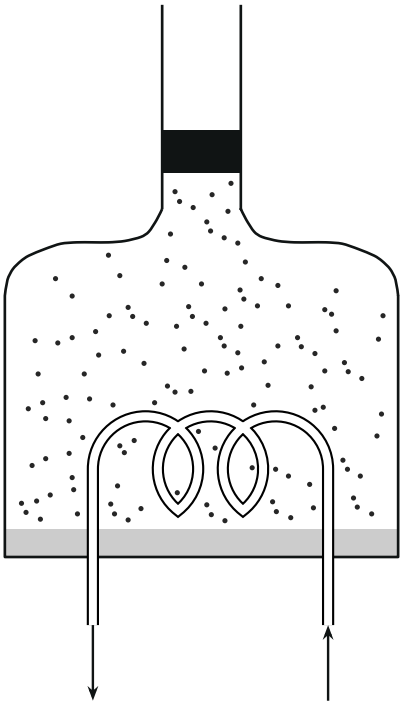
Измерение удельной теплоты конденсации

Задача 4. [Физтех 2025/26, 9 класс, вариант 09-01, задача 4] Ученики опытным путём определяют удельную теплоту конденсации воды. Описание эксперимента: в крышку теплоизолированного сосуда впаяна длинная трубка с площадью поперечного сечения $S = 10$ см^2, закрытая лёгким поршнем (см. рис.). Сосуд заполнен водой и её насыщенным паром при температуре $t = 100°$C. Внешнее давление равно давлению насыщенного пара в сосуде. Через сосуд проходит змеевик с площадью поперечного сечения $S_1 = 0{,}1$ см^2, по которому пропускается холодная вода со скоростью $v = 10$ см/с. Температура воды на входе змеевика $t_1 = 10°$C, на выходе $t_2 = 90°$C. Водяные пары конденсируются и поршень в гладкой трубке опускается со скоростью $U = 24$ см/с.

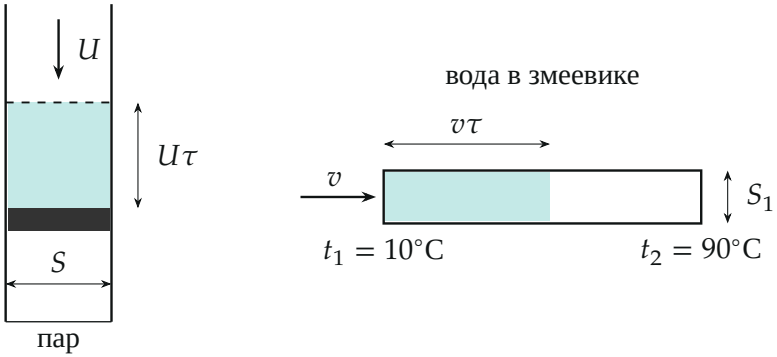


1. Найдите по этим данным удельную теплоту L конденсации воды. Удельная теплоёмкость воды $c = 4200$ Дж/(кг · °C), отношение

плотности ρ воды к плотности $\rho_{\text{нас}}$ насыщенного водяного пара при температуре $t = 100°\text{C}$ равно $\rho/\rho_{\text{нас}} = 1600$.

▲ **Решение.** **Что происходит.** Холодная вода в змеевике забирает теплоту у пара: пар конденсируется на змеевике и отдаёт ему удельную теплоту конденсации. Сосуд теплоизолирован, поэтому вся теплота, выделившаяся при конденсации, уходит воде змеевика и ничему больше. Режим установившийся: v, U и температуры на входе и выходе не меняются. Значит, за любой промежуток времени τ количество теплоты, отданное паром, равно количеству теплоты, полученному водой змеевика. Температура пара и воды в сосуде остаётся 100°C: давление под лёгким поршнем всё время равно внешнему, а каждому давлению насыщенного пара соответствует одна температура. Поэтому образовавшаяся вода не охлаждается ниже 100°C и теплоты на себя не забирает.

Обозначения. τ — произвольный промежуток времени; m_1 — масса воды, прошедшей через змеевик за τ; m_2 — масса пара, сконденсировавшегося за τ; Q — теплота, переданная от пара воде за τ.



За время τ поршень опускается на $U\tau$: исчезает объём пара $SU\tau$. За то же время через змеевик проходит столб воды длиной $v\tau$.

1. Тепло, полученное водой змеевика. За время τ через сечение змеевика проходит столб воды длиной $v\tau$, объёмом $S_1 v\tau$ и массой $m_1 = \rho S_1 v\tau$. Вода нагревается от t_1 до t_2:

$$Q = c\,m_1(t_2 - t_1) = c\rho S_1 v\tau\,(t_2 - t_1).$$

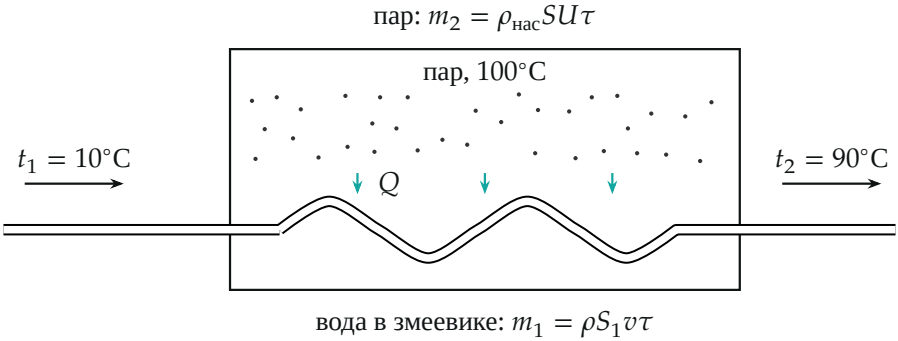
2. Тепло, отданное паром. Поршень опускается на $U\tau$, и под ним исчезает объём пара $\Delta V = SU\tau$ (пар превратился в воду, объём которой в 1600 раз меньше и пренебрежимо мал, поправка 0,06 %). Масса сконденсировавшегося пара $m_2 = \rho_{\text{нас}}\Delta V = \rho_{\text{нас}} SU\tau$. При конденсации при постоянной температуре пар отдаёт $Q = Lm_2$:

$$Q = L\rho_{\text{нас}} SU\tau.$$

3. Уравнение теплового баланса. Приравниваем выражения для Q из пунктов 1 и 2. Время τ сокращается:

$$L\rho_{\text{нас}} SU = c\rho S_1 v\,(t_2 - t_1) \quad \Rightarrow \quad L = \frac{\rho}{\rho_{\text{нас}}} \cdot \frac{c\,S_1 v\,(t_2 - t_1)}{SU}.$$

Площади и скорости входят отношениями S_1/S и v/U, поэтому единицы можно не переводить в СИ.



Вся теплота конденсации передаётся воде змеевика: $Lm_2 = c\,m_1\,(t_2 - t_1)$.

4. Числа. Отношения: $S_1/S = 0{,}1/10 = 0{,}01$, $v/U = 10/24 = 5/12$, $t_2 - t_1 = 80$°C:

$$L = 1600 \cdot 4200 \cdot 0{,}01 \cdot \frac{5}{12} \cdot 80 \text{ Дж/кг} = 2{,}24 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}.$$

Те же числа в СИ, за $\tau = 1$ с: $m_1 = 1000 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}1$ кг $= 1$ г, $Q = 10^{-3} \cdot 4200 \cdot 80$ Дж $= 336$ Дж; $\rho_{\text{нас}} = 1000/1600 = 0{,}625$ кг/м^3, $m_2 = 0{,}625 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}24$ кг $= 0{,}15$ г; $L = 336/(1{,}5 \cdot 10^{-4}) = 2{,}24 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Обратите внимание. (1) Массу пара считаем через плотность пара $\rho_{\text{нас}}$, а не воды ρ, иначе ошибка в 1600 раз. (2) Вода змеевика нагревается на $t_2 - t_1 = 80°\text{C}$ (не на 90 и не на $100 - 10$). (3) Теплоёмкость конденсата не нужна: он остаётся при 100°C.

Проверка. Размерность: $c\,\Delta t$ — Дж/кг, остальные множители безразмерны. Табличная величина $2{,}26 \cdot 10^6$ Дж/кг, полученная $2{,}24 \cdot 10^6$ отличается меньше чем на 1 %. Знак и предел: чем быстрее опускается поршень (больше U) при той же теплоте, ушедшей в воду, тем больше пара сконденсировалось и тем меньшая теплота приходится на килограмм — формула даёт $L \propto 1/U$. Смысл: по скорости поршня и по нагреву воды можно измерить L, не меряя саму теплоту.

Ответ. 1) $L = \dfrac{\rho}{\rho_{\text{нас}}} \dfrac{c\,S_1 v\,(t_2 - t_1)}{SU} \approx 2{,}24 \cdot 10^6$ Дж/кг.