

1А. В тропосфере, то есть до высоты $H = 11,5$ км, температура воздуха убывает со скоростью $\alpha = 6,5$ К/км. Определить длину свободного пробега молекул на верхней границе тропосферы. Температура на уровне моря $T_0 = 288$ К, давление $P_0 = 10^5$ Па. Газокинетический диаметр молекул $d = 3,6 \cdot 10^{-10}$ м.

2А. Имеется система N невзаимодействующих между собой частиц со спином 1 (возможные квантовые состояния $m = 0$ и $m = \pm 1$). Энергия частицы в состояниях $m = \pm 1$ равна ε , а в состоянии $m = 0$ равна 0. Вычислить теплоёмкость системы C для случая $0 < \varepsilon \ll kT$.

3А. В сосуде находится одноатомный идеальный газ. Среди соударяющихся со стенкой сосуда частиц определить долю α тех из них, энергия которых более чем в 2 раза превышает среднюю тепловую энергию частиц.

4А. Давление насыщенного пара на кривых фазового равновесия (испарения и сублимации) вблизи тройной точки описывается формулой Кирхгофа:

$$\ln P \approx A - \frac{B}{T},$$

где A и B — экспериментальные постоянные. Если измерять давление в паскалях, то на кривой испарения жидкой углекислоты $A_{\text{и}} = 21,6$, а на кривой сублимации твёрдого CO_2 $A_{\text{с}} = 25,6$. Тройная точка для CO_2 : $P = 5,11$ атм, $t = -56,6$ °С. Определить молярную теплоту плавления Λ углекислоты вблизи тройной точки.

5А. Для некоторой материи свободная энергия Ψ и энтропия S , нормированные определённым выбором начала отсчёта, связаны соотношением

$$\Psi = -\frac{TS}{4}.$$

Найти выражение для энтропии в переменных TV и уравнение состояния для этой материи, если известно, что её внутренняя энергия пропорциональна занимаемому объёму. Что это за материя?

1Б. В тропосфере, то есть до высоты $H = 11,5$ км, температура воздуха убывает со скоростью $\alpha = 6,5$ К/км. На какой высоте длина свободного пробега молекул равна $\lambda = 10^{-7}$ м? Температура на уровне моря $T_0 = 288$ К, давление $P_0 = 10^5$ Па. Газокинетический диаметр молекул $d = 3,6 \cdot 10^{-10}$ м.

2Б. Имеется система N невзаимодействующих между собой частиц со спином 1 (возможные квантовые состояния $m = 0$ и $m = \pm 1$). Энергия частицы в состояниях $m = \pm 1$ равна ε , а в состоянии $m = 0$ равна 0. Вычислить энтропию системы для случая $0 < \varepsilon \ll kT$.

3Б. В сосуде находится одноатомный идеальный газ. Среди соударяющихся со стенкой сосуда частиц определить долю β частиц с энергией, превышающей среднюю энергию, с которой частицы вылетали бы через малое отверстие в стенке.

4Б. Давление насыщенного пара бензола C_6H_6 вблизи тройной точки описывается формулой Кирхгофа:

$$\ln P \approx A - \frac{B}{T},$$

где A и B — экспериментальные постоянные. Если измерять давление в паскалях, то на кривой испарения жидкости $A_{\text{и}} = 14,0$, $B_{\text{и}} = 1541$ К, а на кривой возгонки $A_{\text{в}} = 18,2$, $B_{\text{в}} = 2713$ К. Определить температуру и давление в тройной точке бензола, а также удельную теплоту плавления твёрдого бензола $\lambda_{\text{пл}}$.

5Б. Для некоторой материи термодинамический потенциал Гиббса Φ тождественно равен нулю, а её энтропия, нормированная определённым выбором начала отсчёта, равна

$$S = \frac{4PV}{T}$$

(V , P , T — соответственно объём, занимаемый этой материей, давление и температура). Найти выражение для внутренней энергии в переменных TV и уравнение состояния для этой материи. Что это за материя?

1А. В сосуде находится смесь газов (по 1 молю каждого) при температуре $T = 1000$ К. Для каждого газа определяется число молекул, имеющих скорости от 999 до 1001 м/с. Какова молярная масса газа, для которого получится наибольшее число таких молекул? Чему равно это число?

2А. При адиабатическом сжатии серебра на $\Delta V/V = -0,01$ его температура возрастает на $\Delta T/T = 0,028$. Определить коэффициент изотермической сжимаемости β серебра, если температурный коэффициент объёмного расширения $\alpha = 5,7 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, удельная теплоёмкость серебра $c_v = 0,23 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot \text{К})$, плотность $\rho = 10,5 \text{ г}/\text{см}^3$.

3А. Моль трёхатомного газа Ван-дер-Ваальса, находящийся в критическом состоянии, адиабатически расширяется в вакуум, в результате чего его температура падает до $T = \frac{3}{4}T_{\text{крит}}$. Определить, во сколько раз изменилось давление газа. Считать, что теплоёмкость C_v данного газа такая же, как у идеального.

4А. На Венере атмосфера состоит из CO_2 . Полагая CO_2 идеальным газом и атмосферу адиабатической, определить температуру на поверхности планеты, если плотность падает в $n = 2$ раза на высоте $H = 12,2$ км при ускорении силы тяжести $g = 8,87 \text{ м}/\text{с}^2$. Молярная теплоёмкость CO_2 в таких условиях $C_v = 5R$. Ускорение силы тяжести не зависит от высоты. *Указание.* Адиабатической называется атмосфера, в которой порции газа, перемещаясь по вертикали без теплообмена, все время остаются в механическом равновесии.

5А. В объёме сферического сосуда радиуса $R = 2$ см протекает реакция с образованием атомов водорода. Скорость реакции $W_0 = 6,0 \cdot 10^{19}$ атомов/ $(\text{см}^3 \cdot \text{с})$. При столкновении со стенкой сосуда атомы водорода захватываются с вероятностью $\varepsilon = 10^{-3}$. Определить среднюю концентрацию атомов водорода в сосуде, если температура в сосуде $T = 788$ К, а коэффициент диффузии $D = 60 \text{ см}^2/\text{с}$.

1Б. В сосуде находятся по 1 молю гелия ($\mu_1 = 4 \text{ г}/\text{моль}$) и азота ($\mu_2 = 28 \text{ г}/\text{моль}$). При какой температуре число молекул со скоростями от 999 до 1001 м/с одинаково для обоих газов? Чему равно это число?

2Б. Определить относительное изменение температуры глицерина $\Delta T/T$ при адиабатическом его сжатии на $\Delta V/V = -0,01$, если скорость звука в глицерине $u = 1895 \text{ м}/\text{с}$, температурный коэффициент объёмного расширения глицерина $\alpha = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$, теплоёмкость $C_p = 217 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$, молярная масса $\mu = 92 \text{ г}/\text{моль}$.

3Б. Температура моля одноатомного газа Ван-дер-Ваальса при адиабатическом расширении в вакуум из объёма $V_0 = 3V_{\text{крит}}$ меняется от значения $T_0 = 2,2T_{\text{крит}}$ до $T = 2T_{\text{крит}}$. Определить изменение энтропии газа. Считать, что теплоёмкость C_v данного газа такая же, как у идеального.

4Б. На спутнике Юпитера Европе атмосфера состоит из аммиака NH_3 . Полагая NH_3 идеальным газом и атмосферу адиабатической, определить ускорение свободного падения g , если плотность атмосферы падает в $n = 1,5$ раза на высоте $H = 22$ км. Температура у поверхности спутника $T_0 = 137$ К. Ускорение силы тяжести не зависит от высоты.

Указание. Адиабатической называется атмосфера, в которой порции газа, перемещаясь по вертикали без теплообмена, все время остаются в механическом равновесии.

5Б. В объёме длинного цилиндрического сосуда радиуса $R = 2$ см протекает реакция с образованием атомов водорода. Скорость реакции $W_0 = 6,0 \cdot 10^{19}$ атомов/ $(\text{см}^3 \cdot \text{с})$. При столкновении со стенкой сосуда атомы водорода захватываются с вероятностью $\varepsilon = 10^{-3}$. Определить среднюю концентрацию атомов водорода в сосуде, если температура в сосуде $T = 788$ К, а коэффициент диффузии $D = 60 \text{ см}^2/\text{с}$.

1А. На некоторых спутниках Юпитера при температуре $T = 137$ К предполагается наличие морей из метана CH_4 . Определить, при каком давлении на поверхности спутников это возможно? Под давлением $P_0 = 10^5$ Па метан кипит при температуре $T_0 = 112$ К. При этой температуре теплота испарения метана равна $\Lambda_0 = 8200$ Дж/моль. Теплоёмкости метана считать соответственно равными $C_{\text{ж}} = 58$ Дж/(моль·К) для жидкости и $C_p = 41$ Дж/(моль·К) для газа.

2А. В центре сферы радиуса $R_1 = 5$ см находится шарик радиуса $R_0 = 0,5$ см, на поверхности которого протекает химическая реакция с постоянной скоростью $W_S = 3,0 \cdot 10^{-8}$ моль/(см²·с). Температура сферы поддерживается постоянной. Тепловой эффект реакции $Q = 8,0 \cdot 10^4$ Дж/моль. Теплоотвод определяется теплопроводностью смеси исходных веществ и продуктов реакции. Коэффициент теплопроводности $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-4}$ Вт/(см·К) не зависит от температуры. Определить установившуюся разность температур между поверхностями шарика и сферы.

3А. Вещество с неизвестным уравнением состояния совершает замкнутый положительный цикл, в котором сначала оно нагревается от температуры $T_1 = 200$ К до $T_2 = 400$ К в процессе с теплоёмкостью, пропорциональной температуре, потом охлаждается в адиабатическом процессе до некоторой температуры, и затем возвращается в исходное состояние по политропе. Определить теплоёмкость этой политропы, если КПД цикла $\eta = 1/3$.

4А. Частота колебаний атомов в молекуле газообразного фтора F_2 равна $\nu = 3,42 \cdot 10^{13}$ с⁻¹. Определить показатель адиабаты $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ для фтора при температуре $T = 300$ К, когда можно принимать во внимание переход молекул только на первый возбуждённый уровень колебаний.

5А. Электроны, движущиеся в тонком поверхностном слое, могут рассматриваться как двумерный идеальный газ. Определить, какая максимальная доля таких электронов может сохранить свои скорости при увеличении температуры в $n = 1,5$ раза.

1Б. Под давлением $P_1 = 10^5$ Па азот N_2 кипит при температуре $T_1 = 76$ К. В атмосфере Сатурна при температуре $T_2 = 106$ К предполагается наличие жидкого азота в слоях, в которых давление превышает $P_2 = 1,08 \cdot 10^6$ Па. Принимая теплоёмкости азота в соответствующем диапазоне температур равными $C_{\text{ж}} = 58,5$ Дж/(моль·К) для жидкости и $C_p = 28,8$ Дж/(моль·К) для газа, определить значения теплоты испарения азота при температурах T_1 и T_2 .

2Б. На поверхности длинного внутреннего цилиндра радиуса $R_0 = 0,05$ см коаксиального цилиндрического сосуда протекает химическая реакция с постоянной скоростью $W_S = 5,0 \cdot 10^{-8}$ моль/(см²·с). Температура внешнего цилиндра поддерживается постоянной, его радиус $R_1 = 2,0$ см. Тепловой эффект реакции $Q = 9,0 \cdot 10^4$ Дж/моль. Теплоотвод определяется теплопроводностью смеси исходных веществ и продуктов реакции. Коэффициент теплопроводности не зависит от температуры и равен $\lambda = 3,5 \cdot 10^{-4}$ Вт/(см·К). Определить установившуюся разность температур между поверхностями цилиндров сосуда.

3Б. Вещество с неизвестным уравнением состояния совершает замкнутый положительный цикл, в котором сначала оно охлаждается от температуры $T_1 = 500$ К до $T_2 = 250$ К в процессе с теплоёмкостью, пропорциональной квадрату температуры, потом нагревается в адиабатическом процессе до некоторой температуры, и затем возвращается в исходное состояние по политропе. Определить теплоёмкость этой политропы, если КПД цикла $\eta = 2/9$.

4Б. Частота колебаний атомов в молекуле газообразного йода I_2 равна $\nu = 6,4 \cdot 10^{12}$ с⁻¹. Определить относительную среднеквадратичную флуктуацию колебательной энергии молекулы при температуре $T = 300$ К. Положить энергию основного состояния молекулы равной нулю.

5Б. Электроны, движущиеся в тонком поверхностном слое, могут рассматриваться как двумерный идеальный газ. Определить, какая минимальная доля таких электронов должна изменить свои скорости при увеличении температуры в $n = 2,5$ раза.