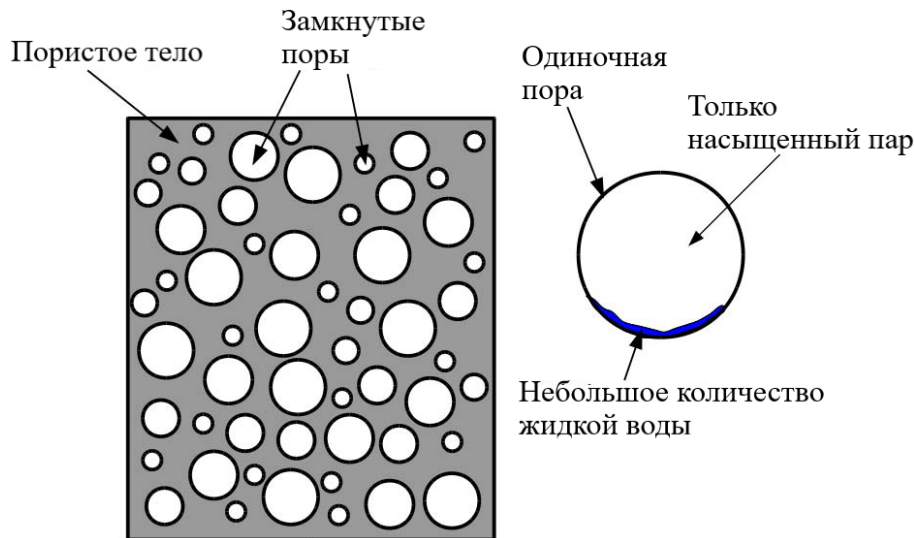


# Road to IPhO

## Теплоемкость влажных пористых тел (8 баллов)

Рассмотрим твердое тело, которое содержит только замкнутые поры с небольшим количеством воды в них. Объемом воды можно пренебречь по сравнению с объемом поры. Вода находится в равновесии с паром. Считайте, что пора не содержит других газов. Также можно пренебречь тепловым расширением пор.



### Часть А. Теплоемкость поры (5.5 балла)

Для начала рассмотрим лишь одну пору. Начальная масса жидкости равна  $m_{W0}$ , объем поры  $V$ , давление насыщенного пара  $p_0$ , температура  $T_0$ . Молярная масса воды  $\mu$ , удельная теплоемкость –  $c_W$ , удельная теплота парообразования –  $L$ . Молярная теплоемкость пара при постоянном объеме равна  $3R$ . Считайте, что удельная теплоемкость воды, удельная теплота парообразования и молярная теплоемкость пара не зависят от температуры и давления.

**A1** Найдите начальную массу пара  $m_{S0}$  в поре. Ответ выразите через  $\mu$ ,  $p_0$ ,  $V$  и  $T_0$ . **0.1**

При нагреве часть жидкости испаряется и переходит в пар. При этом давление насыщенных паров  $p$  зависит от температуры  $T$ . Зависимостью давления насыщенных паров от кривизны поверхности можно пренебречь.

**A2** Определите давление насыщенных паров  $p$  при температуре  $T$ . Ответ выразите через  $p_0$ ,  $\mu$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $T_0$  и  $T$ . **0.5**

**A3** Как массы пара  $m_S(T)$  и жидкости  $m_W(T)$  зависят от температуры? Ответ выразите через  $m_{W0}$ ,  $p_0$ ,  $\mu$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $V$ ,  $T_0$  и  $T$ . **0.4**

При некоторой температуре  $T$  масса пара равна  $m_S(T)$ . Температура поры увеличивается от  $T$  до  $T + \Delta T$ .

**A4** Считая изменение температуры малым, найдите изменение массы пара  $\Delta m_S(T, \Delta T)$ . Ответ выразите через  $m_S(T)$ ,  $\mu$ ,  $L$ ,  $R$ ,  $T$  и  $\Delta T$ . **0.5**

**Примечание:** воспользуйтесь приближениями  $e^x \approx 1 + x$  и  $(1 + x)^\alpha \approx 1 + \alpha x$  при  $x \ll 1$ .

**A5** Считая, что вода не испаряется полностью, определите теплоёмкость поры  $C_P$  при температуре  $T$ . Ответ выразите через  $m_S(T)$ ,  $\mu$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $c_W$ ,  $m_{W0}$ ,  $m_{S0}$  и  $T$ . **2.0**

# Road to IPhO

При температуре  $T_0 = 3.0 \cdot 10^2$  К давление насыщенных паров  $p_0 = 3.5$  кПа и вода занимает  $\delta = 0.3\%$  объема поры. Молярная масса воды  $\mu = 18 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, плотность  $\rho_W = 9.5 \cdot 10^2$  кг/м<sup>3</sup>, удельная теплоемкость  $c_W = 4.2 \cdot 10^3$  Дж/(кг · К) и удельная теплота парообразования  $L = 2.3 \cdot 10^6$  Дж/кг. Универсальная газовая постоянная  $R = 8.3$  Дж/(К · моль). Считайте, что плотность воды не зависит от температуры и давления.

**A6** Найдите значение температуры  $T_1$ , при которой вода полностью испарится.

**0.5**

Количество теплоты, подводимое к поре, используется для нагревания воды, нагревания водяного пара и испарения воды. Обозначим отношение полной теплоёмкости поры  $C_P$  к её объёму  $V$  за  $c_V$ , а компоненты данной величины, обусловленные нагреванием воды, нагреванием пара и испарением воды за  $c_{V1}$ ,  $c_{V2}$  и  $c_{V3}$  соответственно.

**A7** Найдите значения  $c_{V1}$ ,  $c_{V2}$  и  $c_{V3}$  при температурах  $T_0$ ,  $T \rightarrow T_1$  и  $(T_0 + T_1)/2$ .  
Укажите два ведущих слагаемых среди  $c_{V1}$ ,  $c_{V2}$  и  $c_{V3}$  для каждой температуры.  
В качестве ответа обведите нужные величины в листах ответов.

**1.2**

Определим удельную теплоемкость поры как отношение теплоемкости поры к массе ее содержимого:

$$c_P = \frac{C_P}{m_W + m_S}.$$

**A8** Найдите значения удельной теплоемкости поры при  $T = T_0$ ,  $T \rightarrow T_1$  и  $T > T_1$ .

**0.3**

## Часть В. Теплоемкость пористого тела (2.5 балла)

Рассмотрим тело, пористость которого (отношение объема пор к объему всего тела) равна  $\xi = 2/3$ . Если бы тело не содержало пор, его плотность была бы равна  $\rho_S = 6.0 \cdot 10^2$  кг/м<sup>3</sup>, а удельная теплоемкость –  $C_S = 4.0 \cdot 10^2$  Дж/(кг · К).

Начальные условия для содержимого пор те же, что и в части А:  $\delta = 0.30\%$ ,  $T_0 = 3.0 \cdot 10^2$  К,  $p_0 = 3.5$  кПа.

**B1** Определите удельную теплоемкость пористого тела  $c(T)$ .  
Ответ выразите через  $c_P(T)$ ,  $C_S$ ,  $\rho_S$ ,  $\rho_W$ ,  $\xi$ ,  $\delta$ ,  $p_0$ ,  $R$ ,  $\mu$  и  $T_0$ .

**1.2**

**B2** Найдите значения теплоемкости пористого тела при  $T = T_0$ ,  $T \rightarrow T_1$  и  $T > T_1$ .

**0.3**

**B3** Постройте график зависимости удельной теплоемкости от температуры на промежутке  $T \in (T_0, T_2 > T_1)$ .  
Укажите на графике все характерные значения.

**1.0**