Окрошка и картошка

Задача 3. [МОШ 2010/11, 10 класс, задача 3] Школьник Коля налил в тарелку холодную окрошку, имеющую температуру $t_{окр} = 10$ °C. Масса окрошки в тарелке равна $m = 300$ г, а её удельная теплоёмкость равна удельной теплоёмкости воды $c_в = 4200$ Дж/(кг·°C). Коля добавил в окрошку горячую картошку, которая имела температуру $t_{карт} = 80$ °C. Полная теплоёмкость добавленной картошки равна $C = 450$ Дж/°C. После установления теплового равновесия температура картошки и окрошки оказалась равной $t = 22$ °C. В какую сторону было передано больше теплоты при теплообмене с окружающей средой: от содержимого тарелки в среду или наоборот, и на сколько больше?

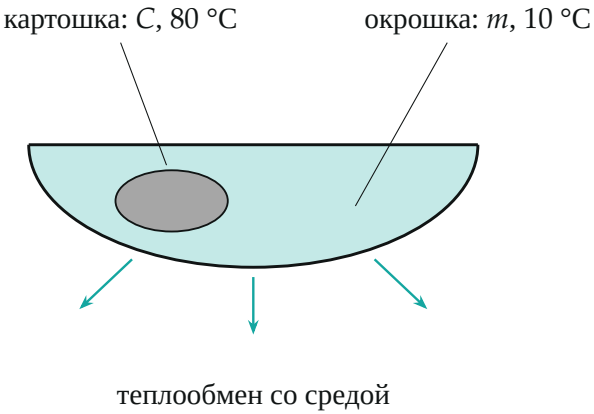


Рис. 1. Поясняющий рисунок: в тарелке окрошка и картошка, теплообмен с окружающей средой идёт через тарелку и поверхность

▲ **Решение.** **Что происходит.** Горячая картошка остывает, холодная окрошка нагревается, и они приходят к общей температуре $t = 22$ °C. Если бы тарелка была теплоизолирована, вся теплота, отданная картошкой, ушла бы в окрошку. Но картошка отдала больше, чем получила окрошка: остаток ушёл в окружающую среду. Нужно найти этот остаток. Главный закон — первый закон термодинамики для системы «картошка + окрошка»; работа не совершается, поэтому изменение внутренней энергии системы равно полученной теплоте.

Обозначения. Q_1 — теплота, отданная картошкой; Q_2 — теплота, полученная окрошкой; Q — теплота, ушедшая в среду (если $Q > 0$, то из содержимого в среду).

1. Теплота, отданная картошкой. Полная теплоёмкость C уже включает массу и удельную теплоёмкость картошки, она остыла с $t_{карт}$ до t:

$$Q_1 = C\,(t_{карт} - t) = 450 \cdot (80 - 22) = 26\,100 \text{ Дж}.$$

2. Теплота, полученная окрошкой. Окрошка нагрелась с $t_{окр}$ до t:

$$Q_2 = mc_в\,(t - t_{окр}) = 0{,}3 \cdot 4200 \cdot (22 - 10) = 15\,120 \text{ Дж}.$$

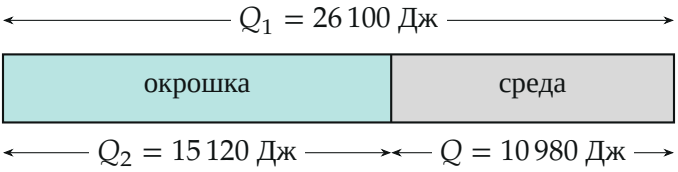


Рис. 2. Куда делась теплота, отданная картошкой: длина полосы пропорциональна энергии

3. Баланс. Запишем первый закон термодинамики для системы «картошка + окрошка». Работа не совершается, значит, изменение внутренней энергии равно теплоте $Q_{пол}$, полученной из среды. Внутренняя энергия картошки уменьшилась на Q_1, окрошки — увеличилась на Q_2:

$$\Delta U = -Q_1 + Q_2 = Q_{пол} \quad \Rightarrow \quad Q = -Q_{пол} = Q_1 - Q_2.$$

Раскрывая, получаем $Q = C(t_{карт} - t) - mc_в(t - t_{окр})$. Подставим числа:

$$Q = 26\,100 - 15\,120 = 10\,980 \text{ Дж} > 0.$$

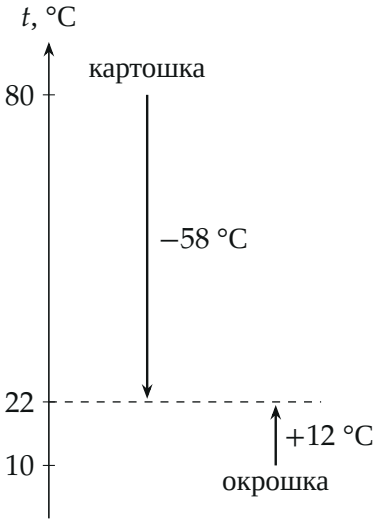


Рис. 3. Шкала температур: картошка остыла на 58 °C, окрошка нагрелась на 12 °C, общая температура 22 °C (пунктир)

4. Знак и смысл. $Q > 0$: содержимое тарелки отдало среде теплоты *больше*, чем получило от неё. Раз речь о суммарном обмене за всё время остывания (среда могла и нагревать содержимое в какие-то моменты, и охлаждать), вопрос ставится про итог: из тарелки в среду ушло на 10 980 Дж больше.

Обратите внимание. Нельзя приравнять $Q_1 = Q_2$ и искать температуру по уравнению теплового баланса: оно верно только для изолированной системы. Здесь равновесная температура 22 °C ниже, чем дал бы такой расчёт, как раз из-за потерь.

Проверка. Размерность: $C\Delta t$ и $mc\Delta t$ — джоули. Если бы потерь не было, равновесная температура была бы

$$t_0 = \frac{Ct_{\text{карт}} + mc_{\text{в}}t_{\text{окр}}}{C + mc_{\text{в}}} = \frac{450 \cdot 80 + 1260 \cdot 10}{450 + 1260} \approx 28{,}4\ ^\circ\text{C}.$$

Измеренная 22 °C ниже на 6,4 °C; общая теплоёмкость $C + mc_{\text{в}} = 1710$ Дж/°C, и $1710 \cdot 6{,}42 \approx 10\,980$ Дж — та же величина. Смысл: за остывание содержимое тарелки отдало окружающей среде 10,98 кДж — столько же, сколько нужно, чтобы нагреть эту окрошку почти на 9 °C.

Ответ. Больше теплоты было передано от содержимого тарелки в окружающую среду, на $Q = C(t_{\text{карт}} - t) - mc_{\text{в}}(t - t_{\text{окр}}) = 10\,980$ Дж.