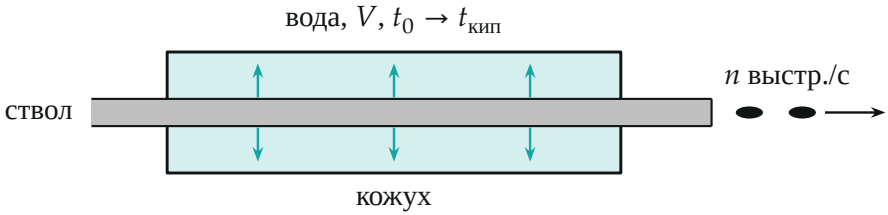
Пулемёт «Максим» и кожух с водой

Задача 2. [ИОШ 2024/25, отборочный этап, 10 класс, задача 2] Наиболее известным оружием времён первой мировой войны был пулемёт «Максим», в котором использовалось водяное охлаждение ствола. Ствол пулемёта помещался в кожух объёмом $V = 4$ л, в который заливалась вода. За какое время непрерывной стрельбы вода в кожухе закипит, если пулемёт совершает $n = 10$ выстрелов в секунду? Масса пороха в патроне $m = 3{,}1$ г, теплота сгорания пороха $q = 3{,}8$ МДж/кг. Считать, что на нагревание воды идёт $\eta = 0{,}2$ энергии, выделившейся при сгорании пороха. Плотность воды $\rho_в = 1000$ кг/м^3, удельная теплоёмкость воды $c_в = 4200$ Дж/(кг·град), температура кипения воды $t_{кип} = 100°C$. Начальная температура воды $t_0 = 20°C$.



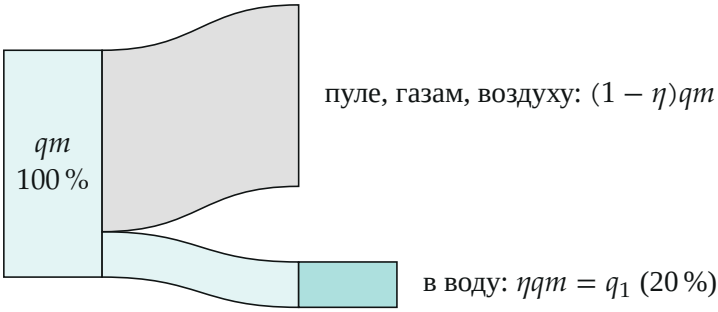
Поясняющий рисунок. Ствол проходит через кожух с водой; часть η теплоты сгорания пороха уходит через стенки ствола в воду (бирюзовые стрелки).

▲ **Решение.** **Что происходит.** Задача на тепловой баланс с непрерывным источником тепла. Каждый выстрел добавляет воде одну и ту же порцию теплоты, выстрелы идут с постоянной частотой, поэтому вода получает тепло с постоянной мощностью. Вода закипит, когда полученное тепло сравняется с теплом, нужным для нагрева всей воды от t_0 до $t_{кип}$. Потерь тепла из кожуха наружу задача не учитывает — они уже «спрятаны» в коэффициенте η.

Обозначения. q_1 — теплота, которую вода получает от одного выстрела; P — мощность нагрева воды; Q — теплота, нужная для нагрева воды до кипения; τ — искомое время.

1. Тепло одного выстрела. При сгорании пороха массой m выделяется теплота qm (определение удельной теплоты сгорания), воде достаётся доля η:

$$q_1 = \eta q m = 0{,}2 \cdot 3{,}8 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 3{,}1 \cdot 10^{-3}\ \text{кг} = 2356\ \text{Дж}.$$



Куда уходит теплота сгорания пороха одного патрона: ширина полосы пропорциональна энергии. Воде достаётся пятая часть.

2. Мощность нагрева. За время Δt пулемёт делает $\Delta N = n\Delta t$ выстрелов, вода получает $\Delta Q = q_1 \Delta N = n\eta q m\, \Delta t$. Мощность — теплота за единицу времени:

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = n\eta q m = 10\ \text{с}^{-1} \cdot 2356\ \text{Дж} = 2{,}36 \cdot 10^4\ \text{Вт}.$$

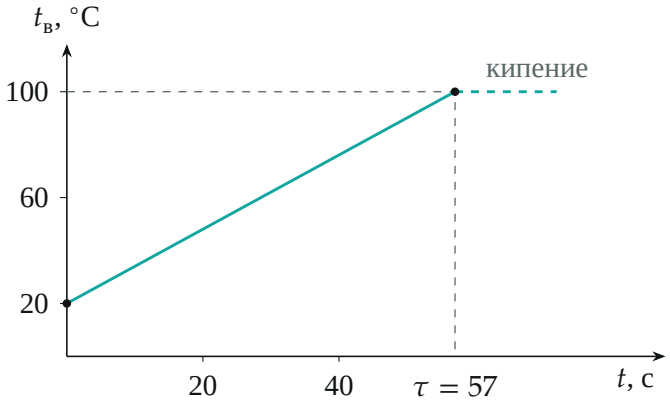
От Δt она не зависит: нагрев идёт равномерно.

3. Сколько тепла нужно воде. Масса воды $\rho_\text{в} V = 1000\ \text{кг/м}^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3}\ \text{м}^3 = 4$ кг. Количество теплоты на нагрев (определение удельной теплоёмкости):

$$Q = c_\text{в} \rho_\text{в} V\,(t_\text{кип} - t_0) = 4200 \cdot 4 \cdot 80\ \text{Дж} = 1{,}344 \cdot 10^6\ \text{Дж}.$$

4. Время до кипения. Уравнение теплового баланса воды: всё полученное за τ тепло пошло на нагрев, $P\tau = Q$:

$$\tau = \frac{Q}{P} = \frac{c_\text{в} \rho_\text{в} V (t_\text{кип} - t_0)}{n\eta q m} = \frac{1{,}344 \cdot 10^6\ \text{Дж}}{2{,}356 \cdot 10^4\ \text{Вт}} = 57\ \text{с}.$$



Температура воды в кожухе растёт линейно: каждую секунду вода получает одинаковые $2{,}36 \cdot 10^4$ Дж, то есть нагревается на 1,4 градуса. За 57 с она доходит до 100°C.

Обратите внимание. Данные даны в смешанных единицах: литры, граммы, мегаджоули. Сначала всё в СИ: $V = 4{\cdot}10^{-3}$ м^3, $m = 3{,}1{\cdot}10^{-3}$ кг, $q = 3{,}8 \cdot 10^6$ Дж/кг. Вода к моменту закипания ещё не выкипает — на испарение нужно гораздо больше тепла, его задача не спрашивает.

Второй способ — через число выстрелов. До кипения нужно $N = Q/q_1 = 1{,}344 \cdot 10^6/2356 \approx 570$ выстрелов; при 10 выстрелах в секунду это 57 с.

q_1 × $N \approx 570$ выстрелов = $Q = 1{,}34$ МДж, нагрев 4 кг на 80°

Второй способ: число порций q_1, которые нужны воде, делённое на частоту стрельбы, даёт то же время.

Проверка. Размерность: $\dfrac{\text{Дж/(кг} \cdot \text{град)} \cdot \text{кг} \cdot \text{град}}{\text{с}^{-1} \cdot \text{Дж/кг} \cdot \text{кг}} = \text{с}$. Если стрелять вдвое чаще или поставить вдвое меньший кожух, время уменьшится вдвое — формула это даёт. Смысл: меньше чем за минуту непрерывной стрельбы вода закипает, поэтому у «Максима» кожух доливали и выпускали пар.

Ответ. $\tau = \dfrac{c_в \rho_в V (t_{кип} - t_0)}{n \eta q m} \approx 57$ с.