# Калориметр и нафталин

**Задача 4.** [Курчатов 2025/26, 9 класс, задача 4] Для определения характеристик тепловых процессов в лаборатории используют калориметр, в который на разных этапах помещают воду и образцы нафталина. Исследование проводится в три независимых этапа.

(A) В калориметр, содержащий $m_в = 200$ г воды при температуре $t_в = 20°C$, помещают образец твёрдого нафталина массой $m_н = 50$ г, нагретый до температуры плавления $t_{пл} = 79°C$. После установления теплового равновесия температура в системе составила $t_{см1} = 23°C$.

(B) Тот же образец нафталина полностью расплавляют, нагревают до температуры жидкой фазы $t_ж = 95°C$ и снова помещают в калориметр с начальными параметрами воды ($m_в = 200$ г при $t_в = 20°C$). Установившаяся температура составила $t_{см2} = 30{,}1°C$.

(C) В калориметр при начальных параметрах воды ($m_в = 200$ г при $t_в = 20°C$) помещают новый образец твёрдого нафталина массой $M = 100$ г, взятый при комнатной температуре $20°C$. В систему погружают электрический нагреватель мощностью $P = 100$ Вт с коэффициентом полезного действия $\eta = 84\%$ и наблюдают за содержимым калориметра.

Удельная теплоёмкость воды $c_в = 4200 \dfrac{Дж}{кг \cdot °C}$, удельные теплоёмкости нафталина в твёрдом и жидком состояниях $c_{н.т} = 1200 \dfrac{Дж}{кг \cdot °C}$ и $c_{н.ж} = 1700 \dfrac{Дж}{кг \cdot °C}$ соответственно.

1. Используя данные опытов A и B, найдите теплоёмкость калориметра $C_к$ и удельную теплоту плавления нафталина $\lambda_н$.
2. Найдите время $\tau$ работы нагревателя в минутах, необходимое для того, чтобы полностью расплавить образец нафталина и нагреть всё содержимое калориметра до конечной температуры $t_{кон} = 80°C$.




*Поясняющий рисунок. Во всех опытах в калориметре 200 г воды при 20°C. A — 50 г твёрдого нафталина при 79°C; B — те же 50 г жидкими при 95°C; C — 100 г твёрдого нафталина при 20°C и нагреватель.*

▲ **Решение.** **Что происходит.** Это задача на уравнение теплового баланса с фазовым переходом. В опытах A и B калориметр теплоизолирован: сколько теплоты отдал нафталин, столько получили вода и сам калориметр. Неизвестных две — $C_к$ и $\lambda_н$, а опытов два. В опыте A плавления нет (твёрдый нафталин только остывает), поэтому он даёт $C_к$ сразу; опыт B с кристаллизацией даёт $\lambda_н$. В опыте C теплоту даёт нагреватель, и нужно просто сложить все её «потребителей».

**Обозначения.** $C_в = m_в c_в + C_к$ — теплоёмкость воды вместе с калориметром (они всегда при одной температуре). Остальные — как в условии.

**Пункт 1.**

**1. Опыт A: теплоёмкость калориметра.** Уравнение теплового баланса: теплота, отданная твёрдым нафталином при остывании от $t_{пл}$ до $t_{см1}$, равна теплоте, полученной водой и калориметром при нагреве от $t_в$ до $t_{см1}$:

$$m_н c_{н.т} (t_{пл} - t_{см1}) = (m_в c_в + C_к)(t_{см1} - t_в),$$

$$C_в = m_в c_в + C_к = \frac{m_н c_{н.т} (t_{пл} - t_{см1})}{t_{см1} - t_в} = \frac{0{,}05 \cdot 1200 \cdot 56}{3} = 1120 \ \frac{Дж}{°C},$$

$$C_к = 1120 - 0{,}2 \cdot 4200 = 1120 - 840 = 280 \ \frac{Дж}{°C}.$$

**2. Опыт B: удельная теплота плавления.** Нафталин отдаёт тепло-

ту в три стадии: жидкость остывает от $t_ж$ до $t_{пл}$, затвердевает при $t_{пл}$ (выделяя $\lambda_н m_н$), твёрдый остывает от $t_{пл}$ до $t_{см2}$. Конечная температура $30{,}1° < 79°$, значит, затвердел весь нафталин. Уравнение теплового баланса:

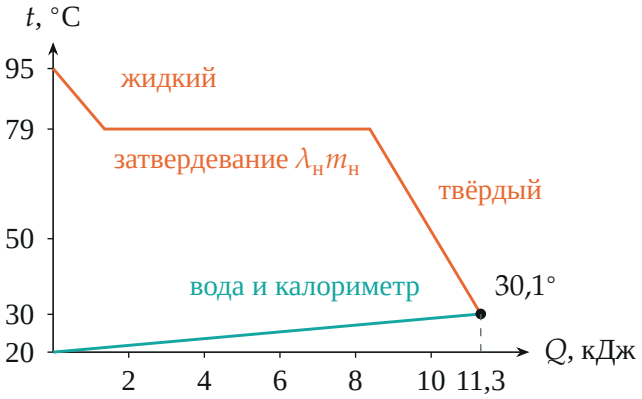
$$m_н\Big(c_{н.ж}\,(t_ж - t_{пл}) + \lambda_н + c_{н.т}\,(t_{пл} - t_{см2})\Big) = C_в\,(t_{см2} - t_в)\,.$$

Отданное по стадиям и полученное:

$$0{,}05 \cdot 1700 \cdot 16 = 1360\ Дж, \qquad 0{,}05 \cdot 1200 \cdot 48{,}9 = 2934\ Дж,$$

$$C_в \cdot 10{,}1 = 11\,312\ Дж,$$

$$\lambda_н = \frac{11\,312 - 1360 - 2934}{0{,}05} = \frac{7018}{0{,}05} \approx 1{,}40 \cdot 10^5\ \frac{Дж}{кг} = 140{,}4\ \frac{кДж}{кг}.$$




*Опыт В по шагам (ось $t$ начинается с $20°C$). Оранжевая линия — температура нафталина в зависимости от отданной им теплоты: остывание жидкости (1,36 кДж), горизонтальная площадка затвердевания (7,02 кДж), остывание твёрдого (2,93 кДж). Бирюзовая — температура воды с калориметром от полученной теплоты. Линии сходятся при $30{,}1°C$.*

**Пункт 2. Опыт С.**

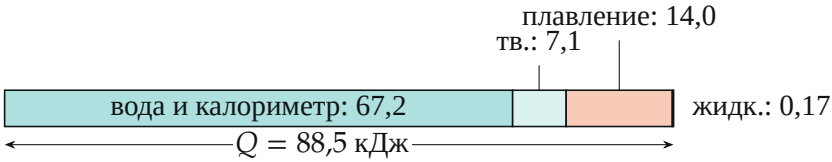
**3. Нужная теплота.** Начальное состояние — всё при $20°C$, конечное — всё при $80°C$, нафталин жидкий. Нужная теплота не зависит от того, в

каком порядке шли процессы; удобно считать по стадиям, как на графике ниже: сначала всё греется до 79°C, затем нафталин плавится, затем всё греется ещё на градус.

$$Q = C_{\text{в}}\,(t_{\text{кон}} - t_{\text{в}}) + Mc_{\text{н.т}}\,(t_{\text{пл}} - t_{\text{в}}) + \lambda_{\text{н}}M + Mc_{\text{н.ж}}\,(t_{\text{кон}} - t_{\text{пл}})\,.$$

$$Q = 1120 \cdot 60 + 0{,}1 \cdot 1200 \cdot 59 + 0{,}1 \cdot 140\,360 + 0{,}1 \cdot 1700 \cdot 1,$$

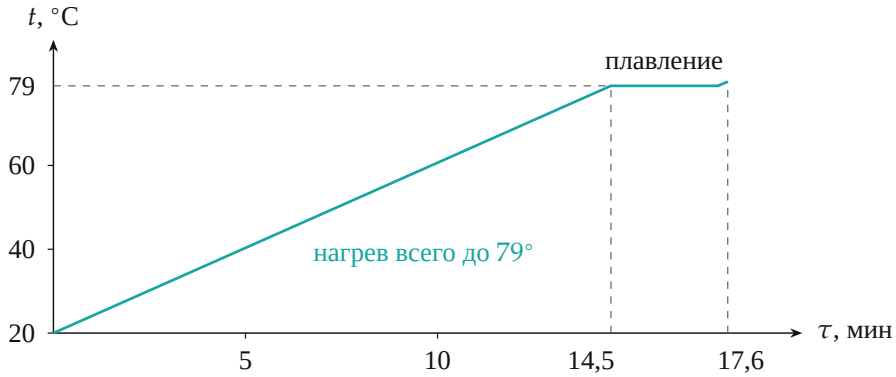
$$Q = 67\,200 + 7080 + 14\,036 + 170 = 88\,486 \text{ Дж}.$$




*Из чего складывается $Q$ (кДж): нагрев воды с калориметром на 60°, нагрев твёрдого нафталина на 59°, плавление, нагрев жидкого нафталина на 1°. Три четверти теплоты уходит на воду с калориметром.*

**4. Время.** Нагреватель за время $\tau$ отдаёт содержимому полезную теплоту $\eta P\tau$ (остальное теряется по определению КПД). Закон сохранения энергии:

$$\eta P\tau = Q \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{Q}{\eta P} = \frac{88\,486}{0{,}84 \cdot 100} \approx 1053 \text{ с} \approx 17{,}6 \text{ мин}.$$



*Температура содержимого в опыте С от времени работы нагревателя: подъём до 79°C (14,5 мин), площадка плавления (2,8 мин), нагрев на последний градус (0,26 мин). Точки — по расчёту стадий: 73,16 кДж, 14,04 кДж и 1,29 кДж при полезной мощности 84 Вт.*

**Обратите внимание.** В опыте А нафталин уже при температуре плавления, но твёрдый — поэтому в его балансе нет $\lambda$. И в опытах А, В нельзя забывать калориметр: без него из В получилось бы $\lambda_н = (840 \cdot 10{,}1 - 4294)/0{,}05 \approx 8 \cdot 10^4$ Дж/кг — почти вдвое меньше.

**Проверка.** Размерность: $[C_к]$ = Дж/°C, $[\lambda]$ = Дж/кг, $[Q/(\eta P)]$ = Дж/Вт = с. Порядок величины: справочная удельная теплота плавления нафталина — около $1{,}5 \cdot 10^5$ Дж/кг, наши $1{,}40 \cdot 10^5$ с ней согласуются. Второй способ для $\tau$ — по стадиям графика: $\frac{73\,160 + 14\,036 + 1290}{84} = 1053$ с, то же.

**Ответ.** 1) $C_к = 280$ Дж/°C, $\lambda_н \approx 1{,}40 \cdot 10^5$ Дж/кг = 140,4 кДж/кг; 2) $\tau = \dfrac{Q}{\eta P} \approx 1053$ с $\approx 17{,}6$ мин.