

1.7 Второй закон термодинамики

Второй закон термодинамики определяет направление, в котором протекают процессы, устанавливает условия преобразования тепловой энергии в механическую, а также определяет максимальное значение работы, которая может быть произведена тепловым двигателем. Математически может быть выражен следующим образом:

$$dS \geq \frac{dQ}{T}, \quad (86)$$

где dS — бесконечно малое приращение энтропии системы;

dQ — бесконечно малое количество тепла, полученного системой от источника тепла;

T — абсолютная температура источника тепла.

Знак неравенства соответствует необратимым процессам, а знак равенства — обратимым процессам. Следовательно, аналитическое выражение второго закона термодинамики для бесконечно малого обратимого процесса имеет вид

$$dQ = T dS, \quad (87)$$

а так как согласно первому закону термодинамики

$$dQ = dU + P dV,$$

то уравнение (87) принимает следующий вид:

$$T dS = dU + P dV .$$

Изменение энтропии между двумя произвольными состояниями газа 1 и 2 определяют по следующим формулам:

при **переменной теплоемкости**, считая зависимость ее от температуры линейной, -

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} + b (T_2 - T_1), \quad (88)$$

$$s_2 - s_1 = a_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} + b (T_2 - T_1), \quad (89)$$

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{P_2}{P_1} + a_p \ln \frac{v_2}{v_1} + b (T_2 - T_1); \quad (90)$$

при постоянной теплоемкости -

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}, \quad (91)$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}, \quad (92)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{P_2}{P_1} + c_p \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (93)$$

Уравнения кривых различных термодинамических процессов в системе координат TS имеют следующий вид (при постоянной теплоемкости):

уравнение изохоры -

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}; \quad (94)$$

уравнение изобары -

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}; \quad (95)$$

уравнение изотермы -

$$T = \text{const}, \quad (96)$$

при этом изменение энтропии в изотермическом процессе

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2}; \quad (97)$$

уравнение адиабаты -

$$s = \text{const} ; \quad (98)$$

уравнение политропы -

$$s_2 - s_1 = c_n \ln \frac{T_2}{T_1} . \quad (99)$$

Широким распространением при решении термодинамических задач пользуется диаграмма TS. Адиабаты в этой диаграмме изображаются вертикалями, изотермы — горизонталями, изохоры и изобары идеального газа — логарифмическими кривыми. Взаимное расположение изохоры и изобары показано на рис. 1.

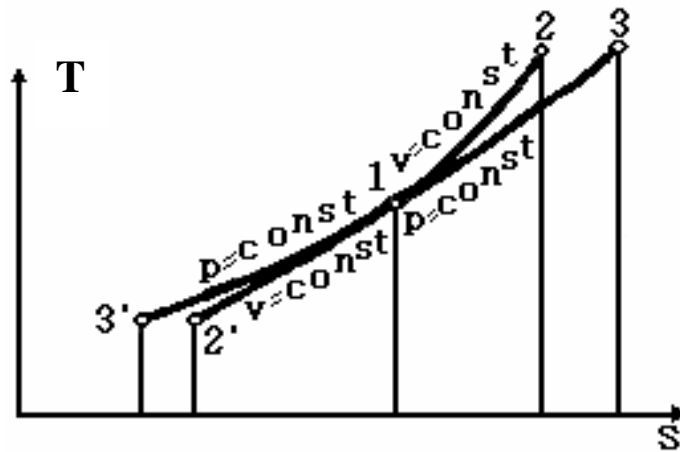


Рисунок 1 – Изображение изобарного и изохорного процессов на TS-диаграмме

Если работа совершается с помощью газа, параметры которого отличаются от параметров окружающей среды, то **максимальная работа**, которую может произвести этот газ, достижима лишь при условии его перехода от начального состояния к состоянию среды обратимым путем. При этом **максимальная полезная работа** меньше максимальной работы на величину работы вытеснения воздуха окружающей среды.

Величина максимальной полезной работы определяется формулой

$$l_{\text{max полезн}} = u_1 - u_2 - T_0(s_1 - s_2) - P_0(v_2 - v_1). \quad (100)$$

В этой формуле параметры, имеющие индекс 1 и 2, относятся соответственно к начальному и конечному состоянию источника работы, а параметры с индексом 0 относятся к рабочей среде.

Так как выражения

$$u_1 - u_2 \text{ и } T_0(s_1 - s_2)$$

представляют собой соответственно абсолютную величину работы адиабатного и изотермического процесса, то формулу (97) можно представить в следующем виде:

$$l_{\text{max полезн}} = l_{\text{ад}} - l_{\text{из}} - P_0(v_2 - v_1). \quad (101)$$

Примеры решения задач

46 1 кг кислорода при температуре 127°C расширяется до пятикратного объема; температура его при этом падает до 27°C. Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

Решение:

По уравнению (91)

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = \frac{259,6}{1,4-1} \ln \frac{300}{400} + 259,6 \ln 5 = 0,23 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

47 1 кг воздуха сжимается по адиабате так, что объем его уменьшается в 6 раз, а затем при $V = \text{const}$ давление повышается в 1,5 раза. Определить общее изменение энтропии воздуха. Теплоемкость считать постоянной.

Решение:

Изменение энтропии в адиабатном процессе будет равно нулю.

Изменение энтропии в изохорном процессе определится по формуле (94):

$$\Delta s_v = c_v \ln \frac{P_3}{P_2} = c_v \ln 1,5 = 2,303 \frac{287}{1,4-1} \lg 1,5 = 0,293 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

следовательно,

$$\Delta s = \Delta s_v = 0,293 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

48 10 м^3 воздуха, находящегося в начальном состоянии при нормальных условиях, сжимают до конечной температуры 400°C . Сжатие производится: 1) изохорно, 2) изобарно, 3) адиабатно и 4) политропно с показателем политропы $n = 2,2$. Считая значение энтропии при нормальных условиях равным нулю и принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить энтропию воздуха в конце каждого процесса.

Решение:

Находим массу 10 м^3 воздуха при нормальных условиях:

$$m = \frac{P V}{R T} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 10}{287 \cdot 273} = 12,9 \text{ кг}.$$

Определяем изменение энтропии в каждом из перечисленных процессов:

1) изохорное сжатие -

$$\Delta s_1 = s_1 = m c_v \ln \frac{T}{273} = 12,9 \cdot 0,723 \cdot 2,303 \lg \frac{673}{273} = 8,42 \text{ кДж}/\text{К};$$

2) изобарное сжатие -

$$\Delta s_2 = s_2 = m c_p \ln \frac{T}{273} = 12,9 \cdot 1,0117 \cdot 2,303 \lg \frac{673}{273} = 11,78 \text{ кДж}/\text{К};$$

3) адиабатное сжатие -

$$\Delta s = s_3 = 0 ;$$

4) политропное сжатие -

$$\Delta s_4 = s_4 = m c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T}{273} = 12,9 \cdot 0,723 \frac{2,2-1,4}{2,2-1} 2,303 \lg \frac{673}{273} = 5,56 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} .$$

49 В процессе политропного расширения воздуха температура его уменьшилась от 25 до - 37 °С. Начальное давление воздуха 4 бар, количество его 2 кг. Определить изменение энтропии в этом процессе, если известно, что количество подведенного к воздуху тепла составляет 89,2 кДж.

Решение:

Количество тепла, сообщаемого газу в политропном процессе, на основании уравнения (85) составляет

$$Q = m c_v \frac{n-k}{n-1} (t_2 - t_1) .$$

Подставляя значения известных величин, получаем:

$$\frac{n-k}{n-1} = - \frac{89,2}{2 \cdot 0,723 \cdot 62} = - 0,995 .$$

Отсюда показатель политропы $n = 1,2$.

Из соотношения параметров политропного процесса определяем конечное давление:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} ; \quad P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 4 \left(\frac{236}{298} \right)^6 = 1 \text{ бар} .$$

Изменение энтропии по уравнению (92)

$$\Delta S = 2 \cdot 2,3 \left[\frac{287 \cdot 1,4}{1,4-1} \lg \frac{236}{298} - 287 \lg \frac{1}{4} \right] = 0,338 \text{ кДж/К} .$$

50 В сосуде объемом 300 л заключен воздух при давлении 50 бар и температуре 20°C. Параметры среды: $P_0 = 1$ бар, $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести сжатый воздух, находящийся в сосуде.

Решение:

Так как температура воздуха в начальном состоянии равна температуре среды, то максимальная работа, которую может выполнить воздух, может быть получена лишь при условии изотермического расширения воздуха от начального давления $P_1 = 50$ бар до давления среды $P_2 = 1$ бар. Максимальная полезная работа определяется на основании формулы (100):

$$L_{\text{max полезн}} = T_0 (s_2 - s_1) - P_0 (V_2 - V_1)$$

или

$$L_{\text{max полезн}} = m T_0 (s_2 - s_1) - P_0 (V_2 - V_1).$$

Определяем массу воздуха, находящегося в сосуде, и объем воздуха после изотермического расширения:

$$m = \frac{P_1 V_1}{R T_1} = \frac{50 \cdot 10^5 \cdot 0,3}{287 \cdot 293} = 17,83 \text{ кг};$$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{50 \cdot 0,3}{1} = 15 \text{ м}^3.$$

Так как изменение энтропии в изотермическом процессе определяется по формуле (97)

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{P_1}{P_2},$$

то

$$\begin{aligned} L_{\text{max полезн}} &= m T_0 R \ln \frac{P_1}{P_2} - P_0 (V_2 - V_1) = \\ &= 17,83 \cdot 293 \cdot 287 \cdot 2,3 \cdot 1,699 - 10^5 (15 - 0,3) = 4377 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

51 Определить максимальную полезную работу, которая может быть произведена 1 кг кислорода, если его начальное состояние характеризуется параметрами $t_1 = 400^\circ\text{C}$ и $P_1 = 1$ бар, а состояние среды - параметрами $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $P_0 = 1$ бар.

Решение:

Максимальная работа, которую произведет при данных условиях кислород, может быть получена лишь при условии перехода его от начального состояния к состоянию среды обратимым путем. Так как температура кислорода в начальном состоянии выше температуры среды, то прежде всего необходимо обратимым процессом снизить температуру кислорода до температуры среды. Таким процессом может явиться только адиабатное расширение кислорода. При этом конечный объем и конечное давление определяются из следующих соотношений:

$$\frac{v_a}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_a} \right)^{\frac{1}{k-1}}; \quad v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{260 \cdot 673}{1 \cdot 10^5} = 1,75 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$v_a = v_1 \left(\frac{T_1}{T_a} \right)^{\frac{1}{k-1}} = 1,75 \left(\frac{673}{293} \right)^{2,5} = 14,05 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$p_a = \frac{R T_2}{v_2} = \frac{259,6 \cdot 293}{14,05} = 0,0542 \text{ бар}.$$

После адиабатного расширения необходимо обратимым путем при $t = \text{const}$ сжать кислород от давления 0,0542 бар до давления окружающей среды, т. е. осуществить изотермическое сжатие кислорода до 1 бар. При этом конечный объем кислорода

$$v_2 = \frac{R T_2}{P_2} = \frac{260 \cdot 293}{1 \cdot 10^5} = 0,762 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Максимальная полезная работа определяется по формуле (101):

$$L_{\text{max полезн}} = I_{\text{АД}} - I_{\text{ИЗ}} - P_0(v_2 - v_1) = 124,8 \text{ кДж/кг.}$$

Задача может быть решена также и графическим способом – через площади на PV-диаграмме.

Задачи

172 1 кг воздуха сжимается от $P_1 = 1$ бар и $t_1 = 15^\circ\text{C}$ до $P_2 = 5$ бар и $t_2 = 100^\circ\text{C}$. Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

Ответ: $\Delta s = -0,196 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$.

173 Определить приращение энтропии 3 кг воздуха: а) при нагревании его по изобаре от 0 до 400°C ; б) при нагревании его по изохоре от 0 до 880°C ; в) при изотермическом расширении с увеличением объема в 16 раз. Теплоемкость считать постоянной.

Ответ: а) $\Delta s_p = 2,744 \text{ кДж/K}$;

б) $\Delta s_v = 3,134 \text{ кДж/K}$; в) $\Delta s_T = 2,359 \text{ кДж/K}$.

174 1 кг воздуха сжимается по политропе от 1 бар и 20°C до 8 бар при $n = 1,2$. Определить конечную температуру, изменение энтропии, количество отведенного тепла и затраченную работу.

Ответ: $t_2 = 141^\circ\text{C}$; $q = -87,1 \text{ кДж/кг}$;

$\Delta s = -0,02445 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$; $l = -173,0 \text{ кДж/кг}$.

175 В сосуде объемом 200 л находится углекислота при температуре 20°C и давлении 100 бар. Температура среды 20°C , давление среды 1 бар. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести находящаяся в сосуде углекислота.

Ответ: $L_{\text{max полезн}} = 7220 \text{ кДж}$.

176 Торпеда приводится в действие и управляется автоматически, двигаясь на заданной глубине. Для двигателя торпеды

используется имеющийся в ней запас сжатого воздуха. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести двигатель торпеды, если объем сжатого воздуха в ней 170 л, давление 180 бар, а температура воздуха и морской воды $t_0 = 10^\circ\text{C}$. Торпеда отрегулирована на движение под уровнем моря на глубине 4 м. Определить также силу, с которой торпеда устремляется вперед, если радиус ее действия равен 4 км, а потерями привода можно пренебречь.

Ответ: $L_{\text{max полезн}} = 11810 \text{ кДж}$; $N = 295 \text{ Н}$.

177. В сосуде объемом 400 л заключен воздух при давлении 1 бар и температуре 40°C . Параметры среды: $P_0 = 1 \text{ бар}$ и $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести воздух, заключенный в сосуде.

Ответ: $L_{\text{max полезн}} = 4600 \text{ Дж}$.

178. Айсберг массой 10^9 кг при температуре 0°C дрейфует в Гольфстриме, температура воды в котором 20°C . Через некоторое время айсберг растаял и осталась вода при температуре 20°C . Определить изменение энтропии океанской воды, связанное с таянием айсберга.

Ответ: $\Delta S = 1500000 \text{ МДж/К}$.

179. Определить изменение энтропии кислорода массой 1 кг при давлении 1 МПа и температуре 427°C .

Ответ: $S = 0,2 \text{ кДж}$.

180. При подземном взрыве ядерной бомбы произошел выброс горячей породы массой 10^{10} кг при температуре 3000 К. Выброшенная порода остывает до температуры земной коры 600 К. Удельную теплоемкость породы принять $3352 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Определить изменение энтропии выброшенной породы.