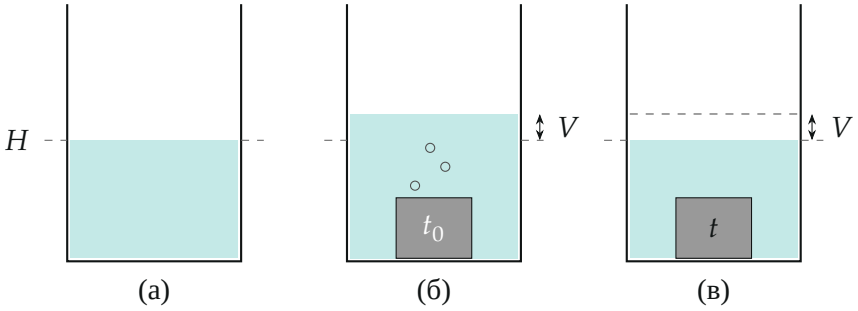
Раскалённое тело в воде

Задача 2. [Росатом 2025/26, отборочный этап, 9 класс, задача 2] «Раскалённое тело в воде».

В сосуд с водой, имеющей температуру $t = 100\,^\circ\text{C}$, положили раскалённое стальное тело. После установления равновесия оказалось, что вода полностью покрывает тело, а её уровень в сосуде не изменился. Найти начальную температуру тела. Плотность воды $\rho_0 = 1000$ кг/м^3, плотность стали $\rho = 7800$ кг/м^3, удельная теплоёмкость стали $c = 460$ Дж/(кг·град), удельная теплота парообразования воды $r = 2{,}3 \cdot 10^6$ Дж/кг. Потерями тепла в окружающее пространство и теплоёмкостью сосуда пренебречь.

▲ **Решение. Что происходит.** Вода уже при $100\,^\circ\text{C}$, то есть кипит: любое лишнее тепло идёт не на нагрев воды, а на её испарение. Тело остывает до $100\,^\circ\text{C}$, и часть воды превращается в пар. Главная идея: уровень не изменился, значит, объём ушедшей воды равен объёму тела. Тогда масса испарившейся воды выражается через массу тела, и в уравнении теплового баланса масса сокращается.

Обозначения. m — масса тела, $V = m/\rho$ — его объём, m_1 — масса испарившейся воды, t_0 — искомая начальная температура тела. Конечная температура тела и воды — $t = 100\,^\circ\text{C}$: вода осталась, значит, всё ещё кипит.

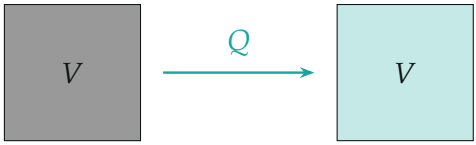


(а) вода до погружения, уровень H; (б) тело погружено, уровень выше на V, вода кипит; (в) равновесие: уровень снова H — испарилась вода объёмом V

1. Сколько воды испарилось. Сначала тело вытеснило объём V воды, и уровень поднялся бы на V/S (S — площадь сосуда). В конце уровень такой же, как до погружения, при том что тело всё ещё внутри и вытесняет объём V. Значит, ровно объём V воды ушёл в пар. Масса этой воды

$$m_1 = \rho_0 V = \rho_0 \frac{m}{\rho}.$$

Обратите внимание: речь об объёме воды в жидком виде — именно он определяет уровень; плотность пара роли не играет.



сталь: $m = \rho V$ вода: $m_1 = \rho_0 V$

Объёмы равны: тело стали и испарившаяся вода занимают по V, но массы разные ($m_1 < m$, так как $\rho_0 < \rho$). Тепло Q идёт от тела к воде

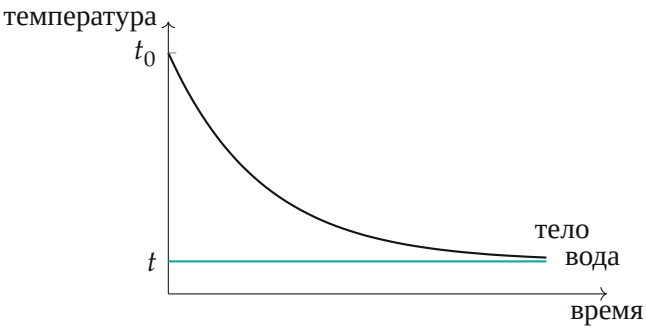
2. Уравнение теплового баланса. Тело остывает от t_0 до $t = 100\,^\circ\text{C}$ и отдаёт $Q = cm\,(t_0 - t)$. Всё это тепло уходит на превращение воды массой m_1 в пар при $100\,^\circ\text{C}$ (теплоёмкость сосуда и потери по условию нулевые; вода нагреваться не должна — она уже при температуре кипения):

$$cm\,(t_0 - t) = r\,m_1 = r\,\frac{\rho_0}{\rho}\,m.$$

Масса тела m сократилась — она нам и не дана.

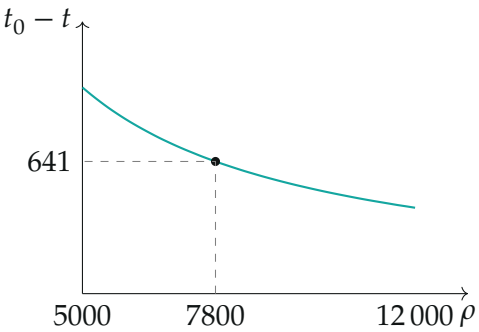
3. Искомая температура.

$$t_0 = t + \frac{r\,\rho_0}{c\,\rho} = 100\,^\circ\text{C} + \frac{2{,}3 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{460 \cdot 7800}\,^\circ\text{C} \approx 100\,^\circ\text{C} + 641\,^\circ\text{C} \approx 741\,^\circ\text{C}.$$



Температуры во времени: вода остаётся при $t = 100\,^\circ C$, пока кипит, тело остывает от $t_0 \approx 741\,^\circ C$ до t

4. Второй способ — на единицу объёма. Сравним тепло на один кубометр. Тело, остыв на Δt, отдаёт $c\rho V\Delta t$, где $c\rho \approx 3{,}6 \cdot 10^6$ Дж/(м^3·К) — «объёмная теплоёмкость» стали. Испарение объёма V воды забирает $r\rho_0 V$, где $r\rho_0 = 2{,}3 \cdot 10^9$ Дж/м^3. Приравнивая при одном и том же V: $c\rho\,\Delta t = r\rho_0$, откуда $\Delta t = \dfrac{r\rho_0}{c\rho} \approx 641\,^\circ$C — то же самое.



Перегрев $t_0 - t = \dfrac{r\rho_0}{c\rho}$ как функция плотности материала (для стали $641\,^\circ C$): чем плотнее материал, тем меньше нужен перегрев

Проверка. Размерность: $\dfrac{r\rho_0}{c\rho} = \dfrac{\text{Дж/кг} \cdot \text{кг/м}^3}{\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)} \cdot \text{кг/м}^3} = \text{К}$ — верно. Предел: при $\rho_0/\rho \to 0$ испаряется ничтожно мало воды и $t_0 \to t$. Порядок разумен: 741 °C — ниже температуры плавления стали.

Ответ. $t_0 = t + \dfrac{r\rho_0}{c\rho} \approx 741\,^\circ$C.