

1.5 Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики устанавливает эквивалентность при взаимных превращениях механической и тепловой энергии. Аналитическое выражение закона в дифференциальной форме для любого тела имеет следующий вид:

$$dQ = dU + dL \quad (49)$$

или, если масса равна 1 кг, -

$$dq = du + dl, \quad (50)$$

где Q и q – полное и удельное количество теплоты, подводимое к рабочему телу;

U и u – полная и удельная внутренняя энергия рабочего тела;

L и l – полная и удельная работа.

Единицей измерения количества теплоты и работы является джоуль. **Джоуль** (Дж) – единица измерения механической энергии, представляет собой работу, совершаемую силой, равной 1 Н, на пути в 1 м, пройденном телом под действием этой силы по направлению, совпадающему с направлением силы. Единицей измерения мощности является ватт (Вт): 1 Вт = 1 Дж / с. Количественная связь между единицами энергии приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Соотношения между единицами энергии

Единицы измерения	Килоджоули (кДж)	Килокалории (ккал)	Киловатт – часы (кВт·ч)	Лошадиная сила – часы (л.с. · ч)
1 кДж	1	0,239	0,000278	0,000378
1 ккал	4,1868	1	0,001163	0,001581
1 кВт·ч	3600	859,8	1	1,36
1 л. с · ч	2650	632,4	0,7355	1

В термодинамике изменение **внутренней энергии** определяют по формуле

$$\Delta U = U_2 - U_1, \quad (51)$$

где U_1 – внутренняя энергия в начальном состоянии, Дж;

U_2 – внутренняя энергия в конечном состоянии, Дж.

Для бесконечно малого изменения состояния:

$$du = C_v dT. \quad (52)$$

Изменение полной внутренней энергии для конечного интервала изменения температуры можно определить по формулам:

$$\Delta u = \bar{C}_v (T_2 - T_1); \quad \Delta U = m \bar{C}_v (T_2 - T_1). \quad (53)$$

В формулах (52-53):

\bar{C}_v – средняя теплоемкость рабочего тела (в интервале температур $T_1 - T_2$) при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

m – масса рабочего тела, кг.

Работа, совершаемая системой при изменении объема, определяется по формулам:

$$dl = P dv; \quad l = \int_{v_1}^{v_2} P dv. \quad (54)$$

Энтальпия представляет собой полную энергию термодинамической системы, равную сумме внутренней энергии системы и потенциальной энергии, которая обусловлена тем, что газ находится под давлением. Единицы измерения полной энтальпии (H) – джоуль, удельной энтальпии (h) – джоуль на килограмм.

Элементарное изменение энтальпии

$$dh = du + d(pv) = C_p dT \quad (55)$$

или для конечного процесса при произвольной массе газа

$$\Delta H = m \bar{C}_p (T_2 - T_1). \quad (56)$$

Энтальпия – это теплота, подводимая к телу в процессе нагрева его при постоянном давлении. Первый закон термодинамики может быть записан следующим образом:

$$dq = dh - v dp. \quad (57)$$

Математическое выражение **1-го закона термодинамики для потока газа** -

$$q_n = h_2 - h_1 + l_\tau + (\omega_2^2 - \omega_1^2) / 2. \quad (58)$$

В дифференциальном виде уравнение (58) имеет вид

$$dq_n = dh + dl_\tau + \omega d\omega. \quad (59)$$

В уравнениях (58) – (59):

g_n – теплота, подводимая к потоку газа извне, Дж;

ω - скорость газового потока, м/с.

При смешении химически невзаимодействующих газов, имеющих различные давления и температуры, необходимо уметь определять конечное состояние смеси. Если газы до смешения занимают объемы V_1, V_2, \dots, V_n при давлениях P_1, P_2, \dots, P_n и температурах T_1, T_2, \dots, T_n , а показатели адиабаты равны k_1, k_2, \dots, k_n , то параметры смеси определяются по формулам (смешение газов при $V = \text{const}$):

температура смеси

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{k_i - 1}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{(k_i - 1) T_i}}; \quad (60)$$

давление смеси

$$P = \frac{T}{V} \sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{T_i}; \quad (61)$$

объем смеси

$$V = \sum_{i=1}^n V_i. \quad (62)$$

Для газов, у которых равны показатели адиабаты, формулы (60), (61) имеют вид

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n P_i V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{T_i}}; \quad P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i V_i}{V}. \quad (63)$$

Если массовые расходы смешивающихся потоков равны G_1, G_2, \dots, G_n (килограмм в час), объемные расходы V_1, V_2, \dots, V_n (кубических метров в час), давления газов - P_1, P_2, \dots, P_n , температуры - T_1, T_2, \dots, T_n , а показатели адиабаты равны k_1, k_2, \dots, k_n , то температура смеси определяется по формуле

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{k_i - 1} P_i V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{k_i - 1} \frac{P_i V_i}{T_i}}. \quad (64)$$

Объемный расход смеси в единицу времени при температуре T и давлении P

$$V = \frac{T}{P} \sum_{i=1}^n \frac{P_i V_i}{T_i}. \quad (65)$$

Для газов, у которых значения k равны, температура смеси определяется формулой (63). Если газовые потоки, помимо одинаковых значений k , имеют также равные давления, то формулы (64) и (65) принимают вид

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{T_i}}, \quad V = T \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{T_i}. \quad (66)$$

Все уравнения, относящиеся к смешению газов, выведены при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой.

Коэффициент полезного действия (КПД) тепловых установок характеризует степень совершенства превращения тепла в работу. КПД может быть вычислен, если известны расход топлива на 1 кВт·ч и теплота сгорания топлива (количество тепла, которое выделяется при

полном сгорании массовой или объемной единицы топлива. Если расход топлива на 1 кВт·ч (обозначение - b) выражен в килограммах на киловатт-час, а теплота сгорания топлива Q_H^P - в килоджоулях на килограмм, КПД тепловой установки определяется из выражения

$$\eta = \frac{3600}{Q_H^P b} \cdot \quad (67)$$

Если же теплота сгорания выражена в килокалориях на килограмм, то формула (67) принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{860}{Q_H^P b} \cdot \quad (68)$$

Примеры решения задач

24 В котельной электрической станции за 20 ч работы сожжены 62 т каменного угля, имеющего теплоту сгорания 28900 кДж/кг. Определить среднюю мощность станции, если в электрическую энергию превращено 18% тепла, полученного при сгорании угля.

Решение:

Количество тепла, превращенного в электрическую энергию за 20 ч работы,

$$Q = 62 \cdot 1000 \cdot 28900 \cdot 0,18 = 3,2 \cdot 10^9 \text{ кДж.}$$

Эквивалентная ему электрическая энергия или работа

$$L = \frac{3,2 \cdot 10^9}{3600} = 89590 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Следовательно, средняя электрическая мощность станции

$$N = 89590 / 20 = 4479 \text{ кВт.}$$

25 Паросиловая установка мощностью 4200 кВт имеет КПД , равный 0,2. Определить часовой расход топлива, если его теплота сгорания равна 25000 кДж/кг.

Решение:

По формуле (67) находим выражение для расхода топлива:

$$b = \frac{3600}{\eta Q_H^p} = \frac{3600}{0,2 \cdot 25000} = 0,72 \text{ кг / (кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Часовой расход топлива составит:

$$0,72 \cdot 4200 = 3024 \text{ кг/ч.}$$

26 Найти изменение внутренней энергии 1 кг воздуха при изменении его температуры от 300 до 50 °С. Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной.

Решение:

Изменение внутренней энергии можно определить на основании формулы (53). Рассчитаем среднюю теплоемкость воздуха в данном интервале температур (табл. В.1):

$$\bar{C}_v = 0,7084 + 0,00009349 \frac{300 + 50}{2} = 0,7248 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)} .$$

Следовательно,

$$\Delta U = 1 \cdot 0,7248 \cdot (50 - 300) = -181,2 \text{ кДж.}$$

Задачи

89 Определить часовой расход топлива, который необходим для работы паровой турбины мощностью 25 МВт, если теплота сгорания топлива 33,85 МДж/кг и известно, что на превращение

тепловой энергии в механическую используется только 35% тепла сожженного топлива.

Ответ: $G = 7,59 \text{ т/ч}$.

90 Мощность турбогенератора 12000 кВт, КПД генератора 0,97. Какое количество воздуха нужно пропустить через генератор для его охлаждения, если конечная температура воздуха не должна превышать 55°C? Температура в машинном отделении равна 20°C; среднюю теплоемкость воздуха принять равной 1,0 кДж/(кг·K).

Ответ: $G = 10,3 \text{ кг/с}$.

91 Использование атомной энергии для производства тепловой или электрической энергии в техническом отношении означает применение новых видов топлив - ядерных горючих. Количество энергии, выделяемой при расщеплении 1 кг ядерных горючих, может быть условно названо их «теплотой сгорания». Для урана эта величина равна $22,9 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$. Во сколько раз уран как горючее эффективнее каменного угля с теплотой сгорания 27500 кДж/кг?

Ответ: В 3 млн. раз.

92 Важнейшим элементом атомной электростанции является реактор, или «атомный котел». Тепловой мощностью реактора называют полное количество тепла, которое выделяется в нем в течение часа. Обычно эту мощность выражают в киловаттах.

Определить годовой расход ядерного горючего для реактора с тепловой мощностью 500000 кВт, если теплота сгорания применяемого урана равна $22,9 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$, а время работы реактора составляет 7000 ч.

Ответ: $G = 153 \text{ кг/год}$.

93 Теплоемкость газа при постоянном давлении опытным путем может быть определена в проточном калориметре. Для этого

пропускают через трубопровод исследуемый газ и нагревают его электронагревателем. При этом измеряют количество газа, пропускаемого через трубопровод, температуры газа перед и за электронагревателем и расход электроэнергии. Давление воздуха в трубопроводе принимают неизменным. Определить теплоемкость воздуха при постоянном давлении методом проточного калориметрирования, если расход воздуха через трубопровод 690 кг/ч, мощность электронагревателя 0,5 кВт, температура воздуха перед электронагревателем 18°C, а температура воздуха за электронагревателем 20,6°C.

Ответ: $\overline{C}_p = 1,0 \text{ кДж/(кг·К)}$.

94 Метод проточного калориметрирования, описанный в предыдущей задаче, может быть также использован для определения количества газа или воздуха, протекающего через трубопровод. Определить часовой расход воздуха G кг/ч, если мощность электронагревателя 0,8 кВт, а приращение температуры воздуха составило 1,8°C. Определить также скорость воздуха ω в трубопроводе за электронагревателем, если давление воздуха 900 мм. рт. ст., температура его за электронагревателем 20,2°C, а диаметр трубопровода 125 мм.

Ответ: $G = 1600 \text{ кг/ч}$, $\omega = 25,4 \text{ м/с}$.

95 При испытании двигателей внутреннего сгорания широким распространением пользуются так называемые гидротормоза. Работа двигателя при этом торможении превращается в теплоту трения и для уменьшения нагрева тормозного устройства применяется водяное охлаждение. Определить часовой расход воды на охлаждение тормоза, если мощность двигателя 45 л.с., начальная температура

воды 15°C ; принять, что вся теплота трения передается охлаждающей воде.

Ответ: $G = 632 \text{ кг/ч}$.

96 При испытании нефтяного двигателя было найдено, что удельный расход топлива равен $170 \text{ г/(л.с.}\cdot\text{ч)}$. Определить эффективный КПД этого двигателя, если теплота сгорания топлива равна 41000 кДж/кг .

Ответ: $\eta = 0,38$.

97 В котельной электростанции за 10 часов работы сожжено 100 т каменного угля с теплотой сгорания 29300 кДж/кг . Определить количество выработанной электроэнергии и среднюю мощность станции, если КПД процесса преобразования тепловой энергии в электрическую составляет 20% .

Ответ: $Q = 162780 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$; $N_{\text{ср}} = 16278 \text{ кВт}$.

98 В сосуд, содержащий 5 л воды при температуре 20°C , помещен электронагреватель мощностью 800 Вт . Определить, сколько времени потребуется, чтобы вода нагревалась до температуры 100°C . Потерями тепла сосуда в окружающую среду пренебречь.

Ответ: 30 мин .

99 В калориметр, содержащий $0,6 \text{ л}$ воды при температуре 20°C , опускают стальной образец массой $0,4 \text{ кг}$, нагретый до 200°C . Определить теплоемкость стали, если повышение температуры воды составило $12,5^{\circ}\text{C}$. Массой калориметра пренебречь.

Ответ: $C = 0,469 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$.

100 Свинцовый шар падает с высоты 100 м на твердую поверхность. В результате падения кинетическая энергия шара полностью превращается в тепло. Одна треть образовавшегося тепла

передается окружающей среде, а две трети расходуются на нагревание шара. Теплоемкость свинца $0,030 \text{ ккал}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Определить повышение температуры шара.

Ответ: $\Delta t = 52^\circ$.

101 Автомобиль массой $1,5 \text{ т}$ останавливается под действием тормозов при скорости 40 км/ч . Определить конечную температуру тормозов t_2 , если их масса равна 15 кг , начальная температура 10°C , а теплоемкость стали, из которой изготовлены тормозные части, равна $0,46 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Потерями тепла в окружающую среду пренебречь.

Ответ: $t_2 = 23,4^\circ\text{C}$.

102 Предполагая, что все потери гидротурбины превращаются в тепло и тратятся на нагрев воды, определить КПД турбины по следующим данным: высота падения воды равна 400 м , нагрев воды составляет $0,2^\circ\text{C}$.

Ответ: $\eta = 78,6\%$.

103 В машине вследствие плохой смазки происходит нагревание 200 кг стали на 40°C в течение 20 мин . Определить вызванную этим потерю мощности машины. Теплоемкость стали принять равной $0,46 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Ответ: $3,07 \text{ кВт}$.

104 Найти изменение внутренней энергии 2 м^3 воздуха, если температура его понижается от 250 до 70°C . Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной. Начальное давление воздуха 6 бар . Ответ дать в килокалориях.

Ответ: $\Delta U = 253,8 \text{ ккал}$.

105 К газу, заключенному в цилиндре с подвижным поршнем, подводится извне 100 кДж тепла. Величина произведенной работы

при этом составляет 115 кДж. Определить изменение внутренней энергии газа, если количество его равно 0,8 кг.

Ответ: $\Delta U = - 18,2$ кДж.

106 2 м³ воздуха при давлении 5 бар и температуре 50°C смешиваются с 10 м³ воздуха при давлении 2 бар и температуре 100°C. Определить давление и температуру смеси.

Ответ: $t_{см} = 82^\circ\text{C}$; $P_{см} = 2,5$ бар.

107 В двух разобщенных между собой сосудах содержатся: 50 л азота при давлении 20 бар и температуре 200°C и 200 л углекислого газа при давлении 5 бар и температуре 600°C. Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов. Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

Ответ: $T = 684$ К; $P = 8,9$ бар.

108 Три разобщенных между собой сосуда А, В, С заполнены различными газами. В сосуде А, имеющем объем 10 л, находится оксид серы SO₂ при давлении 60 бар и температуре 100°C, в сосуде В с объемом 5 л — азот при давлении 4 бар и температуре 200°C и в сосуде С с объемом 5 л — азот при давлении 20 бар и температуре 300°C. Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов между собой. Считать, что теплообмен со средой отсутствует.

Ответ: $P = 21,8$ бар, $t = 118^\circ\text{C}$.

109 В одном сосуде находится 100 л водорода при давлении 15 бар и температуре 1200°C, а в другом - 50 л азота при давлении 30 бар и температуре 200°C. Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой.

Ответ: $t = 467^{\circ}\text{C}$; $P = 20,8$ бар.

110 Уходящие из трех паровых котлов газы при давлении 1 бар смешиваются в сборном газоходе и через дымовую трубу удаляются в атмосферу. Объемный состав уходящих газов из отдельных котлов следующий: из первого котла - $\text{CO}_2 = 10,4\%$; $\text{O}_2 = 7,2\%$; $\text{N}_2 = 77,0\%$; $\text{H}_2\text{O} = 5,4\%$; из второго котла - $\text{CO}_2 = 11,8\%$; $\text{O}_2 = 6,9\%$; $\text{N}_2 = 75,6\%$; $\text{H}_2\text{O} = 5,8\%$; из третьего котла - $\text{CO}_2 = 12,0\%$; $\text{O}_2 = 4,1\%$; $\text{N}_2 = 77,8\%$; $\text{H}_2\text{O} = 6,1\%$. Часовые расходы газов составляют $G_1 = 12\,000$ кг/ч; $G_2 = 6500$ кг/ч; $G_3 = 8400$ кг/ч, а температуры газов – соответственно: $t_1 = 130^{\circ}\text{C}$; $t_2 = 180^{\circ}\text{C}$; $t_3 = 200^{\circ}\text{C}$.

Определить температуру уходящих газов после смешения в сборном газоходе. Принять, что показатели адиабаты этих газов одинаковы.

Ответ: $t_2 = 164^{\circ}\text{C}$.

111 В газоходе смешиваются три газовых потока, имеющих одинаковое давление, равное 2 бар. Первый поток представляет собой азот с объемным расходом $V_1 = 8200$ м³/ч при температуре 200°C , второй поток — двуокись углерода с расходом 7600 м³/ч при температуре 500°C и третий поток — воздух с расходом 6400 м³/ч при температуре 800°C .

Определить температуру газов после смешения и их объемный расход в общем газопроводе.

Ответ: $t_1 = 423^{\circ}\text{C}$; $V = 23000$ м³/ч.

112 Продукты сгорания из газохода парового котла в количестве 400 кг/ч при температуре 900°C должны быть охлаждены до 500°C и направлены в сушильную установку. Газы охлаждаются смешением газового потока с потоком воздуха при температуре 20°C . Давление в обоих газовых потоках одинаковое. Определить часовой

расход воздуха, если принять, что $R_{\text{газа}} = R_{\text{воздуха}}$, теплоемкость продуктов сгорания равна теплоемкости воздуха.

Ответ: $G_{\text{возд}} = 36,6 \text{ кг/ч}$.