

Zh — Фазы и фазовые переходы

При заданном давлении переход из одного агрегатного состояния вещества (фазы) в другое происходит всегда при строго определённой температуре, при этом сам переход называется фазовым. Например, лёд при атмосферном давлении плавится при 0°C , так что при подводе тепла температура смеси из льда и воды остается неизменной вплоть до того момента, пока весь лёд не превратится в воду. Во всех предлагаемых ниже задачах считайте, что удельный объём жидкой фазы пренебрежимо мал по сравнению с удельным объёмом насыщенного пара, который можно считать идеальным газом. Теплоёмкость жидкой воды считайте независимой от температуры.

Справочные данные

Газовая постоянная $R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$; молярная масса воздуха $\mu_{\text{air}} = 29.0 \text{ г/моль}$; ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Нормальные условия: давление $P_0 = 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт.ст.} = 101325 \text{ Па}$, температура $T_0 = 273.15 \text{ К} = 0^\circ\text{C}$.

Свойства воды (H_2O) Молярная масса $\mu_w = 18.0 \text{ г/моль}$; плотность воды $\rho_w = 1.00 \text{ г/см}^3$; плотность льда $\rho_i = 0.920 \text{ г/см}^3$; температура плавления льда при нормальном давлении $t_m = 0.00^\circ\text{C}$; температура кипения воды при нормальном давлении $t_b = 100.0^\circ\text{C}$; удельная теплоёмкость воды $c_w = 4.20 \text{ Дж/(г}\cdot\text{К)}$; удельная теплота плавления льда $q_i = 334 \text{ Дж/г}$; удельная теплота парообразования воды (при 100°C) $r_w = 2259 \text{ Дж/г}$; показатель адиабаты Пуассона для водяных паров $\gamma = C_P/C_V = 4/3$.

Теплота фазового перехода

Если переход вещества из одной фазы в другую связан с выделением или поглощением некоторого количества теплоты, называемой теплотой перехода, то такой переход называется фазовым переходом первого рода. При этом теплота перехода q для единичной массы называется удельной теплотой фазового перехода (плавления, испарения, возгонки). Поскольку фазовый переход происходит при постоянном давлении, то по первому началу термодинамики теплота q расходуется на изменение внутренней энергии u и на работу A против постоянного внешнего давления:

$$q = u_2 - u_1 + A,$$

где u_1, u_2 - удельные внутренние энергии соответственно первой и второй фаз соответственно. При плавлении (кристаллизации) из-за малого различия плотностей жидкой и твёрдой фаз изменение объёма в результате фазового перехода невелико, поэтому работой A можно пренебречь по сравнению с изменением внутренней энергии.

1^{1.00} Рассчитайте, какая часть теплоты испарения воды при $t_b = 100^\circ\text{C}$ расходуется на изменение внутренней энергии. Ответ выразите в %.

2^{1.00} Вычислите удельную теплоту парообразования воды при комнатной температуре $t = 20.0^\circ\text{C}$.

В дальнейшем удельную теплоту испарения всех жидкостей считайте не зависящими от температуры.

Формула Клапейрона - Клаузиуса

При изменении давления температура фазового перехода первого рода меняется, то есть фазовый переход имеет место при строго определённой зависимости $P(T)$ между давлением P и температурой T вещества. Эта зависимость, изображённая на координатной TP -плоскости, называется фазовой $T - P$ диаграммой, а сама линия TP - линией фазового равновесия. Формула Клапейрона-Клаузиуса дает наклон линии фазового равновесия $P(T)$ в виде:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{q}{T(v_2 - v_1)},$$

где q - удельная теплота перехода из фазы 1 с удельным объёмом v_1 в фазу 2 с удельным объёмом v_2 .

3^{0.40} Считая известным давление насыщенного пара воды при температуре $t_b = 100^\circ\text{C}$, получите явную зависимость давления насыщенных паров воды от температуры $P(T)$.

4^{1.00} Вычислите температуру кипения воды на самой высокой вершине Казахстана - пике Хан-Тенгри. Высота пика Хан-Тенгри над уровнем моря $h \approx 7000\text{м}$. Температуру воздуха на высоте считать постоянной и равной $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

5^{0.60} При каком давлении (в атмосферах) лед будет плавиться при температуре $t = -1.00^\circ\text{C}$?

6^{0.60} Известно, что кристаллики льда начинают разрушаться, если вдоль какого-либо направления кристалла приложить силу, создающую давление $P > P_{cr} \approx 1000\text{атм}$. Поэтому снег в морозную погоду хрустит при ходьбе. Оцените максимальную температуру воздуха t_{max} , при которой сне все еще хрустит при ходьбе.

7^{1.00} В сосуде находится один моль насыщенного пара при температуре $t_b = 100^\circ\text{C}$. Пар нагревается и одновременно меняется его объем так, что он все время остается насыщенным. Найдите молярную теплоемкость пара в таком процессе.

Пограничное кипение

Пограничное кипение - это кипение на границе раздела двух несмешивающихся жидкостей. Температура пограничного кипения может существенно отличаться от температур объёмного кипения каждой из жидкостей.

Тетрахлорметан или четырёххлористый водород представляет собой тяжёлую (плотность $\rho = 1.60/3$) прозрачную жидкость с молярной массой $\mu = 153.8/$. При нормальном атмосферном давлении тетрахлорметан кипит при температуре $t = 76.65^\circ\text{C}$, при этом он практически не растворяется в воде. Сосуд объемом $V = 100$ наполовину наполняют тетрахлорметаном, а поверх заливают такое же (по объёму) количество воды. При этом образуется четкая граница вода-тетрахлорметан. При равномерном нагревании сосуда на водяной бане кипение на границе раздела жидкостей начинается при температуре $t^* = 66.0^\circ\text{C}$, что значительно ниже температуры объёмного кипения каждой из компонент в отдельности.

8^{1.20} Рассчитайте по этим данным удельную теплоту r испарения тетрахлорметана, если известно, что давление насыщенных паров воды при температуре пограничного кипения $P_w(t^*) = 196\text{мм. рт. ст.}$

9^{1.00} Найдите массу остающейся в сосуде жидкости к моменту полного выкипания другой жидкости при таком пограничном кипении.

Рассмотрим ещё одну пару несмешивающихся жидкостей, воду и фторкетон. Жидкость фторкетон, иногда называемая «сухой водой», используется при тушении пожаров в библиотеках, музеях, офисах, поскольку не смачивает бумагу. Это тяжелая (плотность $\rho = 1.72/3$) прозрачная жидкость с молярной массой $\mu = 316/$, которая в воде практически не растворяется. Температура кипения фторкетона при атмосферном давлении $t_f = 49.2^\circ\text{C}$, удельная теплота парообразования $r = 95.0/$. Если поверх фторкетона в сосуд налить воду, то также образуется чёткая граница вода-фторкетон.

10^{2.20} Оцените температуру t_x закипания жидкостей на границе вода-фторкетон, если известно давление насыщенных паров воды при температуре объёмного кипения фторкетона $P_w(t_f) = 89.0\text{мм. рт. ст.}$