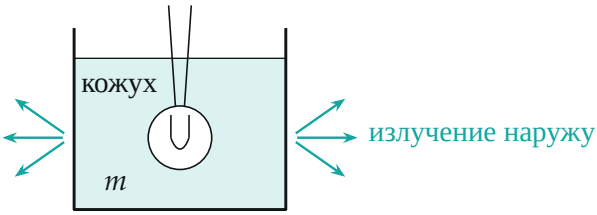
Лампа в сосуде с водой

Задача 2. [Росатом 2019/20, отборочный этап, 9 класс, задача 2] В прозрачный сосуд с водой опустили электрическую лампу мощностью $P = 60$ Вт в прозрачном кожухе и включили. Известно, что вода массой $m = 600$ г за время $t = 5$ мин нагрелась на $\Delta T = 4°$. Какую долю энергии, излученной лампой, сосуд пропустил наружу в виде излучения? Массой сосуда и кожуха пренебречь. Удельная теплоёмкость воды $c = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · град).



Поясняющий рисунок: лампа в прозрачном кожухе внутри сосуда с водой; часть излучения уходит наружу сквозь воду и стенки

▲ **Решение. Что происходит.** Задача на закон сохранения энергии. Лампа превращает электрическую энергию Pt в излучение (видимый свет и инфракрасное). Кожух и сосуд прозрачны и их массой пренебрегаем, поэтому энергия излучения либо поглощается водой и нагревает её, либо проходит наружу. Значит, ушедшая наружу энергия — разность между энергией лампы и теплотой, нагревшей воду.

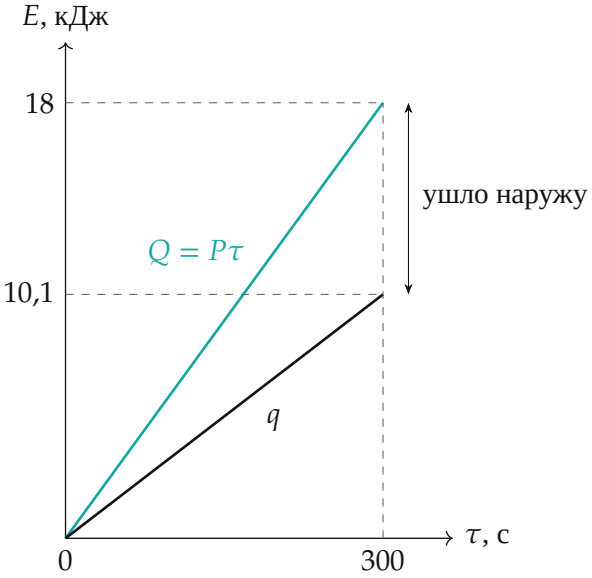
Обозначения. $Q = Pt$ — энергия, излученная лампой; q — теплота, полученная водой; η — искомая доля энергии, вышедшей наружу. Перевод в СИ: $m = 0{,}6$ кг, $t = 300$ с.

1. Энергия лампы. Мощность постоянна, вся электрическая энергия уходит в излучение (кожух прозрачный, его нагревом пренебрегаем):

$$Q = Pt = 60 \cdot 300 = 18\,000 \text{ Дж}.$$

2. Теплота, полученная водой. Уравнение теплоты нагревания:

$$q = c\,m\,\Delta T = 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 0{,}6 \cdot 4 = 10\,080 \text{ Дж}.$$



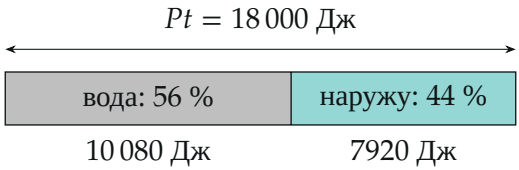
Энергия, излучённая лампой, и теплота, полученная водой, растут пропорционально времени (температура воды растёт равномерно); разрыв между ними — энергия, ушедшая наружу

3. Закон сохранения энергии. Излучение, не поглощённое водой, прошло сквозь прозрачные стенки:

$$\Delta q = Q - q = Pt - cm\,\Delta T = 18\,000 - 10\,080 = 7920 \text{ Дж}.$$

Его доля от излучённой лампой энергии

$$\eta = \frac{Q-q}{Q} = 1 - \frac{cm\,\Delta T}{Pt} = 1 - \frac{10\,080}{18\,000} = 0{,}44.$$



Распределение энергии лампы за 5 минут

4. Почему так много уходит. Вода хорошо поглощает инфракрасное излучение, но почти прозрачна для видимого света. Лампа накаливания излучает в основном в инфракрасной области, и большую часть её поглощает вода; видимый свет и ближнее инфракрасное проходят наружу.

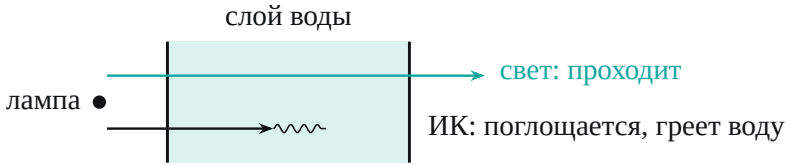


Схема: видимое излучение проходит через воду, инфракрасное поглощается в ней и превращается в теплоту

Обратите внимание. Время нужно перевести в секунды, массу — в килограммы: с минутами и граммами получится бессмысленная «доля» больше единицы или отрицательная.

Проверка. Размерность: $[cm\Delta T] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{град}} \cdot \text{кг} \cdot \text{град} = \text{Дж}$, $[Pt] = \text{Вт} \cdot \text{с} = \text{Дж}$ — доля безразмерна. Знак и предел: $0 < \eta < 1$, как и должно быть; если бы вода поглощала всё ($\eta = 0$), она нагрелась бы за 5 минут на $\frac{Pt}{cm} \approx 7{,}1°$ — больше, чем на самом деле (4°).

Смысл: энергия лампы делится между нагревом воды и излучением наружу; почти половина излучения проходит сквозь воду.

Ответ. $\eta = 1 - \dfrac{cm\,\Delta T}{Pt} = 0{,}44$ (т. е. 44 %).