1,71$ бар, $t_2 = - 57,6^\circ\text{C}$; $L = 535,7$ кДж.

149 До какого давления нужно адиабатно сжать смесь воздуха и паров бензина, чтобы в результате повышения температуры наступило самовоспламенение смеси? Начальные параметры: $P_1 = 1$ бар; $t_1 = 15^\circ\text{C}$. Температура воспламенения смеси $t_2 = 550^\circ\text{C}$; показатель адиабаты - 1,39.

Ответ: $P_2 = 42$ бар.

150 Работа, затраченная на адиабатное сжатие 3 кг воздуха, составляет 471 кДж. Начальное состояние воздуха характеризуется параметрами: $t_1 = 15^\circ\text{C}$; $P_1 = 1$ бар. Определить конечную температуру и изменение внутренней энергии.

Ответ: $t_2 = 234^\circ\text{C}$; $U_2 - U_1 = - 471$ кДж.

151 В цилиндре газового двигателя находится газовая смесь при давлении 1 бар и температуре 50°C . Объем камеры сжатия двигателя составляет 16% от объема, описываемого поршнем. Определить конечное давление и конечную температуру газовой смеси при адиабатном ее сжатии. Показатель адиабаты принять равным 1,38.

Ответ: $P_2 = 4$ бар; $t_2 = 412^\circ\text{C}$.

152 В двигателе с воспламенением от сжатия воздух сжимается таким образом, что его температура поднимается выше температуры воспламенения нефти. Какое минимальное давление должен иметь воздух в конце процесса сжатия, если температура воспламенения нефти равна 800°C ? Во сколько раз при этом уменьшится объем воздуха? Начальное давление воздуха 1 бар, начальная температура воздуха 80°C . Сжатие воздуха считать адиабатным.

Ответ: $P_2 = 49$ бар; $V_1 / V_2 = 16$.

153 Объем воздуха при адиабатном сжатии в цилиндре двигателя внутреннего сгорания уменьшается в 13 раз. Начальная

температура воздуха перед сжатием 77°C , а начальное давление 0,9 бар. Определить температуру и давление воздуха после сжатия.

Ответ: $t_2 = 703^{\circ}\text{C}$; $P_2 = 32,7\text{ бар}$.

154 2 кг воздуха при давлении 1 бар и температуре 15°C адиабатно сжимаются в цилиндре компрессора до давления 7 бар. Определить конечную температуру сжатого воздуха и работу, затраченную на сжатие.

Ответ: $t_2 = 229^{\circ}\text{C}$; $L = - 307,1\text{ кДж}$.

155 1 м^3 воздуха при давлении 0,95 бар и начальной температуре 10°C сжимается по адиабате до 3,8 бар. Определить температуру и объем воздуха в конце сжатия и работу, затраченную на сжатие.

Ответ: $t = 148^{\circ}\text{C}$; $V_2 = 0,373\text{ м}^3$; $L = - 117,5\text{ кДж}$.

156 Воздух при температуре 127°C изотермически сжимается так, что объем его становится равным $1/4$ начального, а затем расширяется по адиабате до начального давления. Определить температуру воздуха в конце адиабатного расширения.

Ответ: $t_2 = - 4^{\circ}\text{C}$.

157 1 кг воздуха при температуре 17°C сжимается адиабатно до объема, составляющего $1/5$ начального, а затем расширяется изотермически до первоначального объема. Определить работу, произведенную воздухом в результате обоих процессов.

Ответ: $l = 67\text{ кДж/кг}$.

158 Воздух при температуре 20°C должен быть охлажден посредством адиабатного расширения до температуры -60°C . Конечное давление воздуха при этом должно составлять 1 бар. Определить начальное давление воздуха и удельную работу расширения.

Ответ: $P_1 = 3,04$ бар; $l = 57,8$ кДж/кг.

159 Воздух в количестве 3 м^3 расширяется политропно от давления $5,4$ бара и температуры 45°C до давления $1,5$ бара. Объем, занимаемый при этом воздухом, становится равным 10 м^3 . Определить показатель политропы, конечную температуру, полученную работу и количество подведенного тепла.

Ответ: $m = 1,064$; $t_2 = 21,4^\circ\text{C}$; $L = 1875$ кДж; $Q = 1575$ кДж.

160 В цилиндре двигателя с изобарным подводом тепла происходит сжатие воздуха по политропе с показателем $n = 1,33$. Определить температуру и давление воздуха в конце сжатия, если степень сжатия $\epsilon = \frac{V_1}{V_2} = 14$, $t = 77^\circ\text{C}$ и $P_1 = 1$ бар.

Ответ: $t_2 = 564^\circ\text{C}$; $P_2 = 33,9$ бар.

161 В процессе политропного сжатия затрачивается работа, равная 195 кДж, причем в одном случае от газа отводится 250 кДж, а в другом - газу сообщается 42 кДж. Определить показатели обеих политроп.

Ответ: 1) $n = 0,9$; 2) $n = 1,49$.

162 $1,5 \text{ м}^3$ воздуха сжимаются от 1 бар и 17°C до 7 бар; конечная температура при этом равна 100°C . Определить количество тепла, которое необходимо отвести, затраченную работу и показатель политропы?

Ответ: $n = 1,147$; $L = -290$ кДж; $Q = 183$ кДж.

163 Горючая смесь в цилиндре двигателя, имеющая температуру 100°C и давление $0,9$ бар, подвергается сжатию по политропе с показателем $n = 1,33$. Определить конечное давление и степень сжатия в момент, когда температура достигнет 400°C .

Ответ: $\epsilon = 5,9$; $P_2 = 9,5$ бар.

164 В процессе политропного расширения воздуху сообщается 83,7 кДж тепла. Определить изменение внутренней энергии воздуха и произведенную работу, если объем воздуха увеличился в 10 раз, а давление его уменьшилось в 8 раз.

Ответ: $\Delta U = 16,7$ кДж; $L = 6702$ Дж.

165 Воздух расширяется по политропе, совершая при этом работу, равную 270 кДж, причем в одном случае воздуху сообщается 420 кДж тепла, а в другом - от воздуха отводится 92 кДж тепла. Определить в обоих случаях показатели политропы.

Ответ: 1) $n = 0,78$; 2) $n = 1,88$.

166 Смесь коксового газа с воздухом сжимается по политропе с показателем $n = 1,38$; начальное давление $P_1 = 1$ бар, начальная температура $t_1 = 50^\circ\text{C}$. Определить конечную температуру и давление, если степень сжатия $\varepsilon = 4$.

Ответ: $t_2 = 276^\circ\text{C}$; $P_2 = 6,8$ бар.

167 В газовом двигателе политропно сжимается горючая смесь до температуры 450°C . Начальное давление смеси 0,9 бара, начальная температура 80°C . Показатель политропы $n = 1,35$. Определить работу сжатия и степень сжатия. Газовую постоянную смеси принять равной 340 Дж/(кг·К).

Ответ: $l = - 360$ кДж/кг; $\varepsilon = 7,82$.

168 2 м³ воздуха при давлении 2 бар и температуре 40°C сжимаются до давления 11 бар и объема 0,5 м³. Определить показатель политропы, работу сжатия и количество отведенного тепла.

Ответ: $n = 1,23$; $L = - 652$ кДж; $Q = - 272$ кДж.

169 Находящийся в цилиндре двигателя внутреннего сгорания воздух при давлении 0,9 бар и $t_1 = 100^\circ\text{C}$ должен быть так сжат, чтобы конечная температура его поднялась до 650°C . Определить, какое должно быть отношение объема камеры сжатия двигателя к объему,

описываемому поршнем, если сжатие происходит по политропе с показателем $n = 1,3$.

Ответ: $V_2 = 0,05121 V_h$.

170 1 кг воздуха при давлении 4 бар и температуре 100°C расширяется до давления 1 бар. Определить конечную температуру, количество тепла и совершенную работу, если расширение происходит: а) изохорно, б) изотермически, в) адиабатно и г) политропно с показателем $n = 1,2$.

Ответ: а) $t_2 = -180^\circ\text{C}$; $l = 0$; $q = -202 \text{ кДж/кг}$;

б) $t_1 = t_2$, $l = 148,2 \text{ кДж/кг}$; $q = 148,2 \text{ кДж/кг}$;

в) $t_2 = -22^\circ\text{C}$; $l = 87,5 \text{ кДж/кг}$; $q = 0$;

г) $t_2 = 24^\circ\text{C}$; $l = 10,9 \text{ кДж/кг}$, $q = 54,5 \text{ кДж/кг}$.

171 5 м^3 воздуха при давлении 4 бар и 60°C расширяются по политропе до трехкратного объема и давления 1 бар. Определить показатель политропы, работу, количество сообщенного извне тепла и изменение внутренней энергии.

Ответ: $n = 1,26$; $L = 1923 \text{ кДж}$;

$Q = 672,4 \text{ кДж}$; $U_2 - U_1 = -1250,6 \text{ кДж}$.