Охлаждение бензинового двигателя

Задача 1. [ИОШ 2021/22, 9 класс, задача 1] В бензиновом двигателе каждую минуту сгорает $\Delta m = 20$ г бензина. Одна четверть выделившейся теплоты идёт на совершение двигателем работы, три четверти выделяются в виде тепла. Охлаждение двигателя осуществляется водой, текущей по трубке с площадью поперечного сечения $\Delta S = 1$ см^2, опоясывающей двигатель. В установившемся режиме разность температур воды на входе и выходе из трубки равна $\Delta t = 20°$. Считая, что всё выделяющееся тепло поглощается охлаждающей водой, найти скорость воды в трубке. Удельная теплота сгорания бензина $q = 4{,}6 \cdot 10^7$ Дж/кг, удельная теплоёмкость воды $c = 4{,}2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К).



Поясняющий рисунок: трубка с водой опоясывает двигатель; вода входит с температурой t_0 и выходит нагретой на Δt.

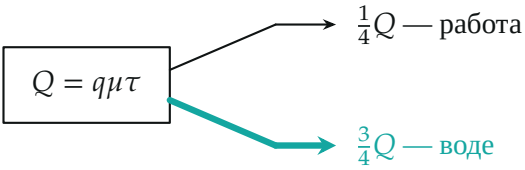
▲ **Решение. Что происходит.** Это задача на тепловой баланс в установившемся режиме: температура двигателя не меняется, поэтому вся теплота, которую он не превратил в работу, уходит с охлаждающей водой. Значит, теплота, выделяемая за единицу времени, равна теплоте, которую уносит протекающая за это время вода. Сколько воды протекает, задаёт её скорость в трубке.

Обозначения. τ — произвольный промежуток времени; $\mu = \Delta m/(1\text{ мин})$ — масса бензина, сгорающая за единицу времени; v — скорость воды; $\rho = 1000$ кг/м^3 — плотность воды; $m_\text{в}$ — масса воды, протекающей через трубку за время τ.

1. Сколько теплоты получает вода. За время τ сгорает масса бензина $\mu\tau$ и выделяется теплота $Q = q\mu\tau$. По условию четверть идёт на

работу, три четверти — в тепло, и всё тепло забирает вода:

$$Q_в = \frac{3}{4} q\mu\tau.$$

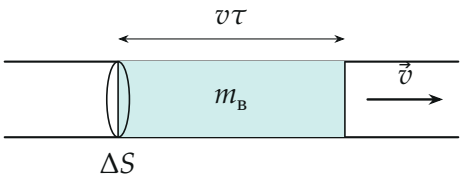


Куда идёт теплота сгорания бензина: четверть — на работу, три четверти — охлаждающей воде.

2. Сколько воды протекает. За время τ через сечение трубки проходит столб воды длиной $v\tau$ и объёмом $\Delta S\, v\tau$, его масса

$$m_в = \rho\, \Delta S\, v\tau.$$

Эта вода нагревается на Δt и получает $c\, m_в \Delta t$.



За время τ через сечение ΔS проходит столб воды длиной $v\tau$.

3. Уравнение теплового баланса. Приравниваем теплоту, полученную водой, к теплоте, на которую она нагрелась:

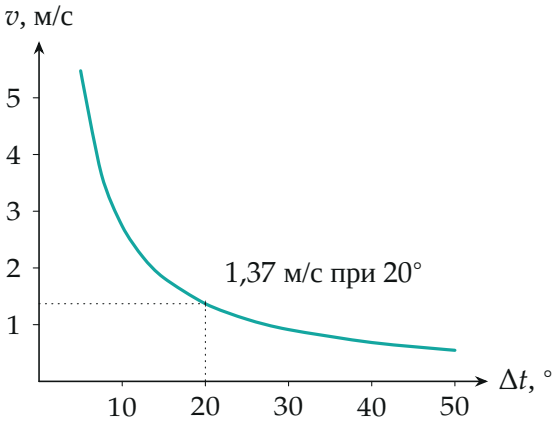
$$\frac{3}{4} q\mu\tau = c\rho\, \Delta S\, v\tau\, \Delta t \quad \Rightarrow \quad v = \frac{3q\mu}{4c\rho\, \Delta S\, \Delta t}.$$

Время τ сократилось — так и должно быть в установившемся режиме.

4. Числа в СИ. $\mu = 0{,}02/60$ кг/с, $\Delta S = 10^{-4}$ м^2:

$$v = \frac{3 \cdot 4{,}6 \cdot 10^7 \cdot 0{,}02/60}{4 \cdot 4{,}2 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-4} \cdot 20} = \frac{11\,500}{8400} \approx 1{,}37 \text{ м/с}.$$

Мощность, уходящая в воду, $\frac{3}{4}q\mu \approx 11{,}5$ кВт.



Нужная скорость воды обратно пропорциональна допустимому нагреву: $v = 27{,}4/\Delta t$ (м/с, Δt в градусах).

Обратите внимание. Минуту и квадратные сантиметры надо перевести в секунды и квадратные метры, иначе ответ выйдет не в м/с. Разность температур в градусах Цельсия равна разности в кельвинах.

Ответ. $v = \dfrac{3q\mu}{4c\rho\,\Delta S\,\Delta t} \approx 1{,}37$ м/с.

Проверка. Размерность: $\dfrac{\text{Дж/кг} \cdot \text{кг/с}}{\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)} \cdot \text{кг/м}^3 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}} =$ м/с. Смысл: больше сгорает бензина — вода должна течь быстрее; больше допускается нагрев воды — можно медленнее. Второй способ — расход воды: 11,5 кВт уносит $\frac{11\,500}{4200 \cdot 20} \approx 0{,}137$ кг/с, то есть 137 см^3/с через 1 см^2 — 1,37 м/с.

Физический смысл. В установившемся режиме охлаждающая вода уносит всё тепло двигателя, и её скорость определяется только мощностью тепловыделения и допустимым нагревом.

Ответ. $v = \dfrac{3q\mu}{4c\rho\,\Delta S\,\Delta t} \approx 1{,}37$ м/с, где $\mu = \Delta m/(1\text{ мин})$.