

различия скоростей в слоях воздуха в направлении, перпендикулярном к плоскости крыши, при отсутствии вихревых движений воздуха возникает сила трения. Коэффициент внутреннего трения воздуха $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ кг/(м · с). Определить силу трения на каждый квадратный метр крыши поезда.

Указание. Градиент скорости можно оценить, если считать, что слой воздуха, примыкающий к крыше поезда, движется со скоростью v , а слой, примыкающий к потолку туннеля, имеет скорость, равную нулю.

Ответ: $F_{\text{тр}} / S = 3 \cdot 10^{-4}$ Н/м².

12.10. Водяной пар диффундирует из пространства над широким сосудом с теплой водой, где его плотность $\rho_1 = 25$ г/м³, в окружающий его объем воздуха. На расстоянии $l = 1$ м пар конденсируется на холодном стекле, около которого плотность насыщенного пара $\rho = 7,5$ г/м³. Процесс диффузии пара установившийся. Среднее значение коэффициента диффузии $D = 2,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Определить время, в течение которого на поверхности $S = 1$ дм² стекла осаждается $m = 0,2$ мг влаги.

Ответ: $t = 50$ с.

13. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Основные формулы и методические указания

В общем случае:

$$Q = \Delta U + A,$$

т.е. теплота Q , сообщенная газу, идет на изменение ΔU его внутренней энергии и на работу A , совершаемую газом против внешних сил.

Применение первого начала термодинамики к изопроцессам:

а) изохорический процесс ($V = \text{const}$)

$$\Delta V = 0, A = 0,$$

следовательно,

$$Q = \Delta U,$$

т.е. теплота, сообщенная газу, полностью идет на изменение его внутренней энергии, или

$$Q = \frac{m}{M} C_V \Delta T,$$

где C_V – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме, равная $C_V = i/(2) \cdot R$, где i – число степеней свободы.

б) изобарический процесс ($p = \text{const}$)

$$A = p\Delta V = \frac{m}{M} R\Delta T,$$

поэтому

$$Q = \frac{m}{M} C_V \Delta T + \frac{m}{M} R\Delta T;$$

в) изотермический процесс ($T = \text{const}$)

$$\Delta T = 0, \Delta U = 0, A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1},$$

следовательно,

$$Q = A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1},$$

т.е. теплота, сообщенная газу, полностью идет на совершение газом работы против внешних сил;

г) адиабатический процесс ($Q = 0$)

$$A = -\Delta U,$$

т.е. работа совершается газом за счет изменения внутренней энергии, или

$$A = -\frac{m}{M} C_V \Delta T,$$

или

$$A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{M} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma - 1} \right],$$

где γ – отношение молярной теплоемкости газа при постоянном давлении и молярной теплоемкости при постоянном объеме:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}.$$

Уравнения Пуассона. При адиабатическом процессе давление газа и его объем связаны соотношением

$$pV^\gamma = \text{const},$$

Начальное и конечное значения давления, объема и температуры связаны соотношениями:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma,$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1},$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

Примеры решения задач

Задача 1. Сколько теплоты поглощают 200 г водорода, нагреваясь от 0 до 100 °С при постоянном давлении? Каков прирост внутренней энергии газа? Какую работу совершает газ?

Решение. Теплота Q , поглощаемая газом при изобарическом нагревании, равна

$$Q = C_p m \Delta T,$$

где m – масса газа, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, ΔT – изменение температуры.

Как известно,

$$C_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}$$

где i – число степеней свободы молекулы газа (5 – для двухатомного газа), M – масса киломоля газа, R – универсальная постоянная.

Получим для Q :

$$Q = m \frac{i+2}{2} \frac{R}{M} \Delta T = 2,91 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 291 \text{ кДж.}$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = 2,08 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 208 \text{ кДж.}$$

Работу расширения газа найдем по формуле, выражающей первое начало термодинамики

$$Q = \Delta U + A,$$

откуда

$$A = Q - \Delta U = 8,3 \cdot 10^4 = 83 \text{ кДж}$$

Задача 2. Кислород массой $m = 2$ кг занимает объем $V_1 = 1 \text{ м}^3$ и находится под давлением $p_1 = 0,2$ МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объема $V_2 = 3 \text{ м}^3$, а затем при постоянном объеме до давления $p_3 = 0,5$ МПа. Найти изменение внутренней энергии газа, совершенную им работу и количество теплоты, переданное газу. Построить график процесса.

Решение. Изменение внутренней энергии газа выражается формулой:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T,$$

где i – число степеней свободы молекул газа (для двухатомных молекул кислорода $i = 5$), μ – молярная масса.

Начальную и конечную температуру найдем, используя уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

откуда

$$T = \frac{pVM}{mR}.$$

Подставляя численные значения в формулу, получим

$$T_1 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 32}{2 \cdot 8,31 \cdot 10^3} = 385 \text{ К,}$$

$$T_2 = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 32}{2 \cdot 8,31 \cdot 10^3} = 1155 \text{ К},$$

$$T_3 = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 32}{2 \cdot 8,31 \cdot 10^3} = 2888 \text{ К},$$

Подставляя числовые значения, находим:

$$\Delta U = \frac{5}{2} \frac{2 \cdot 8,31}{32} (2888 - 385) = 3,25 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Работа расширения газа при постоянном давлении:

$$A = \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{2}{32} 8,31 \cdot 10^3 (1155 - 385) = 0,4 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Работа газа, нагреваемого при постоянном объеме, равна нулю, т.е. $A_2 = 0$. Следовательно, полная работа,

$$A = A_1 + A_2 = 0,4 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Согласно первому началу термодинамики,

$$Q = \Delta U + A = 3,65 \text{ МДж}.$$

График процесса приведен на рис. 1.1

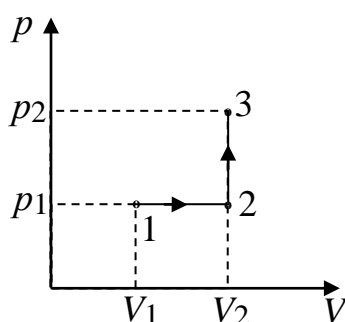


Рис. 13.1

Задачи для самостоятельного решения

13.1. Азот массой $m = 5$ кг, нагретый на $\Delta T = 150$ К, сохранил неизменный объем V . Найти теплоту, сообщенную газу, изменение внутренней энергии и совершенную газом работу.