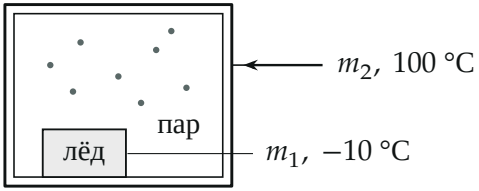
Пар впускают к льду

Задача 3. [ИОШ 2025/26, 10 класс, задача 3] В герметичном теплоизолированном сосуде содержится $m_1 = 10$ г льда при температуре $t_1 = -10$ °C. В сосуд впускают массу $m_2 = 5$ г водяного пара при температуре $t_2 = 100$ °C. Будет ли в сосуде после установления равновесия находиться жидкая вода, и если да, то какова её масса и температура? Удельная теплоёмкость льда $c_л = 2{,}1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), удельная теплоёмкость воды $c_в = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), удельная теплота плавления льда $\lambda = 3{,}3 \cdot 10^5$ Дж/кг, удельная теплота парообразования воды $r = 2{,}3 \cdot 10^6$ Дж/кг, температура плавления льда $t_{пл} = 0$ °C, температура кипения воды $t_к = 100$ °C.



Поясняющий рисунок: в закрытый теплоизолированный сосуд со льдом впускают пар.

▲ **Решение. Что происходит.** Это задача на тепловой баланс с несколькими фазовыми переходами, и заранее неизвестно, чем всё кончится: льдом с водой при 0 °C, водой при промежуточной температуре или водой с паром при 100 °C. Поэтому сначала сравниваем количества теплоты «по этапам»: сколько может отдать пар и сколько нужно льду на каждый следующий шаг. Где запас кончился — там и конечное состояние.

Обозначения. Q_1 — теплота при полной конденсации пара; Q_2, Q_3 и Q_4 — теплота на нагрев льда до 0 °C, на его плавление и на нагрев получившейся воды до 100 °C; m_x — масса пара, которая сконденсировалась.

1. Что может отдать пар. Пар уже при 100 °C, остывать как пар ему некуда. При конденсации (переходе пар → вода при той же температуре)

выделяется

$$Q_1 = rm_2 = 2{,}3 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 1{,}15 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

Сконденсировавшаяся вода могла бы ещё остывать, но до этого дойдёт, только если льду мало Q_1.

2. Что нужно льду, шаг за шагом.

Нагреть лёд до 0 °C:

$$Q_2 = c_л m_1 (t_{пл} - t_1) = 2{,}1 \cdot 10^3 \cdot 10^{-2} \cdot 10 = 210 \text{ Дж} < Q_1.$$

Расплавить:

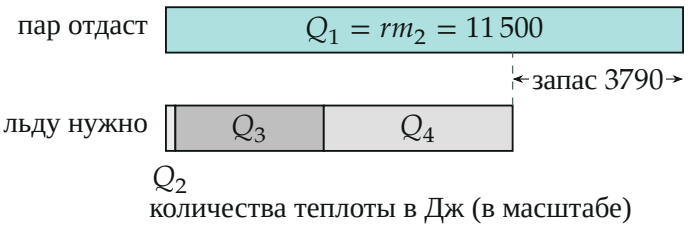
$$Q_3 = \lambda m_1 = 3{,}3 \cdot 10^5 \cdot 10^{-2} = 3{,}3 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \qquad Q_2 + Q_3 = 3510 \text{ Дж} < Q_1.$$

Нагреть воду из льда до 100 °C:

$$Q_4 = c_в m_1 (t_к - t_{пл}) = 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 4{,}2 \cdot 10^3 \text{ Дж};$$

$$Q_2 + Q_3 + Q_4 = 7710 \text{ Дж} < Q_1 = 11\,500 \text{ Дж}.$$

Даже после того как вся вода из льда нагрелась до кипения, у пара остаётся запас. Значит, конечная температура — 100 °C, а сконденсируется только часть пара.



Сравнение «бюджетов»: пар при полной конденсации отдал бы больше, чем нужно льду, чтобы растаять и нагреться до кипения. Лишние 3790 Дж — это несконденсировавшийся пар.

3. Сколько пара сконденсируется. Уравнение теплового баланса для конечного состояния «вода и пар при 100 °C»: теплота, выделенная

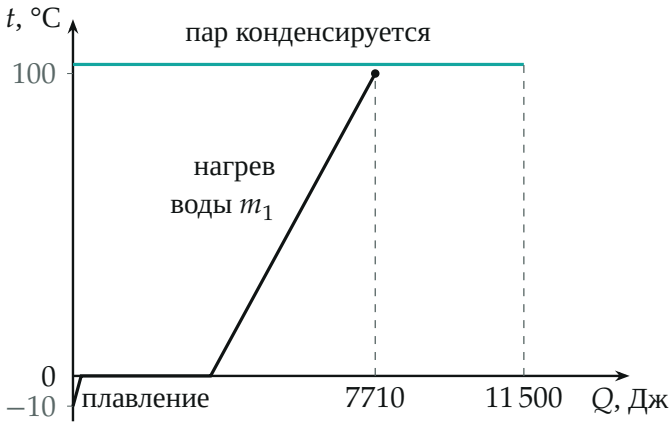
при конденсации массы m_x, равна теплоте, полученной льдом и водой из него:

$$rm_x = Q_2 + Q_3 + Q_4 = c_л m_1 (t_{пл} - t_1) + \lambda m_1 + c_в m_1 (t_к - t_{пл}),$$

$$m_x = \frac{c_л m_1 (t_{пл} - t_1) + \lambda m_1 + c_в m_1 (t_к - t_{пл})}{r},$$

$$m_x = \frac{7710}{2{,}3 \cdot 10^6} \text{ кг} \approx 3{,}35 \text{ г}.$$

Знак: $m_x < m_2 = 5$ г — сконденсировалась только часть пара, как и ожидали.

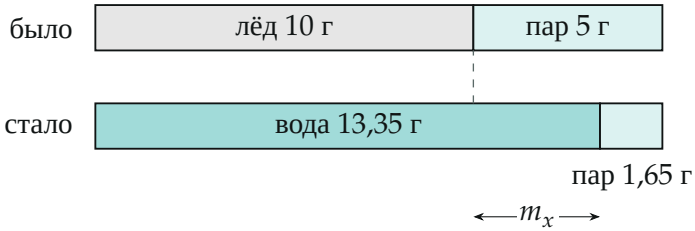


Температура в зависимости от полученной (льдом) и отданной (паром) теплоты. Линия льда доходит до 100 °C при 7710 Дж — раньше, чем пар отдал бы всё (11 500 Дж). Дальше обмен прекращается: всё при 100 °C.

4. Состав в конце. Воды — весь растаявший лёд плюс сконденсированный пар:

$$m_в = m_1 + m_x \approx 10 + 3{,}35 = 13{,}35 \text{ г} \approx 13{,}4 \text{ г};$$

пара осталось $m_2 - m_x \approx 1{,}65$ г. Температура $t_к = 100$ °C.



Массы до и после (в масштабе): сконденсировалось $m_x \approx 3{,}35$ г пара; всё при 100 °C.

Обратите внимание. Нельзя сразу писать «лёд + пар → вода при t» и искать t: получилось бы $t > 100$ °C, что для жидкой воды в равновесии с паром невозможно. Сравнение этапов по теплоте сразу показывает, что конечная температура — температура кипения, а неизвестна масса m_x.

Проверка. Размерность: $\frac{cm\Delta t}{r}$ и $\frac{\lambda m}{r}$ — кг. Сохранение массы: $13{,}35 + 1{,}65 = 15$ г $= m_1 + m_2$. Второй способ (python): если бы весь пар сконденсировался и всё остыло до общей t, баланс $Q_2 + Q_3 + c_в m_1 t = r m_2 + c_в m_2 (100 - t)$ дал бы $t \approx 160$ °C > 100 °C — противоречие, конечная температура действительно 100 °C.

Ответ. Да, жидкая вода будет, при $t_к = 100$ °C, её масса

$$m_в = m_1 + \frac{c_л m_1 (t_{пл} - t_1) + \lambda m_1 + c_в m_1 (t_к - t_{пл})}{r} \approx 13{,}4 \text{ г};$$

кроме неё — около 1,65 г пара.

Смысл: теплота конденсации пара огромна — всего 5 г пара хватает, чтобы растопить вдвое больше льда и вскипятить получившуюся воду, и ещё треть пара остаётся.

Ответ. Да: в сосуде будет вода массой $m_1 + m_x \approx 13{,}4$ г (точнее 13,35 г) при $t_к = 100$ °C и около 1,65 г пара.