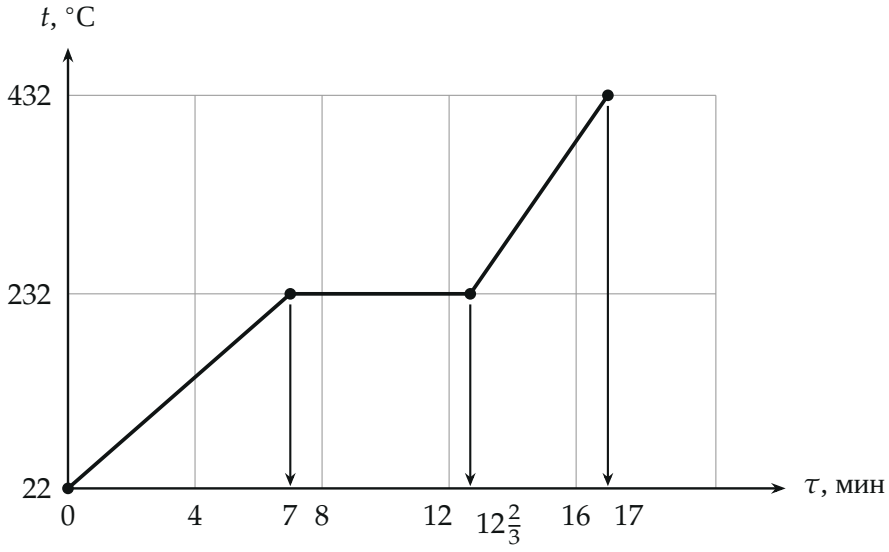
График нагрева и смена мощности печи

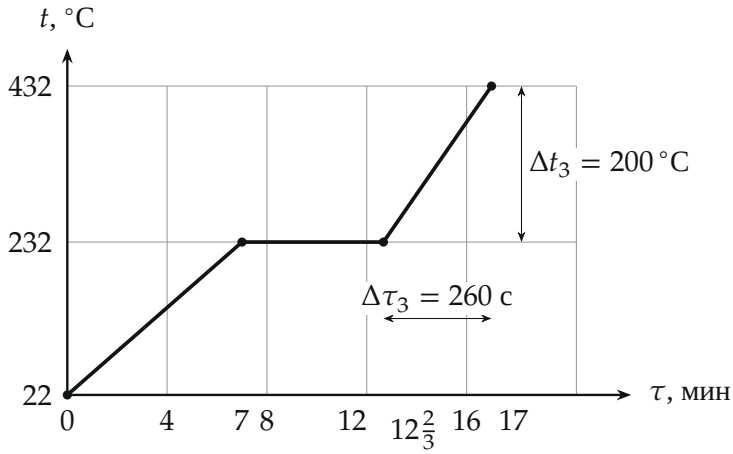
Задача 7. [МОШ 2014/15, 9 класс, задача 7] По «счастливой» случайности отличнику Руслану и первой красавице Людмиле выпало вместе делать простейшую лабораторную работу по физике — «Определение удельной теплоты плавления неизвестного вещества». Руслан включил печь, установив некоторую определённую мощность нагревания, поместил в капсулу кусочек исследуемого вещества и ровно в 10^{00} по московскому времени начал измерения. Когда Руслан отошёл к учителю, скучающая Людмила тайком переключила тумблер установки мощности печи в другое положение (которое, естественно, не запомнила) и более его не меняла.

К великому удивлению Руслана, результат работы был совершенно неверным, и тогда, под угрозой двойки, Людмила созналась в содеянном. Учитель пожалел ребят и, сообщив им справочные данные, попросил определить: 1) установленную Людмилой мощность печи; и 2) точное московское время переключения Людмилой тумблера установки мощности. Используя полученный Русланом при «помощи» Людмилы график зависимости температуры t вещества от времени τ, помогите школьникам справиться с заданием учителя.



Справочные данные: удельная теплоёмкость исследуемого вещества в жидком состоянии $c_ж = 260$ Дж/(кг·°C); удельная теплота плавления этого вещества $\lambda = 60$ кДж/кг; масса кусочка вещества $m = 50$ г; мощность печи, первоначально установленная Русланом, $P_1 = 6$ Вт.

▲ **Решение. Что происходит.** Печь выдаёт постоянную мощность, а вещество нагревается, плавится при постоянной температуре и снова нагревается. Излом наклона при переключении виден на участках нагрева, а на плато (плавление при постоянной температуре) переключение ничем не проявляется, кроме длины плато. Значит, вторую мощность можно найти из последнего участка, где печь уже работает на ней, а момент переключения — из длительности плавления: теплота λm набирается частью времени при P_1 и остальным временем при P_2.



Графики нагрева (рисунок условия с размерами последнего участка): на участках 0–7 мин и $12\frac{2}{3}$–17 мин температура растёт по прямой — мощность на них постоянна.

Обозначения. P_2 — мощность после переключения (искомая); $\tau_п$ — момент переключения, считаем от начала опыта; t_1 — время плавления при P_1 (от начала плавления до переключения); $c = c_ж$; $m = 50$ г $= 0{,}05$ кг. Время переведём в секунды: 1 мин $= 60$ с.

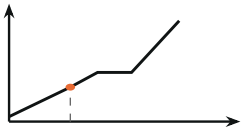
1. Последний участок. На нём вещество жидкое и нагревается от 232 °C до 432 °C за время от $12\frac{2}{3}$ до 17 мин, то есть за $\Delta\tau_3 = 4\frac{1}{3}$ мин

$= 260$ с. Тепло $Q_3 = c\,m\,\Delta t_3$ получено от печи с мощностью P_2: закон сохранения энергии, потерь нет:

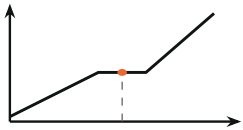
$$P_2\,\Delta\tau_3 = c\,m\,\Delta t_3 \;\Rightarrow\; P_2 = \frac{260 \cdot 0{,}05 \cdot 200}{260}\ \text{Вт} = 10\ \text{Вт}.$$

Участок прямой, значит, мощность на нём постоянна; тумблер на нём не переключали (излом был бы виден).

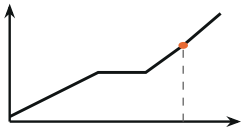
2. Где переключили тумблер. При нагреве твёрдого тела или жидкости смена мощности дала бы излом наклона, а оба нагрева на графике — прямые. Значит, переключение было на плато: температура там постоянна при любой мощности, излома нет.



излом на нагреве твёрдого тела



излома нет (плато)



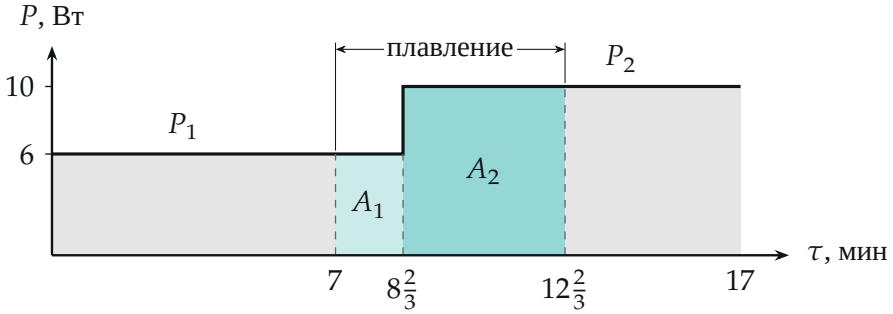
излом на нагреве жидкости

Как выглядит переключение на графике (схематично): излом заметен всюду, кроме плато.

3. Время плавления и энергия. Плавление идёт от 7 до $12\frac{2}{3}$ мин, то есть $\Delta\tau_2 = 5\frac{2}{3}$ мин $= 340$ с. Для плавления массы m нужна теплота $\lambda m = 60\,000 \cdot 0{,}05$ Дж $= 3000$ Дж. Она набирается за время t_1 при мощности P_1 и за остальное время $\Delta\tau_2 - t_1$ при P_2:

$$P_1\,t_1 + P_2\,(\Delta\tau_2 - t_1) = \lambda m,$$
$$6\,t_1 + 10\,(340 - t_1) = 3000 \;\Rightarrow\; 3400 - 4\,t_1 = 3000.$$

Отсюда $t_1 = 100$ с $= 1\frac{2}{3}$ мин, то есть 1 мин 40 с. Площади под графиком мощности — энергия: $A_1 = P_1 t_1 = 600$ Дж, $A_2 = P_2(\Delta\tau_2 - t_1) = 10 \cdot 240 = 2400$ Дж, вместе 3000 Дж.



Мощность печи по времени. Площадь под графиком — энергия; за плавление набирается $A_1 + A_2 = \lambda m$ (бирюзовым). Мощность скачком меняется в момент $8\frac{2}{3}$ мин.

4. Время переключения. Плавление началось в 7 мин после начала опыта, переключили через t_1 после начала плавления:

$$\tau_{\text{п}} = 7 \text{ мин} + 1 \text{ мин } 40 \text{ с} = 8 \text{ мин } 40 \text{ с}.$$

Опыт начат в 10^{00}, значит, тумблер переключили в $10^{00} + 8$ мин 40 с $=$ 10 ч 08 мин 40 с.

Обратите внимание. Переключение не могло прийтись на границу плато: если бы мощность изменилась ровно в 7 мин, плавление шло бы при 10 Вт и заняло бы $3000/10 = 300$ с, а не 340 с; если ровно в $12\frac{2}{3}$ мин — при 6 Вт заняло бы $3000/6 = 500$ с. Измеренные 340 с лежат между этими значениями, так что тумблер был переключён внутри плато.

Проверка. Размерность: Дж/с $=$ Вт. На первом участке при $P_1 =$ 6 Вт тело получило $6 \cdot 420 = 2520$ Дж за 210 градусов, откуда теплоёмкость твёрдого вещества $\frac{2520}{0{,}05 \cdot 210} = 240$ Дж/(кг·°C) — чуть меньше $c_{\text{ж}}$, правдоподобно. И $t_1 = 100$ с лежит между 0 и 340 с, как и нужно.

Смысл: момент переключения «записан» только в длительности плато.

Ответ. 1) $P_2 = 10$ Вт; 2) тумблер переключили в 10 ч 08 мин 40 с (через 8 мин 40 с после начала опыта).