第一章　热力学基础

§1.1　选择题

练习 1 C

解　等体加热内能增大，A 错；

等温过程内能不变，$\Delta E = 0, Q + A > 0, Q < 0$,B 错；

由 $PV = nRT, V \uparrow$, 则 $T \uparrow$, 则 $\Delta E > 0$, 又 $A < 0$, 则 $Q > 0$，C 正确；

绝热压缩，$A > 0, Q = 0$, 则 $\delta E > 0$,D 错。

练习 2 A

解　由容积不变知为等体过程，则 $Q_V = \nu C_V(T_2 - T_1), H_2$ 为双原子分子，$C_V = \frac{5}{2}R$, NH_3 为多原子分子，$C_V = 3R$ (本章未提及)，则 A 正确。

练习 3 B

解　由图中 ab 及 cd 围成面积知 $\Delta E_{ab} = \Delta E_{cd}, A_{ab} < A_{cd}$, 由 $\Delta E = Q + A$ 知 $Q_{ab} > Q_{cd}$, 又 $Q_{ab} = 0$, 所以 $a_{cb} < 0$, 即 $C < 0$, 故选 B。

练习 4 D

解　等温：$\delta T = 0$

等压：由 $PV = nRT, \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow |\delta T| = T_1$

绝热：由 $TV^{\gamma} = C_2$ 知 $(\frac{V_1}{V_2})^{\gamma-1} = \frac{T_2}{T_1} \to |\delta T| = |[1 - (\frac{1}{2})^{\gamma-1}]T_1|$

则选 D。

练习 5 D

解　绝热线与等温线只有一个交点，A 错；

由 $PV = nRT$，两者内能变化量相同，但做功不同，则吸热量不同，B 错；

曲线下围成面积不同，C 错；

由 $PV = nRT$，D 对。

练习 6 D

解 等压过程，系统对外做功 $A=\nu R(T_2-T_1)$，吸热 $Q_P=\nu C_P(T_2-T_1)$，则 $\frac{W}{Q}=\frac{A}{Q_P}=\frac{R}{C_P}=\frac{1}{1+\frac{5}{2}}=\frac{2}{7}$

故选 D。

练习 7 C

解 $\eta=1-\frac{T_1}{T_2}$，易知 BCC’ 和 ADD’ 分别为等温线，则 $\eta_1=\eta_2$；由图，BCD 下面积小于 BCD’，则 $W_1<W_2$，故选 C。

练习 8 C

解 体积增大，则 W>0;

$T_a=\frac{2p_1V_1}{nR}=T_b$，则 $\Delta E=0$，故选 C。

练习 9 B

解 A 错，绝热斜率应该比等温线绝对值大；

B 合理；

C 绝热线不能相交；

D 同 C。

故选 B。

练习 10 D

解 假设可行，则 $\eta=1000/1600=62.5\%$，

而由卡诺循环，$\eta=1-\frac{T_2}{T_1}=25\%$，故选 D。

§1.2 计算题

练习 11 $\frac{1}{2}(\frac{C}{V_1}^2-\frac{C}{V_2}^2)$ 减少 放热

解 $W=\int_{V_1}^{V_2}pdV=\int_{V_1}^{V_2}\frac{C}{V^3}dV=-\frac{1}{2}(\frac{C}{{V_2}^2}-\frac{C}{{V_1}^2})$

由 $PV=nRT,PV^3=C$ 得 $T=\frac{C}{nRV^2}$，V 增加，T 减少，则气体内能减少

$\Delta E=\nu C_V(T_2-T_1)=\frac{C_V(p_2V_2-p_1V_1)}{R}=\frac{C_V}{R}(\frac{C}{{V_2}^2}-\frac{C}{{V_1}^2})$

$\Delta Q=\Delta+A=(\frac{C_V}{R}-\frac{1}{2})(\frac{C}{{V_2}^2}-\frac{C}{{V_1}^2})<0$

所以放热。

练习 12 不重合 γ 不同 不重合

解 γ 不同则其函数型 $pV^\gamma=C$ 不同。

练习 13 500 700

解 等压过程中，$A=p\Delta V=\nu\Delta T$，单原子分子 $C_{P1}=\frac{5}{2}R$

$Q_1=\nu C_{P1}\Delta T=\frac{5}{2}A=500\text{J}$

$$Q_2 = \nu C_{P2}\Delta T = \frac{7}{2}A = 700\text{J}$$

练习 14 温度　　过程　　做功　　传递热量

练习 15 2/3　　$2S_1$

解　$\eta = 1 - \frac{T_0}{3T_0} = \frac{2}{3}$

$W = \frac{S_1}{1-\eta} - S_1 = 2S_1$

练习 16 1/3　　200J

解　$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{3}$

$W = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = 2\text{J}$

$A = \frac{Q_2}{W} = 200\text{J}$

练习 17 =　　>

解　两种气体对外做功即为 abcda 围成的面积，相等。

$\eta = \frac{W}{Q}, W$ 相同，由 $pV = nRT$ 知温度变化量也相同；

ab 过程为等压过程，且 $C_I < C_{II}$，则 $Q_I < Q_{II}$，则有 $\eta_I > \eta_{II}$

练习 18 $\frac{1}{2}p_0V_0$　　$9p_0V_0$

解　W 即为 1→2→3→1 围成的面积，易得 $W = \frac{1}{2}p_0V_0$

$\Delta E = \nu C_V \Delta T = \frac{3C_V p_0 V_0}{R} = \frac{15p_0V_0}{2}$

对外做功为 1→2 下的面积，即 $A = \frac{3p_0V_0}{2}$，则 $Q = \Delta E + A = 9p_0V_0$

练习 19 3R

解　$A = \frac{3p_1V_1}{2}, \Delta E = \nu C_V \Delta T = \frac{3C_V p_1 V_1}{R} = \frac{15p_1V_1}{2}$

$Q = \Delta E + A = 9p_1V_1$

$\Delta T = \frac{3p_1V_1}{R} \to C = \frac{Q}{\Delta T} = 3R$

练习 20 40J　　120J

解　由 EBCE 循环系统对外做功 70J，EDAE 过程外界对系统做功 30J，则一次循环过程系统对外做净功 40J；

由于 AEB 为绝热过程，则 $Q_{EAB} = 0$，由 $Q = \Delta E + A$ 知：

$W + \Delta E = Q_{BC} + Q_{CED} + Q_{DA}$

由于理想气体一次循环中的内能不变，则 $\Delta = 500$，则有 $40 = -30 + Q_{CED} - 50$，则 $Q_{CED} = 120\text{J}$

又因为 CED 为等体过程，则 $A_{CED} = 0, \Delta E = 120\text{J}.$

§1.3 解答题

练习 21

解 由

$$Q = \Delta E + A$$

知

$$\eta = 1 - \frac{\Delta E_{BC} + A_{BC}}{\Delta E_{DA} + A_{DA}}$$

$$A_{BC} = -\frac{1}{2}(p_B + p_C)(V_B - V_C)$$

$$\Delta E_{BC} = \nu C_V(T_C - T_B) = \frac{C_V(p_C V_C - p_B V_B)}{R} = \frac{1}{\gamma - 1}(p_C V_C - p_B V_B)$$

$$\Rightarrow Q_{BC} = \frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}(p_C V_C - p_B V_B) - \frac{1}{2}(p_C V_B - p_B V_C)$$

由于

$$\frac{p_C}{V_C} = \frac{p_B}{V_B}$$

所以

$$p_C V_B = p_B V_C$$

则

$$Q_{BC} = \frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}(p_C V_C - p_B V_B)$$

同理

$$Q_{DA} = \frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}(p_A V_A - p_D V_D)$$

则

$$\eta = 1 + \frac{Q_{BC}}{Q_{DA}} = 1 + \frac{T_C - T_B}{T_A - T_D}$$

在绝热过程 AB 中

$$T_B {V_B}^{\gamma - 1} = T_A {V_A}^{\gamma - 1}$$

$${p_B}^{\gamma - 1} {T_B}^{-\gamma} = {p_A}^{\gamma - 1} {T_A}^{-\gamma}$$

则有

$${T_B}^{\gamma + 1}\left(\frac{V_B}{p_B}\right)^{\gamma - 1} = {T_A}^{\gamma + 1}\left(\frac{V_A}{p_A}\right)^{\gamma - 1}$$

则

$$\frac{T_B}{T_A} = \sqrt[\gamma + 1]{\left(\frac{V_A/p_A}{V_B/p_B}\right)^{\gamma - 1}} = \sqrt[\gamma + 1]{\left(\frac{V_D/p_D}{V_C/p_C}\right)^{\gamma - 1}} = \frac{T_D}{T_C} = k$$

则

$$\eta = 1 + \frac{T_C - T_B}{T_A - T_D} = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

练习 22

解

(1) $A = \int_{V_0}^{6V_0} p dV = 7p_0V_0$

$\Delta E = \nu C_V(T_C - T_A) = \frac{5\nu R(T_C - T_A)}{2} = \frac{5}{2}(6p_0V_0 - 3p_0V_0) = \frac{15}{2}p_0V_0$

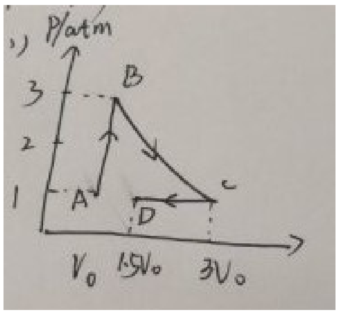
$Q = \Delta E + A = \frac{29}{2}p_0V_0$

(2) $dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dE + pdV}{T} = \frac{\nu C_V}{T}dT + \frac{\nu R}{V}dV$

$\therefore \Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\nu C_V}{T}dT + \int_{V_1}^{V_2} \frac{\nu R}{V}dV = \frac{5\nu R}{2}\ln\frac{6p_0V_0/\nu R}{3p_0V_0/\nu R} + \nu R\ln\frac{6V_0}{V_0} = 29.29\text{J/K}$

练习 23

解 (1)



(2)

$$\frac{T_B}{T_A} = \frac{p_BV_B}{p_AV_A} = 3 \Rightarrow T_B = 3T_A = 900\text{K}$$

$$\nu = \frac{m}{M} = 0.1\text{mol}$$

$$\Delta E_1 = \nu C_V(T_B - T_A) = 1247.10\text{J}$$

$$\Delta E_2 = 0$$

$$\Delta E_3 = \nu C_V(T_D - T_C) = 935.3\text{J}$$

则

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_3 = 311\text{J}$$

$$A = \nu RT_B\ln\frac{3V_0}{V_0} - \frac{3P_0V_0}{2}$$

由 $p_0V_0 = nRT_A$ 得

$$\frac{3p_0V_0}{2} = 374.13\text{J}$$

则

$$A = 450.65\text{J}$$

$$Q = \Delta E + A = 762.42\text{J}$$

练习 24

解 由下一章知识，

$$C_V = \frac{i}{2}R, C_p = \frac{i+2}{2}R$$

则

$$\gamma = \frac{i+2}{i}$$

因为是绝热过程，则有

$$T_0 {V_0}^{\gamma-1} = T_{\text{I}}(\frac{V_0}{2})^{\gamma-1} = T_{\text{II}}(\frac{3V_0}{2})^{\gamma-1}$$

解得

$$T_{\text{I}} = 2^{\frac{2}{i}}T_0, T_{\text{II}} = (\frac{2}{3})^{\frac{2}{i}}T_0$$

则

$$A = \frac{\nu R}{\gamma-1}((\frac{2}{3})^{\frac{2}{i}}T_0 - T_0) + \frac{\nu R}{\gamma-1}(2^{\frac{2}{i}}T_0 - T_0) = \frac{i\nu RT_0}{2}[(\frac{2}{3})^{\frac{2}{i}} + 2^{\frac{2}{i}} - 2]$$

第二章　气体动理论

§2.1　选择题

练习 1 B

解　微观上，气体温度表示气体分子的运动速度，对于单个或少数分子，温度的概念失去了意义。宏观上，气体的温度表示气体分子的平均冷热程度。

练习 2 B

解

$$Vp = \sqrt{\frac{2kT}{u}}$$

$$uO_2 > uH_2$$

$$Vp\,(O_2) < Vp\,(H_2)$$

$$\frac{Vp\,(O_2)}{Vp\,(H_2)} = \sqrt{\frac{2kT}{32}} / \sqrt{\frac{2kT}{2}} = \frac{1}{4}$$

K 为常量，T 相同。

练习 3 C

解　自由度为 i 的分子的平均动能为 ikT/2。

练习 4 A

解

$$\sqrt{\bar{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{u}}$$

$$uO_2 > uH_2$$

$$\sqrt{\bar{v}^2\,(O_2)} = \sqrt{\bar{v}^2\,(H_2)}$$

$$T\,(O_2) > T\,(H_2)$$

练习 5 B

解　等温过程系统内能不变。

练习 6 A

解

$$\varepsilon_{He} = \varepsilon_{N_2}$$
$$n_{He} = n_{N_2} \quad n = \frac{N}{V}$$
$$\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2}kT$$
$$T_{He} = T_{N_2}$$
$$p = \frac{2}{3}n\bar{\varepsilon}$$
$$p_{He} = p_{N_2}$$

练习 7 A

解

$$pV = \nu RT$$
$$pV = \frac{m}{M}RT$$
$$pV = \rho RT$$
$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

由于水滴静止，则

$$p_{H_2} = p_{O_2}$$

又因为 T 相同，则

$$\frac{p_{H_2}}{p_{O_2}} = \frac{\frac{pM_{H_2}}{RT}}{\frac{pM_{O_2}}{RT}} = \frac{1}{16}$$

练习 8 D

解

$$\bar{z} = \sqrt{2}\pi d^2\bar{v}n$$
$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$$

$\because n = \frac{p}{kT}$ 不变，$\bar{v}$ 不变

$\bar{z} = \sqrt{2}\pi d^2\bar{v}\frac{p}{kT}, p$ 变为原来的两倍

$$\therefore z' = 2\bar{z}$$
$$\because \bar{v} = \bar{\lambda}\bar{z}$$
$$\therefore \lambda' = 2\bar{\lambda}$$

练习 9 C

解

$2H_2O = 2H_2 + O_2$

$E = v\frac{i}{2}RT$

对于刚性分子，双原子分子气体的 i=5, 多原子分子气体的 i=6

$E_0 = 2 \cdot \frac{6}{2}RT$

$E_0' = 2 \cdot \frac{5}{2}RT + \frac{5}{2}RT = \frac{15}{2}RT$

$\therefore \frac{15}{2}RT \div 6RT = 125\%$

练习 10 B

解

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{u}}$$

$$T_2 = \frac{3}{2}T_1$$

$$T_2 = \left(\frac{3}{2}\right)^2 T_1 = 280 \times \frac{9}{4} = 630$$

§2.2 填空题

练习 11 $\int_{v_2}^{v_2} f(v)Ndv$ $\quad \frac{\int_{v_1}^{v_2} vf(v)dv}{\int_{v_1}^{v_2} f(v)dv}$ $\quad N \cdot \frac{1}{2}m\int_{v_1}^{v_2} v^2 f(v)dv$

解 (1)

$$\frac{dN}{N} = f(v)dv$$

$$dN = Nf(v)dv$$

$$N' = \int_{v_1}^{v_2} Nf(v)dv$$

(2)$v_1 \sim v_2$的平均速度 $= \frac{\text{这个区间里每个分子速度之和}}{\text{这个区间里分子总数}} = \frac{\int_{v_1}^{v_2} vdN}{\int_{v_1}^{v_2} dN} = \frac{N\int_{v_1}^{v_2} vf(v)dv}{N\int_{v_1}^{v_2} f(v)dv} = \frac{\int_{v_1}^{v_2} vf(v)dv}{\int_{v_1}^{v_2} f(v)dv}$

(3)总平动动能之和 = 每个分子平动动能之和 $= \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{2}mv^2dN = \frac{1}{2}mN\int_{v_1}^{v_2} v^2 f(v)dv$

练习 12 $\frac{N_A}{N_A+N_B}f_A(v) + \frac{N_B}{N_A+N_B}f_B(v)$

解 $\frac{N_A}{N_A+N_B}$ 指的是 A 在混合气体里占比，B 同理

练习 13 $n_0e^{-\frac{mgz}{kT}}$ $\quad z = -\frac{kT\ln\frac{p}{p_0}}{mg}$

解 由玻尔兹曼分布律：

$n = n_0 e^{-\frac{mgz}{kT}}$

$p = p_0 e^{-\frac{mgz}{kT}}$

$z = -\frac{kT \ln\frac{p}{p_0}}{mg}$

练习 14 升高 升高

解 (1) 温度应上升。因为高速运动的氧气瓶中的分子是在杂乱无章运动的基础上附加上 x 方向定向运动速度。氧气瓶静止下来后，气体分子与氧气瓶发生碰撞，高速的 x 方向定向运动动能通过分子之间的频繁碰撞逐步平均分配到 y、z 方向的热运动动能上去，所以温度上升。

(2)$pV = \nu RT$，T 增大，V, ν, R 都不变，所以 p 增大。

练习 15 $\frac{3kT}{2}$ 温度是大量分子热运动的集体表现，对单个或少数分子来说，温度的概念就失去了意义。

练习 16 $7.82 \times 10^7 s^{-1}$ 5×10^{-5}cm

解

$\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$

$\bar{\lambda}$ 和 $\bar{v}$ 成反比

$p_0 = 1 \times 10^5 Pa$

$p_1 = 1 \times 10^4 Pa$

$\therefore \overline{\lambda'} = 10\bar{\lambda} = 5 \times 10^{-5} cm$

$z' = \frac{1}{10}\bar{z} = 7.82 \times 10^7 s^{-1}$

练习 17 1：4：16 1：2：4

解

$$\sqrt{\bar{v}^2} = 1.73\sqrt{\frac{RT}{M}}$$

$$\because \sqrt{\bar{v}_A^2} : \sqrt{\bar{v}_B^2} : \sqrt{\bar{v}_C^2} = 1 : 2 : 4$$

$$\therefore T_A : T_B : T_C = 1 : 2^2 : 4^2 = 1 : 4 : 16$$

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\nu N_A}{V}$$

$$\therefore n \propto \frac{\nu}{V}$$

$$\therefore \frac{\nu_1}{V_1} : \frac{\nu_2}{V_2} : \frac{\nu_3}{V_3} = n_1 : n_2 : n_3 = 4 : 2 : 1$$

$$pV = \nu RT$$

$$p = \frac{\nu RT}{V} = \frac{\nu}{V} \cdot T \cdot R$$

$$\therefore p \propto \frac{\nu}{V} T$$

$$\therefore p_1 : p_2 : p_3 = 4 \times 1 : 2 \times 4 : 1 \times 16 = 1 : 2 : 4$$

练习 18 6

解　(1) 刚性多原子分子（甲烷）共有 6 个自由度。

(2) 由于分子热运动的无规则性，任何一种运动都不比其他运动占有特别的优越性，所以机会相等，所以分子绕其质心转动对 i 的贡献为 3.

练习 19 $\geqslant 0$　　不变　　增

解　(1) 孤立系统的熵永远也不会减少。

(2) 可逆过程熵不变。

(3) 由于 ΔS≥0，不可逆过程熵增。

练习 20 0　　增

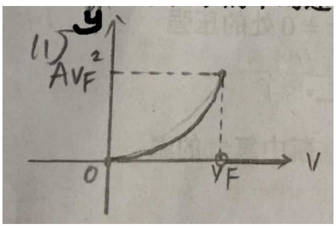
解　(1) 气体自由膨胀，对外界不做功（A=0）。绝热过程 Q=0，ΔE=-A=0。故内能增量为 0。

(2) 孤立系统的熵永远也不会减少。

§2.3　计算题

练习 21

解　(1)



(2)

$$\int_0^{v_F} Av^2 dv = 1$$

$$\frac{1}{3}Av^3\Big|_0^{v_F} = 1$$

$$\frac{1}{3}Av_F^3 = 1$$

$$A = \frac{3}{v_F^3}$$

(3)

速率分布曲线上与速率分布函数极大值所对应的速率称为最概然速率。

$v_P = v_F$

(4)

$$\bar{v} = \int_0^{v_F} vf(v)dv$$

$$\bar{v} = \int_0^{v_F} v \cdot \frac{3}{v_F^3}v^2 dv = \frac{3}{4v_F^3}v^4\Big|_0^{v_F} = \frac{3}{4}v_F$$

(5)

$$\bar{v} = \int_0^{v_F} vf(v)dv$$

$$\bar{v} = \int_0^{v_F} v \cdot \frac{3}{v_F^3}v^2 dv = \frac{3}{4v_F^3}v^4\Big|_0^{v_F} = \frac{3}{4}v_F$$

$$\bar{v}' = \int_{\frac{v_F}{2}}^{v_F} \frac{3}{v_F^3}v^3 dv = \frac{3}{4v_F^3}v^4\Big|_{\frac{v_F}{2}}^{v_F} = \frac{3}{4v_F^3}\left(v_F^4 - \frac{1}{16}v_F^4\right) = \frac{45}{64}v_F$$

练习 22

解　(1)

$$p = nkT$$

$$n = \frac{p}{kT} = 2.415 \times 10^{25}$$

$$n' = 2.415 \times 10^{16}$$

$$\therefore N = 2.415 \times 10^{16}\text{个}$$

(2)

$$m_0 = \frac{M}{N_A} = 5.31 \times 10^{-23}g$$

(3)

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{Nm_0}{V} = \frac{2.415\times10^{16}\times5.31\times10^{-23}}{10^{-9}} \times 10^{-3} = 1.28236 \times 10^{27}\mathrm{kg/m^3}$$

(4)

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8\times1.38\times10^{-23}\times300}{\pi\times5.31\times10^{-23}\times10^{-3}}} = 446\mathrm{m/s}$$

练习 23

解

(1)

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu gh}{kT}} = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}} = 0.633p_0 = 6.45 \times 10^4 Pa$$

(2)

每口吸入的空气 v 不随海拔变化而变化

相同质量 → v 相同

$pV = nRT$

忽略气温随高度变化时，T 为定值

$\therefore p_0 \cdot 17v = 0.633 p_0 \cdot xv$

$x = 26.7 \approx 27$

练习 24

解

(1)

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\nu m_0}{V} = 11.3g/cm^3$$

$$pV = \nu RT$$

$$\therefore \frac{\nu}{V} = \frac{p}{RT} = \frac{1.01\times10^3}{8.314\times300} = 0.405$$

$$m_0 = \rho\frac{V}{\nu} = \frac{11.3}{0.405} = 27.9012 \approx 28$$

则可能是 $N_2, CO, CH_2 = CH_2$

(2)

$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{\mu}} = 1.73\sqrt{\frac{RT}{M}} = 1.73 \times \sqrt{\frac{8.314\times300}{28\times10^{-3}}} = 516.8\mathrm{m/s}$$

(3)

$$\bar{\varepsilon}_{平} = \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 = 6.21 \times 10^{-21}$$

$$\bar{\varepsilon}_{转} = kT = 4.14 \times 10^{-21}$$

(4) 单位体积总平动动能 =1 个分子平均平动动能 * 分子数密度

$$E_{平总} = \bar{\varepsilon}_{平} n = \bar{\varepsilon}_{平}\frac{p}{kT} = 6.21 \times 10^{-21} \times \frac{1.01\times10^3}{1.38\times10^{-23}\times300} = 1515J$$

同理，$\bar{\varepsilon}_{转总} = 1010J$

(5)

$$E = \nu\frac{i}{2}RT = 0.3 \times \frac{5}{2} \times 8.314 \times 300 = 1870.65J$$