Нагревание батарейки

Задача 2. [ВсОШ 2018/19, региональный этап, 9 класс, задача 2 (практический тур)] «Нагревание батарейки».

В этой задаче вам предстоит исследовать, как изменяется напряжение на батарейке при её нагреве (охлаждении).

Оборудование: две одинаковые батарейки AA; мультиметр; три провода с разъёмами типа «крокодил»; два батарейных отсека; термостойкий пакет; ёмкость для воды; нитка; горячая вода (по требованию); термометр.

Немного теории. Напряжение на батарейке зависит от температуры: $U(T) = U_0 + \Delta U$, где U_0 — напряжение при комнатной температуре. При планировании эксперимента учтите, что изменение напряжения ΔU мало по сравнению с U_0.

Задание.

1. Измерьте U_0.
2. Измерьте зависимость ΔU от температуры.
3. Постройте график измеренной зависимости $U(T)$.
4. Предложите функцию, описывающую зависимость ΔU от температуры. Определите параметры предложенной функции.
5. Возрастает или уменьшается напряжение при росте температуры?

Примечание. Батарейки не должны непосредственно контактировать с водой и не должны быть мокрыми. Используйте пакет.

▲ **Решение. Что происходит.** Нужно увидеть изменение напряжения порядка милливольт на фоне 1,6 В. На пределе 2 В мультиметр показывает напряжение с точностью до 1 мВ — этого мало. Главная идея — дифференциальная схема: две одинаковые батарейки включаем навстречу друг другу, одну греем, другая остаётся при комнатной температуре. Их «большие» напряжения U_0 взаимно вычитаются, и вольтметр показывает сразу ΔU — на пределе 200 мВ с точностью 0,1 мВ.

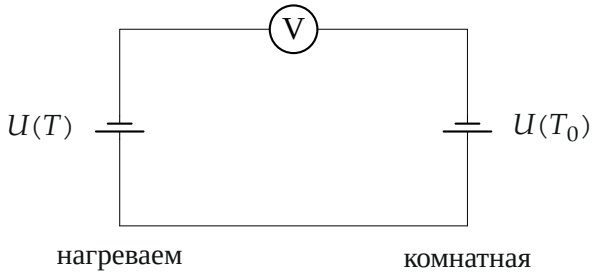
Обозначения. T — температура воды (и нагреваемой батарейки), T_0 — комнатная, $U_0 = U(T_0)$, $\Delta U = U(T) - U_0$; U_V — показание вольтметра.

Пункт 1. Батарейка в отсеке, мультиметр в режиме вольтметра (предел 2 В или 20 В) подключён к её полюсам. Ток через вольтметр ничтожен (его сопротивление порядка мегаома), поэтому он показывает ЭДС батарейки. У организаторов

$$U_0 = 1{,}615\ \text{В} \quad \text{при } T_0 \approx 23\ ^\circ\text{C}.$$

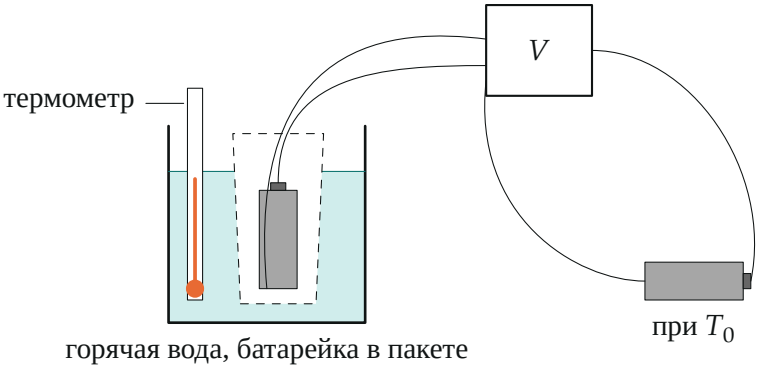
Пункт 2. Схема. Вторую батарейку ставим в отсек и соединяем «плюс» с «плюсом» проводом (длинные пластины на схеме — плюсы), а «минусы» — через вольтметр. Обход контура через вольтметр (закон Ома для замкнутой цепи, ток почти нулевой, падений напряжения на внутренних сопротивлениях нет):

$$U_V = U(T) - U(T_0) = \Delta U.$$



Дифференциальная схема: батарейки включены навстречу, вольтметр показывает разность их напряжений ΔU

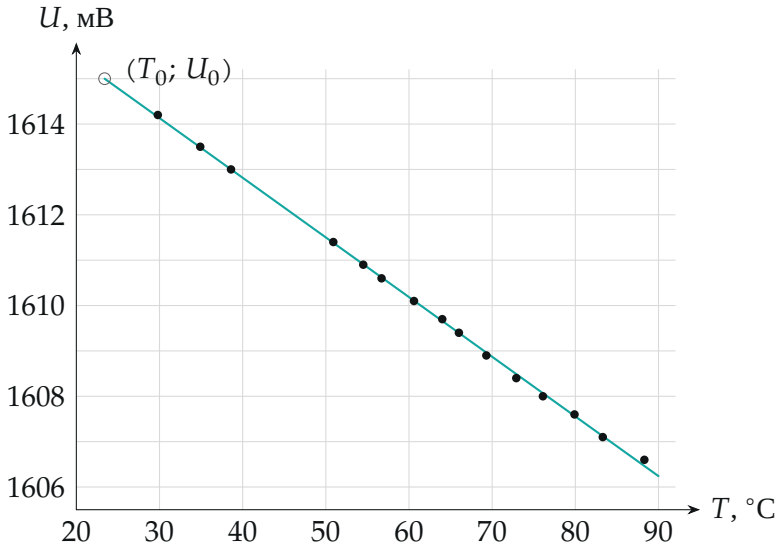
Нагреваемую батарейку в отсеке кладём в пакет, завязываем ниткой (провода выводим наружу) и опускаем в ёмкость с горячей водой вместе с термометром. Вторая батарейка лежит на столе. Вода остывает медленно, поэтому измерения удобно делать при остывании: записываем пары $(T; U_V)$, каждый раз выжидая, пока показание установится, — батарейка должна успеть принять температуру воды. Затем можно доливать горячую воду и повторить.



Как устроен опыт: нагреваемая батарейка сухая — в завязанном пакете, рядом термометр; вторая — на столе

Пункт 3. Измерения организаторов (сняты с их графика, $U = U_0 + U_V$):

T, °C	U, мВ	T, °C	U, мВ	T, °C	U, мВ
29,8	1614,2	56,7	1610,6	72,9	1608,4
34,9	1613,5	60,6	1610,1	76,1	1608,0
38,6	1613,0	64,0	1609,7	79,9	1607,6
50,9	1611,4	66,0	1609,4	83,3	1607,1
54,5	1610,9	69,3	1608,9	88,3	1606,6



Зависимость $U(T)$ по точкам организаторов; прямая — метод наименьших квадратов, кружок — комнатная температура

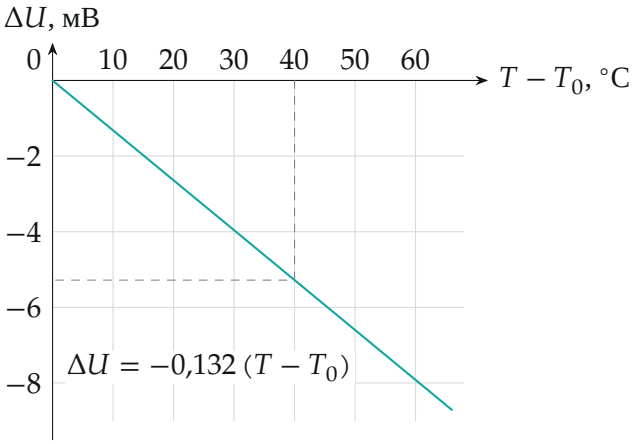
Пункт 4. Точки лежат на прямой (отклонения не больше 0,14 мВ — на уровне последнего разряда вольтметра), поэтому берём линейную функцию

$$\Delta U = -\alpha\,(T - T_0), \qquad U(T) = U_0 - \alpha\,(T - T_0).$$

Метод наименьших квадратов по 15 точкам (python) даёт

$$U = 1618{,}1\ \text{мВ} - 0{,}132\ \frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}} \cdot T, \qquad \alpha = (0{,}132 \pm 0{,}001)\ \text{мВ}/^\circ\text{C}.$$

Второй способ — по двум крайним точкам: $\alpha \approx \dfrac{1614{,}2 - 1606{,}6}{88{,}3 - 29{,}8} = 0{,}130$ мВ/°C, то же в пределах погрешности. При $U = U_0 = 1615$ мВ прямая даёт $T_0 \approx 23$ °C — комнатная температура, как и должно быть.



Функция пункта 4: изменение напряжения прямо пропорционально нагреву; пунктир — при нагреве на 40 °C батарейка теряет 5,3 мВ

Пункт 5. Коэффициент отрицательный: при нагреве напряжение батарейки *уменьшается*, примерно на 0,13 мВ на градус — за 65 °C нагрева всего на 0,5% от U_0.

Обратите внимание: без дифференциальной схемы на пределе 2 В весь эффект (8 мВ на всём диапазоне) уместился бы в восемь единиц последнего разряда, и прямую было бы не провести. И сама батарейка должна прогреться до температуры воды: показание снимаем, когда оно перестало меняться.

Проверка. Размерность α — мВ/°C, как у наклона графика. Относительный температурный коэффициент $\alpha/U_0 \approx 8 \cdot 10^{-5}$ K^{-1} — малая величина, поэтому условие и предупреждает, что $\Delta U \ll U_0$.

Ответ. 1) $U_0 = 1{,}615$ В; 2) $\Delta U < 0$, при нагреве до 88 °C $\Delta U \approx -8$ мВ (таблица); 3) график — прямая; 4) $\Delta U = -\alpha(T - T_0)$, $\alpha \approx 0{,}13$ мВ/°C, $T_0 \approx 23$ °C; 5) уменьшается.