

## План практических занятий.

Номера задач по: [№...]- Гречко Л.Г. и др., [Т№ ..., С№...]- Кубо, [КЛ]- консп. лекций, {№...}-Кронин и др., (П.№ ...) - Румер, Рывкин, Д: № - домашнее задание.

### Термодинамика: 5 занятий.

**1. Первое начало** [для реального процесса], работа, теплота, политропические процессы.  $T, P, \rho$ , в различных моделях атмосферы.  $\Delta Q = \Delta U + \Delta A \Leftrightarrow \delta Q = dU + \delta A, \delta A = PdV, \delta Q = C_\phi dT$ .

- (1) Принимая для идеал. газа  $PV = RT$ , что  $(\partial U / \partial V)_T = 0$ , вывести ф-лу Майера:  $C_p = C_v(T) + R$ .
- (2) Теплоемкость моля идеального газа под поршнем с пружиной  $k, x_0 = 0, C_v \neq const$ .
- (3) 1 моль идеального совершенного газа,  $C_v = const$ , сжимают поршнем в  $k$  раз так, что выделяемое им тепло  $(\delta Q)_\phi$  все время равно изменению внутренней энергии  $-(\delta U)_\phi$ . Начальная температура  $T_0$ . Найти теплоемкость процесса, уравнение процесса, и работу на сжатие.
- (4) Уравнения адиабатических процессов для системы с  $PV = \lambda U$ . Примеры -- для идеал. газа в различных переменных  $(T, V), (P, V), (T, P) + K_T = \gamma K_Q, \alpha_P = P\beta_V K_T$ . [№ 65, 66]. (и ее  $K_Q, K_T$ )\*.
- (5) Найти теплоемкость газа под тяжелым поршнем за счет внутренней энергии газа  $U$  и потенциальной энергии поршня в поле  $g$ , а затем теплоемкость и центр тяжести бесконечного столба воздуха в атмосфере при  $T=const$  и сравнить с барометрической формулой [№ 42].
- (6) Найти градиент температуры в атмосфере за счет адиабатического расширения с высотой идеал. газа, и условие устойчивости по отношению к конвекции. [№ 95, 96], [Т: I. зз. 5, 8]
- (7) Найти уравнения состояния систем с заданными: (а)  $-VK_T = 1/\omega(T), P\beta_V = B(V)$ ;  
(б)  $-K_T = b(P), \alpha_P = a(T)$ ; (с)  $-K_T = \kappa(T), \alpha_P = A(P)$ ; и их явный вид, где возможно.
- (8\*) 1 моль ид. газа под поршнем. Пружина свободна. Затем:  $V_1 = V \rightarrow 2V = V_2$ . Найти  $T_2$  и  $P_2$ .
- (9\*) Из атмосферы, при постоянных  $T_0$  и  $P_0$ , в сосуд с вакуумом через очень малое отверстие вырывается идеальный газ,  $C_v = const$ . Найти температуру газа в сосуде после сравнения давления ( $\tau_p \ll \tau_T$ ) в нем с  $P_0$ . Закрыв его, найти давление в нем после сравнения температуры газа с  $T_0$ . (П. 23). Д: [№ 65, 66, 69, 74, 84, 85, 95, 96]

**2. Второе начало** [для виртуального обратимого процесса и/или равновесного состояния] и его следствия. Энтропия и ее вычисление, к.п.д. тепловых машин, Метод якобианов.

- (1)  $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = ?, dU(T, V) = ? \left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T = ?, \left(\frac{\partial C_v}{\partial V}\right)_T = ?, \left(\frac{\partial C_p}{\partial P}\right)_T = ?, C_p - C_v = -T \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \left(\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V\right)^2 = ?$ ,
- (2) Энтропия, внутр. энергия, урав. адиаб. проц. реального газа В. д. В-са  $(P + a/V^2)(V - b) = \nu RT$ .
- (3) Энтропия, внутр. энергия, урав. адиаб. проц. идеального газа  $PV = \nu RT$ , -- при  $a=b=0$ .
- (4\*) Энтропия и внутренняя энергия тела с  $P = P_0(1 + \alpha T - \beta V), C_v = const$ .
- (5) Уравнения политропических и адиабатических процессов в переменных  $(T, S), (T, V), (P, V)$ ?
- (6) Термическое, калорическое уравнения состояния и энтропия и  $K_S(P)$  системы с  $PV = \lambda U$ ,
- (7)  $C_\phi = ?, \phi(T, V), \phi(S, V), dS(T, P) = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T dP, \phi(T, P), \phi(T, S), \phi(P, V) - ?$  (П. 11), [КЛ]
- (8) Как изменяется температура при изменении плотности жидкости в звуковой волне, групповая скорость которой  $= v$ ? Д: [№ 71, 73, 75, 77, 81, 83, 86, 87, 89, 92].
- (9\*) Найти к.п.д. цикла тепловой машины состоящего из изотермы, адиабаты и политропы, с максимальной и минимальной температурами  $T_1 > T_2$  (два варианта). Сравнить с кпд Карно.

**3. Неравновесные процессы**, Гей-Люсс. Дж.-Томп. Термодинамические потенциалы  $U, H$ . Нернст.

(4) Два одинаковых тела с постоянными теплоемкостями  $C$  и температурами  $T_1 > T_2$  вместе адиабатически изолированы. Найти равновесные температуры  $T_a, T_b$ , если переход к равновесию происходит: (а) необратимо (телопередача), (б) обратимо (Как именно?). Найти увеличение энтропии в случае (а), и максимальную работу в случае (б).

(1) Доказать, что:  $C_p - C_v = \left[ V - \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T \right] \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$  где энтальпия  $H = U + PV, H(\cdot, \cdot)?$  [№ 81].

(2) Найти термическое уравнение состояния для газа с  $(\partial U / \partial V)_T = a > 0, (\partial H / \partial P)_T = b > 0$ .

(3) Процессы и коэфф-ты: Гей-Л-ка:  $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_U = \frac{\partial(T,V)}{\partial(V,U)} \cdot \frac{\partial(T,U)}{\partial(T,V)} = \frac{1}{C_V} \left( P - T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \right)$ ; и Дж-Томп.:

$$\Delta U = \Delta A', \mapsto dH \equiv d(U + PV) \equiv TdS + VdP, \mapsto \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H = \frac{\partial(T,P)}{\partial(P,H)} \cdot \frac{\partial(T,H)}{\partial(T,P)} = \frac{1}{C_P} \left( T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V \right),$$

(Идеализация). Знак эффекта. Точка инверсии,  $C_p - C_v = ?$  в ней. И все для Ван дер Ваальса.

(5) Найти уравнения состояния, если потенциал Гиббса:  $\Phi(T, P) = aT(b - \ln T) + RT \ln P - TS_0$

(6) Найти  $C_p - C_v$  при  $T \rightarrow 0$ , если: (a)  $C_v \rightarrow \alpha T^n$ ,  $\rightarrow$  (b)  $S \rightarrow \alpha T^n$ . Д: |№ 80, 81, 83, 90, 91|

(7) Определить термодинамические потенциалы в переменных  $P, H$  и  $T, F$ , и уравн. состояния.

#### 4. Потенциалы Гельмгольца и Гиббса. Излучение. Фазовые переходы. Поверхность раздела.

(1) Каков общий вид уравнений состояний системы с потенциалом Гиббса  $\Phi(T, P) \equiv F + PV = 0$ ?  $F = -PV$ ,  $dF \equiv -SdT - PdV$ ;  $d\Phi \equiv -SdT + VdP = 0$ ,  $S = V_S(T)$ ,  $U \equiv F + TS = Vu(T)$ ;  $P(T, \mu) \mapsto P(T)$ .

(2) Излучение:  $P(T) = (1/3)u(T)$ ;  $S(T, V), U(T, V), F(T, V), C_{V,P}, K_{T,S} = ?$ , уравнения адиабаты и политропы?.

(3) Определить кривую возгонки,  $P\bar{V}_2 = RT$ , кристалла при: (a)  $\lambda = \lambda_0$ , (b)  $\lambda = \lambda(T)$ ,  $C_{P2} = (5/2)R$ , если:  $C_{P1} = bR$ ,  $b \rightarrow ?$  или:  $C_{P1} = aT^3$ , ( $T \rightarrow 0$ ). Д: |№ 93, 94, 100, 107, 108, 111, 113, 115|

(4) Найти критический радиус зародыша-капли жидкости с  $\mu_0$  при конденсации пересыщенного пара с  $\mu_1 > \mu_0$ . Имеем:  $\Delta F(T, \Sigma, N_0, N_1) = \sigma \Delta \Sigma + \mu_0 \Delta N_0 + \mu_1 \Delta N_1 \mapsto \sigma \Sigma + (\mu_0 - \mu_1) N_0$ . |№ 115|.

(5) Для ид-го газа  $PV = NkT = \nu RT$ ,  $C_v(T) = Nf(T)$ . Найти:  $S(T, V, N), F(T, V, N), U(T, V, N)$ ,  $\mu(T, \bar{n}) \equiv \mu(T, P)$ ,  $\Phi(T, P, N) = N\mu$ , где:  $\bar{n} \equiv N/V$ , -- плотность числа частиц [Т.Ш.п. 7].

(6\*) Доказать, что,  $\bar{n} = \left(\frac{\partial P}{\partial \mu}\right)_T$ ,  $\left(\frac{\partial \bar{n}}{\partial \mu}\right)_T = K_T \bar{n}^2$ , где:  $K_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_{T,N} = \frac{1}{\bar{n}} \left(\frac{\partial \bar{n}}{\partial P}\right)_{T,N}$ , (П.22), [КЛ].

#### 5. Пленки, Ленты, Пружины. Стержни. Магнетики. Диэлектрики. Химич. реакции, растворы.

(1) Найти кол-во тепла  $q_T = (\delta Q)_T / d\Sigma$  при изотермическом растяжении 1-цы поверхности  $\Sigma$  тонкой пленки при  $\sigma = \sigma(T, \Sigma)$ . Какова работа  $\Delta A_T(T, \Sigma)$  при таком растяжении и  $\sigma = \sigma(T)$ ? Имеем, т.к.  $dF = -SdT + \sigma d\Sigma$ , что  $(S'_\Sigma)_T = -(\sigma'_T)_\Sigma$ ,  $(\Delta Q)_T = T(\Delta S)_T$ . и:  $F(T, \Sigma) \Rightarrow F(T, 0) + \sigma \Sigma$ .

(2) Пружина при заданной температуре  $T$  подчиняется закону Гука  $f = k(T)x$ . Найти  $F(T, x)$ ,  $S(T, x), U(T, x), \Phi(T, f), \Delta Q_T(T, x), \Delta A_T(T, x)$ , -- тепло и работу при изотермическом растяжении.

(3) Стержень с начальной длиной  $l_1$  и сечением  $\sigma$  растягивают силой  $f$ . Найти  $F(T, l), \Delta A_T(T, l)$ ,  $\Phi(T, f), S(T, f)$ , если  $\frac{x}{l_1} \equiv \frac{l - l_1}{l_1} = \frac{f}{E\sigma}$ ,  $\frac{l_1 - l_0}{l_0} = \alpha(T - T_0)$ , где:  $l_0 \equiv l(T_0, 0)$ ,  $l_1 \equiv l(T, 0)$ ,  $l \equiv l(T, f)$ .

$T_0 = 273.15K$ ,  $\alpha(T - T_0) \ll 1$ ,  $E$ , -- модуль Юнга. Т.е. найти работу и тепло по растяжению при  $T = const$ ,  $\Delta Q_T(T, f), U(T, l)$ , (П.14). Д: |№ 70-ошибка!, 72 82, 88, 97, 98, 99, 109, 110, 114, 116|

(4) Диэлектрик с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon(T)$  вдвинут в плоский конденсатор с электрическим полем  $E$  до объема  $V = abx$ . Найти: (a)  $\Phi^*(T, E), S(T, E)$  диэлектрика в поле  $E$ ; (b) тепло  $\Delta Q_T$ , выделившееся (?) в конденсаторе с диэлектриком при изотермическом возрастании поля от 0 до  $E$ ; (c) силу с которой диэлектрик втягивается (?) в конденсатор; (d) плотность (собственной) внутренней энергии диэлектрика  $\bar{u}^*(T, E)$ . Рассмотреть полярный:  $\varepsilon(T) = 1 + 4\pi\kappa(T) \mapsto 1 + \tilde{\Theta}/T$ , неполярный:  $\varepsilon(T) = const$ , и ланжевеновский диэлектрики.

(5) Найти магнитную восприимчивость  $\chi_m(T)$  парамагнетика  $M = \chi_m(T)H$ , если его теплоемкость  $C_M$  не зависит от намагниченности  $M$ . Так как  $dU^* = TdS + HdM$ , то

$$\left(\frac{\partial C_M}{\partial M}\right)_T = T \left(\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial(S, T)}{\partial(M, T)}\right)\right)_M = T \left(\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial(H, M)}{\partial(M, T)}\right)\right)_M = -T \left(\frac{\partial^2 H}{\partial T^2}\right)_M. \text{ Откуда } \frac{1}{\chi_m(T)} = \frac{T - \Theta_C}{\Theta}.$$

(6) Найти малое относительное изменение скорости звука  $1 \gg (\nu_H - \nu_0)/\nu_0$  в идеальном магнитном газе:  $M = \chi_m(T)H$ ,  $P = (\rho/\mu)RT$ , при наложении слабого магнитного поля  $H$ . Рассмотреть случаи и парамагнетика  $\chi(T) = \Theta/T$ , и диамагнетика  $\chi(T) = const$ . {№ 7. 19}

(План доц. Коренблита С.Э.)

Выбор задач на усмотрение преподавателя!