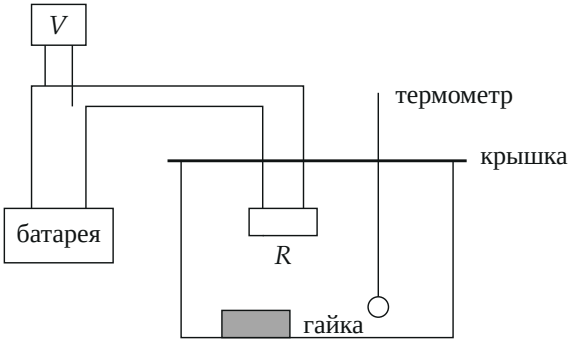
Греем гайку

Задача 1. [ВсОШ 2022/23, региональный этап, 9 класс, практический тур, задача 1] **Задание:** определите теплоёмкость гайки. Погрешности оценивать не нужно.

Оборудование: пластиковый контейнер с крышкой, резистор ($R = 3{,}3$ Ом, подвешенный на крышке контейнера) с проводами, гайка, термометр, секундомер, три батарейки AA с держателем (или одна плоская батарейка), мультиметр, фиксатор для термометра, миллиметровая бумага для построения графиков.

Примечание: измерения следует проводить в процессе остывания предварительно нагретого контейнера, так как в процессе нагревания массивная металлическая гайка не успевает прогреться до температуры окружающего воздуха.



Поясняющий рисунок установки: резистор на крышке греет воздух в контейнере, вольтметр измеряет напряжение на резисторе

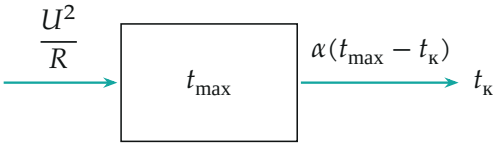
▲ **Решение. Что происходит.** Это задача на тепловой баланс с теплоотдачей по закону Ньютона — Рихмана: поток тепла из контейнера в комнату пропорционален разности температур, $\alpha(t - t_к)$. Сначала по *установившемуся* нагреву находим коэффициент α: вся мощность резистора уходит в комнату. Затем по *скорости остывания* при той же температуре находим теплоёмкость: чем она больше, тем медленнее остывание. Опыт без гайки и с гайкой дают две теплоёмкости, их разность — теплоёмкость гайки.

Обозначения. $t_к$ — комнатная температура; α — коэффициент теплоотдачи контейнера; $C_к$ — теплоёмкость системы контейнер–резистор–термометр; $C_{кг}$ — то же с гайкой; $C_г = C_{кг} - C_к$; $k = \left|\dfrac{\Delta t}{\Delta \tau}\right|$ — скорость остывания.

1. Коэффициент теплоотдачи. Подключаем батарейки к резистору и ждём, пока температура перестанет расти (меняется меньше чем на полградуса за две минуты). Измерения авторов: $t_к = 25\,°\text{C}$, $t_{max} = 37\,°\text{C}$, $U = 2{,}43$ В. В установившемся режиме внутренняя энергия контейнера не меняется, поэтому закон сохранения энергии за время $\Delta\tau$: теплота резистора равна теплоте, ушедшей в комнату,

$$\frac{U^2}{R}\Delta\tau = \alpha\,(t_{max} - t_к)\,\Delta\tau \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{U^2}{R\,(t_{max} - t_к)},$$

$$\alpha = \frac{2{,}43^2}{3{,}3 \cdot 12}\ \text{Вт/°C} = 0{,}149\ \text{Вт/°C}.$$



Установившийся режим: мощность резистора целиком уходит в комнату

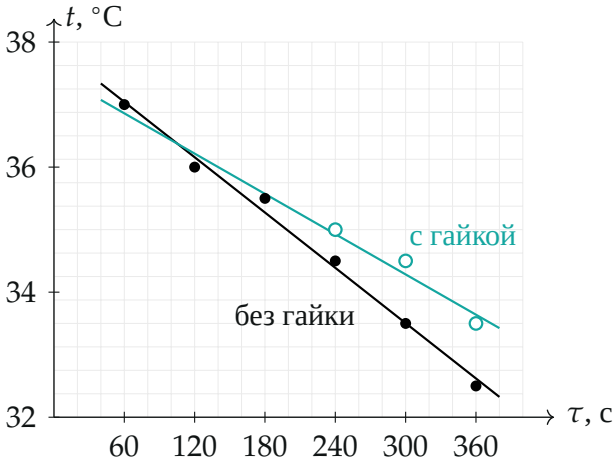
2. Скорость остывания. Отключаем батарею и записываем температуру каждую минуту, пока контейнер остывает около 35 °C; затем повторяем опыт с гайкой внутри. Данные авторов:

τ, с	60	120	180	240	300	360
t, °C (без гайки)	37,0	36,0	35,5	34,5	33,5	32,5
t, °C (с гайкой)	37,0	36,0	35,5	35,0	34,5	33,5

Остывание на участке в 5 °C близко к линейному (разность $t - t_к$ меняется всего на треть), поэтому проводим прямые методом наименьших

квадратов:

$$k_0 = 0{,}0148\ ^\circ\text{C/с (без гайки)}, \qquad k_1 = 0{,}0107\ ^\circ\text{C/с (с гайкой)}.$$



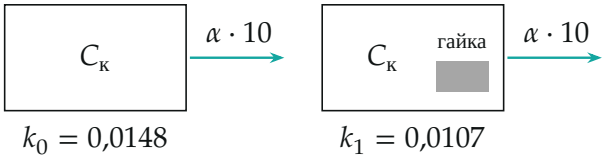
Остывание без гайки (чёрные точки) и с гайкой (бирюзовые кружки; первые три точки совпадают с чёрными); прямые — метод наименьших квадратов

3. Теплоёмкости. При остывании резистор выключен, и уравнение теплового баланса за малое время $\Delta\tau$: убыль внутренней энергии равна теплоте, ушедшей в комнату. Берём момент, когда $t = 35\,^\circ\text{C}$ (середина участка):

$$C\,k\,\Delta\tau = \alpha\,(35 - t_к)\,\Delta\tau \quad \Rightarrow \quad C = \frac{\alpha\,(35 - t_к)}{k}.$$

Без гайки и с гайкой:

$$C_к = \frac{0{,}149 \cdot 10}{0{,}0148} \approx 101\ \text{Дж/°C}, \qquad C_{кг} = \frac{0{,}149 \cdot 10}{0{,}0107} \approx 139\ \text{Дж/°C}.$$



При 35 °C поток тепла наружу одинаков; гайка добавляет теплоёмкость, и остывание идёт медленнее

4. Теплоёмкость гайки.

$$C_г = C_{кг} - C_к = \alpha\,(35 - t_к)\left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_0}\right) \approx 139 - 101 = 38\ \text{Дж/°C}.$$

Наклоны прямых известны с точностью около 5% и 7% (разброс точек: температуру читаем с шагом 0,5 °C), а $C_г$ — малая разность больших чисел, поэтому результат грубый: примерно 30–45 Дж/°C. У организаторов в решении наклоны округлены до 0,014 и 0,011 °C/с, отсюда их $C_г \approx 29$ Дж/°C — в пределах этого разброса.

Обратите внимание. Измерять надо при остывании, а не при нагреве: массивная гайка прогревается медленнее воздуха, и при нагреве её температура отстаёт от показаний термометра. Сравнивать скорости остывания нужно при одной и той же температуре — поток тепла зависит от $t - t_к$.

Проверка. Размерность $\dfrac{\alpha\,\Delta t}{k}$: $\dfrac{\text{Вт/°C} \cdot \text{°C}}{\text{°C/с}} = \text{Дж/°C}$. Оценка: стальная гайка массой около 70 г имеет теплоёмкость $0{,}07 \cdot 460 \approx 32$ Дж/°C — того же порядка.

Ответ. $C_г \approx 38$ Дж/°C (по данным авторов; с учётом разброса точек 30–45 Дж/°C).