# Смесь воды и пара под поршнем

**Задача 7.** [МОШ 2009/10, 9 класс, задача 7] В цилиндре под поршнем находятся вода и водяной пар при температуре 100 °C. Снаружи цилиндра — вакуум, на поршне стоит груз массой $m = 100$ кг, позволяющий создать внутри цилиндра давление $p = 10^5$ Па. Какое количество теплоты $Q$ следует сообщить смеси, чтобы поднять гирю на высоту $h = 1$ м от начального положения? Удельная теплота парообразования воды $L = 2{,}26 \cdot 10^6$ Дж/кг, плотность водяного пара при 100 °C равна $\rho = 0{,}58$ кг/м$^3$.

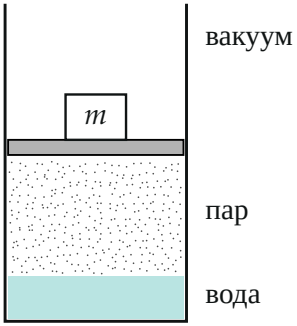



*Рис. 1. Цилиндр с водой, паром и поршнем с грузом (поясняющий рисунок)*

▲ **Решение. Что происходит.** Вода и её пар находятся вместе при 100 °C, значит пар — насыщенный. Пока в цилиндре есть вода, его давление и температура не меняются: давление равно тому, что создаёт груз. Когда сообщают теплоту, температура остаётся 100 °C, часть воды испаряется, пара становится больше, и он, расширяясь, поднимает поршень с грузом. Класс задачи — испарение при постоянных $T$ и $p$, и ключевая величина — масса $\Delta m$ испарившейся воды: теплота равна $L\Delta m$. Массу найдём из того, на сколько вырос объём пара.

**Обозначения.** $S$ — площадь поршня; $\Delta V$ — прирост объёма под поршнем; $\Delta m$ — масса воды, которая испарилась.

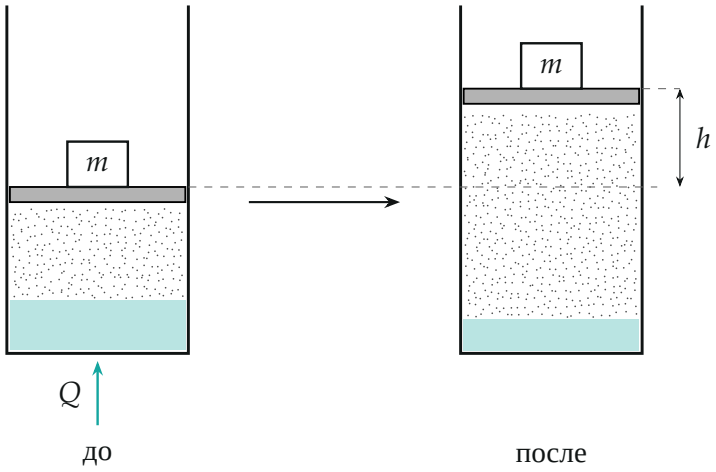



*Рис. 2. Подвод теплоты поднимает поршень с грузом на $h$ при постоянных температуре и давлении; воды становится меньше, пара — больше (рисунок схематичен)*

**1. Давление и площадь поршня.** Поршень вместе с грузом покоится, снаружи вакуум, поэтому давление газа внутри уравновешивает только вес груза: $pS = mg$. Отсюда $S = mg/p$. Пока вода есть, давление пара остаётся $p$.

**2. Прирост объёма.** Поршень поднялся на $h$, значит объём под ним вырос на

$$\Delta V = Sh = \frac{mgh}{p} = \frac{100 \cdot 10 \cdot 1}{10^5}\ \text{м}^3 = 10^{-2}\ \text{м}^3.$$

**3. Сколько воды испарилось.** Пар насыщенный, его плотность $\rho$ остаётся прежней, пока температура 100 °C. Объём пара вырос на $\Delta V$ (объём испарившейся воды — около 6 см$^3$ против 10 л — можно не учитывать), и масса пара выросла на

$$\Delta m = \rho\,\Delta V = \frac{\rho\, mgh}{p} = 0{,}58 \cdot 10^{-2}\ \text{кг} \approx 5{,}8\ \text{г}.$$

Это и есть масса воды, которая превратилась в пар.

**4. Теплота.** Удельная теплота парообразования $L$ — это теплота, ко-

торую нужно сообщить единице массы воды, чтобы превратить её в пар при постоянных температуре и давлении. Поэтому

$$Q = L\,\Delta m = \frac{L\rho}{p}\,mgh = \frac{2{,}26\cdot 10^6\cdot 0{,}58}{10^5}\cdot 100\cdot 10\cdot 1\ \text{Дж} \approx 1{,}3\cdot 10^4\ \text{Дж}.$$

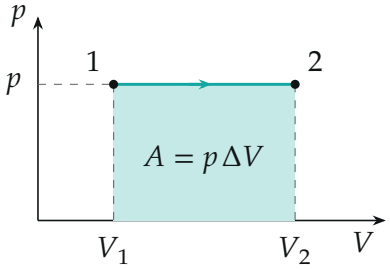



*Рис. 3. Процесс на диаграмме $p$–$V$: изобара; работа пара — площадь под ней и равна $p\Delta V = mgh$*

**Откуда берётся энергия.** Проверим по первому началу термодинамики: $Q = \Delta U + A$. Работа пара — это подъём груза: $A = p\Delta V = mgh = 100\cdot 10\cdot 1 = 1000$ Дж (рис. 3). Остальное, $\Delta U = Q - A \approx 12{,}1$ кДж, идёт на увеличение внутренней энергии пара за счёт разрыва связей между молекулами воды.

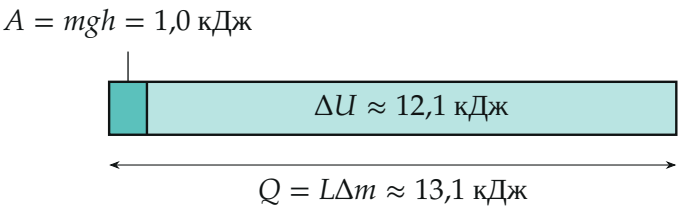



*Рис. 4. На что идёт теплота: меньшая часть — работа по подъёму груза, большая — рост внутренней энергии пара*

**Обратите внимание.** $L$ — теплота парообразования при постоянном давлении: в неё уже входит работа расширения пара. Поэтому $Q = L\Delta m$, и добавлять $mgh$ к этому нельзя: получилось бы лишнее.

**Проверка.** Размерность: (Дж/кг) · (кг/м$^3$) · (Н · м)/(Н/м$^2$) = Дж. Предел $h \to 0$: $Q \to 0$ — нет подъёма, нет испарения, верно. Правдоподобие: $\Delta m = 5{,}8$ г — совсем немного воды: пар в $\sim 1700$ раз разреженнее воды, потому 10 л прироста объёма и дают граммы. Доля работы $A/Q = p/(L\rho) \approx 7{,}6\,\%$: почти вся теплота уходит на внутреннюю энергию.

Смысл: при постоянных температуре и давлении груз поднимается ровно настолько, насколько испарилась вода; теплота пропорциональна высоте подъёма.

**Ответ.** $Q = \dfrac{L\rho}{p}\,mgh \approx 13$ кДж.