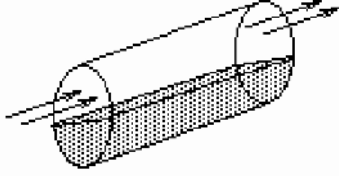


Условие

11-2. Цилиндрическая горизонтальная трубка радиусом $r = 1,0$ см наполнена водой. Через трубку постоянно прокачивают воздух. Температура воздуха и воды в трубке равна $t = 20^\circ\text{C}$, влажность воздуха, поступающего в трубку, равна $\varphi = 60\%$. Известно, что при данной температуре $\eta = 4,0\%$ молекул водяного пара, попадающих на поверхность воды, задерживаются ею. Оцените время, за которое вся вода в трубке испарится. Давление насыщенных паров воды при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ равно $P_0 = 2,3$ кПа.



Решение

11-2. Процесс испарения заключается в том, что часть молекул жидкости вылетает из ее поверхности. Непосредственно подсчитать количество таких молекул довольно трудно. Однако можно найти количество молекул, попадающих из пара в жидкость. Если жидкость и пар находятся в равновесии (а такой пар называется насыщенным), то количество молекул, покидающих поверхность жидкости, в среднем равно количеству молекул, попадающих внутрь жидкости. Так как температура и парциальное давление насыщенного пара известны, то можно найти число молекул, попадающих на единицу площади поверхности в единицу времени. Действительно, число ударов молекул газа о площадь S поверхности за время Δt равно

$$N_0 = \frac{1}{4} n v_{\text{ср}} S \Delta t, \quad (1)$$

где n — концентрация молекул газа, $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость молекул. Из уравнения $P = nkT$ можно получить $n = \frac{P}{kT}$, а средняя скорость $v_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \frac{kT}{m}}$.

Из общего числа молекул, падающих на поверхность, только $\eta = 0,04$ задерживается ею, поэтому число молекул, попадающих внутрь жидкости, а следовательно, вылетающих из нее, равно

$$N_1 = \eta N_0 = \frac{\eta P_0 S \Delta t}{\sqrt{2\pi k T m}}. \quad (2)$$

Так как, в данном случае, над жидкостью пар не насыщенный, то концентрация молекул пара меньше, и, по определению влажности φ , $n = \varphi n_0$, где n_0 — концентрация молекул насыщенного пара. Тогда число молекул, попадающих внутрь жидкости, равно

$$N_2 = \frac{\eta \varphi P_0}{\sqrt{2\pi k T m}} S \Delta t. \quad (3)$$

Таким образом, за время Δt жидкость теряет $N = N_1 - N_2$ молекул

$$N = \frac{\eta(1 - \varphi) P_0}{\sqrt{2\pi k T m}} S \Delta t. \quad (4)$$

Найдем на сколько изменяется масса жидкости

$$\Delta M = m N = \eta(1 - \varphi) P_0 S \Delta t \sqrt{\frac{m}{2\pi k T}},$$

а объем, соответственно, на

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} = \frac{\eta(1-\varphi)P_0}{\rho} S \Delta t \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}.$$

Так как площадь поверхности изменяется по мере высыхания, таким образом величина ΔV не остается постоянной. Однако скорость изменения высоты уровня жидкости в трубке $\Delta h = \frac{\Delta V}{S}$ постоянна. Полное изменение высоты равно радиусу трубки r . Поэтому

$$r = \frac{\eta(1-\varphi)P_0}{\rho} \Delta t \sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}},$$

где μ — молярная масса воды, R — универсальная газовая постоянная. Из этого уравнения получим время испарения:

$$\Delta t = \frac{r\rho}{\eta(1-\varphi)P_0} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \approx 250\text{с}.$$

Отметим, что при решении этой задачи можно было использовать формулу для среднего числа ударов молекул о поверхность, приведенную в школьном учебнике (с коэффициентом $1/6$) и вместо средней скорости пользоваться среднеквадратичной (также используемой в школьном курсе физики) — это не скажется существенно на оценке времени испарения.