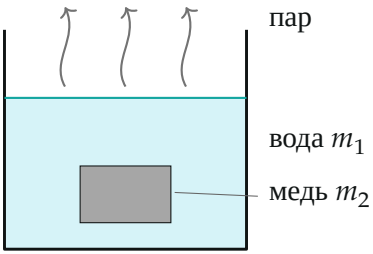
Теплообмен с парообразованием

Задача 4. [ВсОШ 2025/26, школьный этап, 10 класс, задача 4] «Теплообмен с парообразованием».

В теплоизолированный сосуд, теплоёмкостью которого можно пренебречь, налито $m_1 = 0{,}50$ кг воды при температуре $T_1 = 20\,^\circ\text{C}$. В воду полностью погрузили медный брусок массой $m_2 = 1{,}0$ кг, нагретый до температуры $T_2 = 700\,^\circ\text{C}$. Вода быстро нагрелась до температуры кипения, после чего частично испарилась, а образовавшийся пар покинул сосуд. Удельные теплоёмкости: воды — $c_1 = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°C), меди — $c_2 = 390$ Дж/(кг·°C); удельная теплота парообразования воды составляет $L = 2{,}3 \cdot 10^6$ Дж/кг.

1. Рассчитайте количество теплоты, переданное медным бруском воде. Ответ выразите в кДж, округлив до целого числа.
2. Какая доля теплоты, отданной медным бруском, пошла на парообразование воды? Ответ выразите в процентах, округлив до десятых долей.
3. Найдите массу образовавшегося пара. Ответ выразите в граммах, округлив до десятых долей.



Поясняющий рисунок. Горячий медный брусок в воде; часть воды выкипает, пар уходит из сосуда

▲ **Решение. Что происходит.** Это задача на уравнение теплового баланса с фазовым переходом. Сосуд теплоизолирован, его теплоёмкость не учитываем, поэтому вся теплота, которую отдаёт медь, получает вода. Вода сначала нагревается до 100 °C, потом кипит при постоянной температуре 100 °C. Медь остывает, пока не сравняется с водой, то есть до

100 °C: остыть ниже она не может, пока в сосуде остаётся кипящая вода (а вода остаётся — проверим в п. 3).

Обозначения. $t_к = 100$ °C — температура кипения; Q — теплота, отданная медью; $Q_н$ — теплота на нагрев воды до кипения; $Q_п$ — теплота на парообразование; $m_п$ — масса пара.

1. Теплота, отданная медью. Медь остывает от T_2 до $t_к$ без фазовых переходов:

$$Q = c_2 m_2 (T_2 - t_к) = 390 \cdot 1{,}0 \cdot (700 - 100)\ \text{Дж} = 234\,000\ \text{Дж} = 234\ \text{кДж}.$$

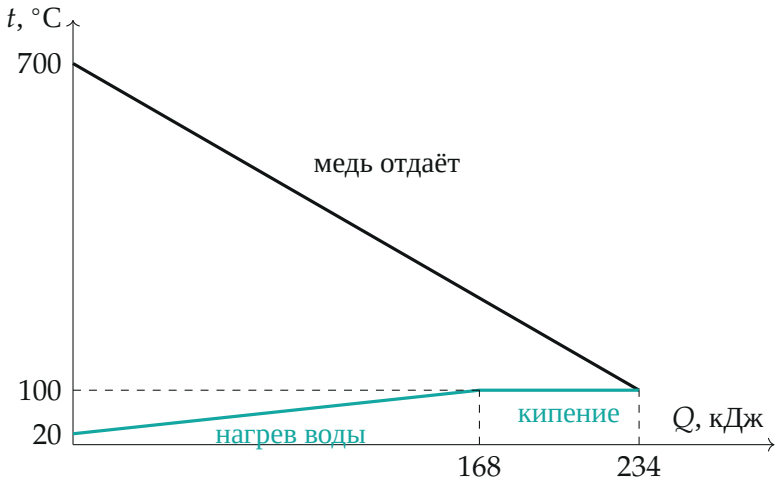


Рис. 1. Температура меди (чёрная) и воды (бирюзовая) в зависимости от переданной теплоты Q. Горизонтальный участок — кипение

2. Теплота на нагрев воды до кипения:

$$Q_н = c_1 m_1 (t_к - T_1) = 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 0{,}50 \cdot 80\ \text{Дж} = 168\,000\ \text{Дж} = 168\ \text{кДж}.$$

$Q_н < Q$ — вода действительно закипает. Остальное идёт на парообразование — уравнение теплового баланса $Q = Q_н + Q_п$:

$$Q_п = Q - Q_н = 234 - 168 = 66\ \text{кДж}.$$

Доля теплоты меди, пошедшая на парообразование:

$$\eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q} = \frac{66}{234} = 0{,}282 = 28{,}2\,\%.$$

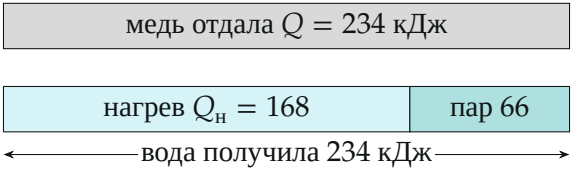


Рис. 2. Тепловой баланс: вся теплота меди делится между нагревом воды и её испарением

3. Масса пара. При кипении теплота $Q_{\text{п}}$ превращает в пар массу

$$m_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{п}}}{L} = \frac{66\,000}{2{,}3 \cdot 10^6}\ \text{кг} = 0{,}0287\ \text{кг} = 28{,}7\ \text{г}.$$

Это меньше $m_1 = 500$ г: выкипает лишь малая часть воды, и в сосуде остаётся вода при 100 °C. Значит, медь действительно остановилась на 100 °C, предположение п. 1 верно.

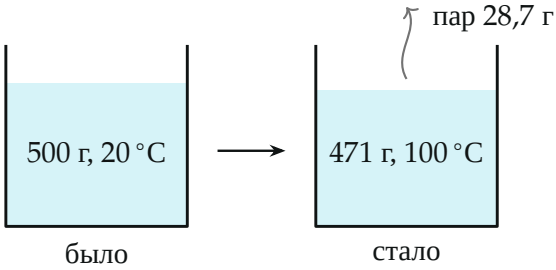


Рис. 3. В сосуде остаётся почти вся вода при температуре кипения; уходит 28,7 г пара

Обратите внимание. Медь отдаёт теплоту, остывая только до 100 °C, а не до какой-то «общей» температуры ниже: пока вода кипит, её температура не растёт и не падает, и тело в ней не может стать холоднее 100 °C.

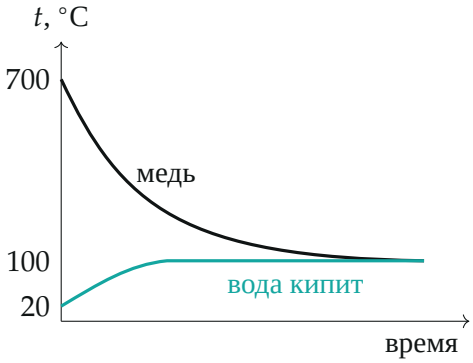


Рис. 4. Качественная картина во времени: обе температуры подходят к 100 °C, дальше вода кипит, пока медь не сравняется с ней

Проверка. Размерности: Дж/(кг · °C) · кг · °C = Дж; Дж/(Дж/кг) = кг. Знак: $Q_{\text{п}} > 0$, то есть меди хватило довести воду до кипения. Если бы медь была горячее, скажем $T_2 = 1000\,^\circ\text{C}$, пара стало бы больше: $Q_{\text{п}}$ растёт с T_2 — правильная зависимость.

Смысл: из 234 кДж меди почти три четверти уходит на нагрев воды, и лишь 28 % — на испарение, потому что удельная теплота парообразования очень велика.

Ответ. 1) $Q = c_2 m_2 (T_2 - 100\,^\circ\text{C}) = 234$ кДж; 2) $\eta \approx 28{,}2\,\%$; 3) $m_{\text{п}} \approx 28{,}7$ г.