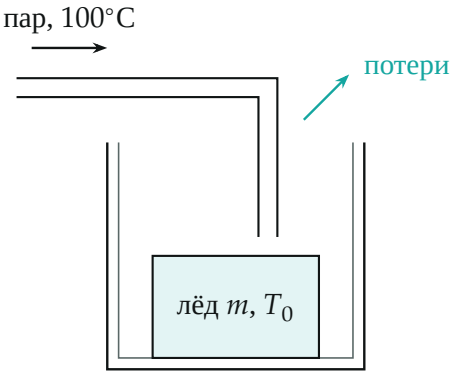
Пар в калориметре со льдом

Задача 2. [Курчатов 2025/26, 8 класс, задача 2] В ходе экспериментов в калориметр через металлическую трубку подают водяной пар при температуре 100°C. В каждом опыте наблюдения производятся после того, как температура смеси установится. Из-за нагрева трубки и деталей установки часть тепла, выделяющегося при конденсации и последующем охлаждении конденсата, рассеивается за пределы калориметра. Считайте, что одна и та же доля η этой энергии передаётся содержимому калориметра, а остальное теряется. Величина η одинакова во всех опытах.

Провели два опыта. В каждом из них в калориметре находится кусок льда массой $m = 1{,}20$ кг, имеющий неизвестную начальную температуру $T_0 < 0°\text{C}$. В первом опыте после прекращения подачи пара и наступления равновесия в калориметре остаётся только лёд с микроскопическими капельками воды на поверхности. Масса поступившего пара $M_1 = 24{,}0$ г. Во втором опыте после наступления равновесия растаяло ровно $\Delta m = 300$ г льда. Масса сконденсировавшегося пара $M_2 = 90{,}0$ г.

Найдите долю η передаваемой энергии и начальную температуру T_0 льда. Удельная теплоёмкость воды $c_\text{в} = 4200\ \dfrac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot°\text{C}}$, удельная теплоёмкость льда $c_\text{л} = 2100\ \dfrac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot°\text{C}}$, удельная теплота парообразования воды $r = 2{,}3\cdot10^6\ \dfrac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, удельная теплота плавления льда $\lambda = 3{,}3\cdot10^5\ \dfrac{\text{Дж}}{\text{кг}}$. Теплотой, связанной с появлением микроскопических капелек воды в первом опыте, пренебречь.



Поясняющий рисунок: пар по трубке приходит в калориметр со льдом; часть теплоты конденсации и остывания конденсата уходит через трубку наружу.

▲ **Решение. Что происходит.** Это задача на уравнение теплового баланса с фазовыми переходами. В обоих опытах в конце в калориметре есть и лёд, и вода (в первом — капельки), поэтому конечная температура в обоих равна 0°C. Неизвестных две, η и T_0; опытов тоже два. Главная идея: нагрев льда от T_0 до 0°C в обоих опытах одинаков, поэтому при вычитании уравнений T_0 уйдёт, и останется одно уравнение на η.

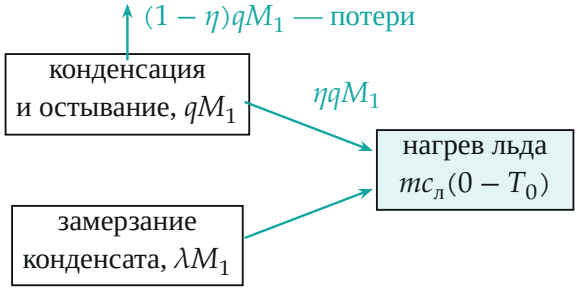
Обозначения. q — теплота, которую выделяет 1 кг пара при конденсации и остывании конденсата от 100 до 0°C; $Q_л = mc_л(0-T_0)$ — теплота на нагрев льда до 0°C (одна и та же в обоих опытах).

1. Сколько тепла отдаёт пар. Пар массой M конденсируется при 100°C и остывает водой до 0°C:

$$Q_{пар} = rM + c_в M \cdot 100°\text{C} = qM,$$

$$q = r + 100\,c_в = 2{,}3 \cdot 10^6 + 4{,}2 \cdot 10^5 = 2{,}72 \cdot 10^6\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Содержимое калориметра получает долю η: ηqM. Обратите внимание: доля η относится только к этим двум процессам. Дальнейшее замерзание конденсата в первом опыте идёт уже внутри калориметра, и вся теплота кристаллизации λM_1 остаётся в нём.



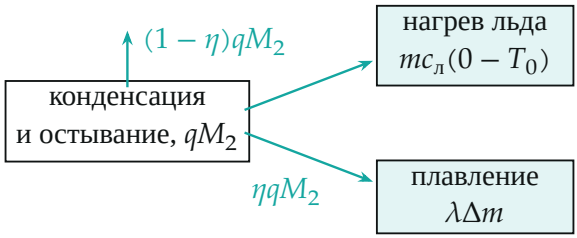
Опыт 1: куда идёт теплота. В конце — лёд при 0°C, конденсат тоже замёрз.

2. Уравнение теплового баланса для опыта 1. Система — лёд m и пришедший конденсат, от начала опыта до равновесия. Конденсат (вода при 0°C) замерзает и отдаёт λM_1; всё полученное идёт на нагрев льда до 0°C:

$$\eta qM_1 + \lambda M_1 = mc_л(0 - T_0). \qquad (1)$$

3. Уравнение теплового баланса для опыта 2. Теперь растаяло Δm льда, конденсат остаётся водой при 0°C. Полученная теплота идёт на нагрев всего льда до 0°C и на плавление Δm:

$$\eta qM_2 = mc_л(0 - T_0) + \lambda\Delta m. \qquad (2)$$



Опыт 2: та же теплота нагрева льда плюс плавление Δm; конденсат остаётся водой.

4. Доля η. Вычтем (1) из (2) — неизвестная $mc_л(0 - T_0)$ сократится:

$$\eta q(M_2 - M_1) - \lambda M_1 = \lambda\Delta m \quad \Rightarrow$$

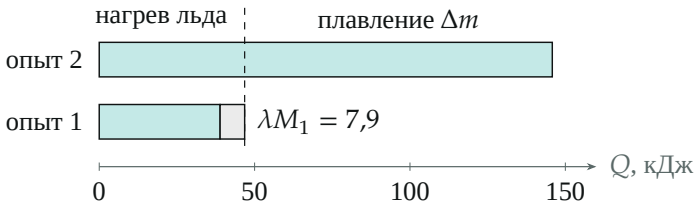
$$\eta = \frac{\lambda(\Delta m + M_1)}{q(M_2 - M_1)} = \frac{3{,}3 \cdot 10^5 \cdot 0{,}324}{2{,}72 \cdot 10^6 \cdot 0{,}066} \approx 0{,}596 \approx 0{,}60.$$

Смысл: лишние 66 г пара в опыте 2 (в долю η) растопили 300 г льда и ещё «не дали замёрзнуть» 24 г конденсата.

5. Температура T_0. Из (1):

$$T_0 = -\frac{(\eta q + \lambda)M_1}{mc_л} = $$

$$= -\frac{(0{,}596 \cdot 2{,}72 \cdot 10^6 + 3{,}3 \cdot 10^5) \cdot 0{,}024}{1{,}20 \cdot 2100} \approx -\frac{46\,800}{2520} \approx -18{,}6^\circ\text{C}.$$



Баланс в числах. Бирюза — теплота, пришедшая от пара (ηqM: 38,9 и 145,8 кДж), серый — замерзание конденсата в опыте 1. Левее пунктира в обоих опытах — одни и те же 46,8 кДж на нагрев льда.

Соберём ответ.

$$\eta = \frac{\lambda(\Delta m + M_1)}{(r + 100c_в)(M_2 - M_1)} \approx 0{,}60,$$

$$T_0 = -\frac{(\eta(r + 100c_в) + \lambda)M_1}{mc_л} \approx -19^\circ\text{C}.$$

Проверка. $0 < \eta < 1$, $T_0 < 0$ — как и должно быть. Подставим в (2): $\eta q M_2 \approx 145{,}8$ кДж, а $mc_л \cdot 18{,}6 + \lambda\Delta m \approx 46{,}8 + 99{,}0 = 145{,}8$ кДж — сходится. Если бы потерь не было ($\eta = 1$), то из 66 г лишнего пара получилось бы ≈ 180 кДж — хватило бы растопить больше 0,5 кг льда, а не 0,3 кг.

Ответ. $\eta = \dfrac{\lambda(\Delta m + M_1)}{(r + 100c_в)(M_2 - M_1)} \approx 0{,}60$; $T_0 \approx -18{,}6^\circ\text{C} \approx -19^\circ\text{C}$.