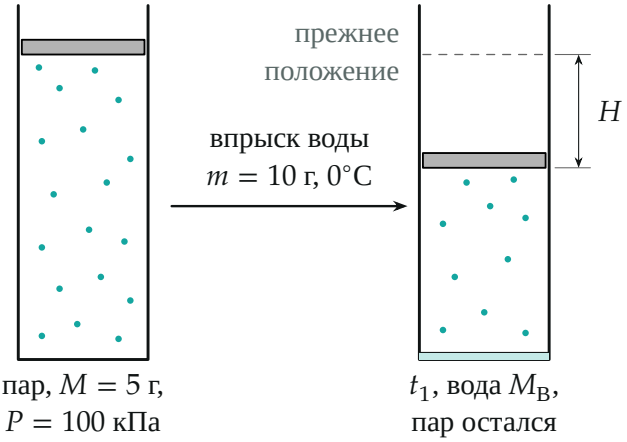
Впрыск воды в насыщенный пар

Задача 4. [Физтех 2025/26, 10 класс, вариант 10-05, задача 4] В цилиндре под лёгким поршнем площадью $S = 100$ см^2 находится насыщенный водяной пар. Масса пара $M = 5$ г, давление пара $P = 100$ кПа. В цилиндр впрыскивают $m = 10$ г воды при температуре $t_0 = 0°$C. Через некоторое время в цилиндре устанавливается равновесное состояние.

1. Найдите температуру t_1 по шкале Цельсия в цилиндре в этом равновесном состоянии. Удельная теплоёмкость воды $c = 4200$ Дж/(кг $\cdot$ °C), удельная теплота парообразования воды $r = 2{,}26 \cdot 10^6$ Дж/кг. Считайте, что в теплообмене участвуют только водяной пар и вода. Внешнее давление не изменяется.
2. Найдите массу $M_\text{В}$ воды в цилиндре в равновесном состоянии.
3. Найдите перемещение H поршня в процессе перехода системы из начального состояния в конечное. Молярная масса воды $\mu = 18$ г/моль, универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31$ Дж/(моль $\cdot$ К). Изменение объёма воды считайте пренебрежимо малым.



Поясняющий рисунок: до впрыска и после установления равновесия (высоты пара в масштабе, высота слоя воды преувеличена)

▲ **Решение. Что происходит.** Холодная вода забирает теплоту у насыщенного пара, и часть пара конденсируется. Давление в цилиндре не

меняется (лёгкий поршень, внешнее давление постоянно), а при заданном давлении насыщенный пар существует только при одной температуре — температуре кипения, около 100°C (для неё и даны c и r). Пока в цилиндре есть и пар, и вода, температура остаётся равной ей. Задача — выяснить, хватит ли пару теплоты, чтобы довести всю впрыснутую воду до 100°C; если хватит, то найти, сколько пара для этого сконденсируется.

Обозначения. ΔM — масса сконденсировавшегося пара, $M_\text{В} = m + \Delta M$ — конечная масса воды, $T = 373$ К — температура пара, $S = 100$ см$^2 = 10^{-2}$ м^2.

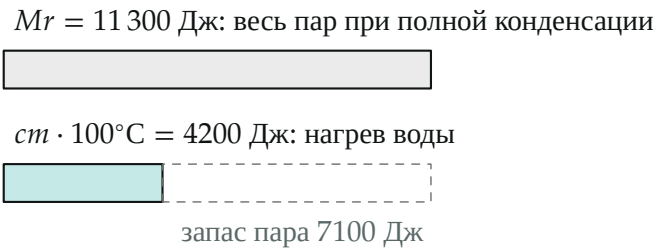
1. Конечная температура. Сравним два количества теплоты. Весь пар при полной конденсации отдал бы

$$Q_\text{пар} = Mr = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}26 \cdot 10^6 = 11\,300 \text{ Дж}.$$

Нагрев впрыснутой воды от 0°C до 100°C требует

$$Q_\text{в} = c\,m\,(100°\text{C} - 0°\text{C}) = 4200 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 4200 \text{ Дж}.$$

Так как $Q_\text{в} < Q_\text{пар}$, пар успевает нагреть всю воду до 100°C и при этом сконденсируется лишь частично: в конце остаются и пар, и вода, и $t_1 = 100°\text{C}$.



Теплоты пара хватает с запасом (масштаб: 1 см — 2000 Дж)

2. Масса воды. Запишем уравнение теплового баланса для воды и пара: теплота, выделившаяся при конденсации массы ΔM пара, идёт на нагрев впрыснутой воды. Сам конденсат уже имеет 100°C и теплоты не

получает:

$$\Delta M\, r = c\, m \cdot 100^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad \Delta M = \frac{4200}{2{,}26 \cdot 10^6} \approx 1{,}86 \cdot 10^{-3}\ \text{кг} = 1{,}86\ \text{г},$$

$$M_\text{В} = m + \Delta M \approx 10 + 1{,}86 \approx 11{,}9\ \text{г}.$$

Обратите внимание: массы пара $M = 5$ г хватает ($\Delta M < M$), поэтому допущение «пар остался» верно; осталось 3,14 г пара.

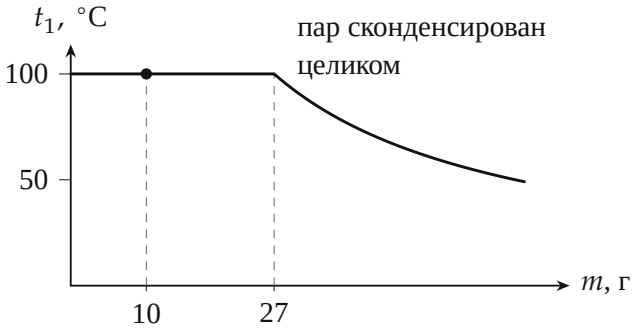
3. Перемещение поршня. Давление и температура пара не изменились, значит, не изменилась и его плотность. Найдём её из уравнения Менделеева — Клапейрона для пара: $P = \dfrac{\rho_\text{п}}{\mu} RT$, откуда

$$\rho_\text{п} = \frac{P\mu}{RT} = \frac{10^5 \cdot 0{,}018}{8{,}31 \cdot 373} \approx 0{,}58\ \text{кг/м}^3.$$

Объём газа уменьшился на объём пара массы ΔM (объём получившейся воды пренебрежимо мал по условию):

$$\Delta V = \frac{\Delta M}{\rho_\text{п}} = \frac{1{,}86 \cdot 10^{-3}}{0{,}58} \approx 3{,}2 \cdot 10^{-3}\ \text{м}^3, \qquad H = \frac{\Delta V}{S} \approx 0{,}32\ \text{м}.$$

Поршень опускается: объём пара уменьшился с $M/\rho_\text{п} \approx 8{,}6$ л до $(M - \Delta M)/\rho_\text{п} \approx 5{,}4$ л.



Температура в равновесии при $M = 5$ г: до $m \approx 27$ г равна $100^\circ C$

Проверка. Размерность: $c\,m\,\Delta t$ в джоулях, делённые на r в Дж/кг, дают килограммы. Предел: при $m \to 0$ получаем $\Delta M \to 0$ и $H \to 0$; при $m = 26{,}9$ г, когда $cm \cdot 100^\circ\text{C} = Mr$, конденсируется весь пар (график). Плотность 0,58 кг/м^3 согласуется с табличной плотностью насыщенного пара при 100°C ($\approx$ 0,6 кг/м^3). Смысл: пар — «запас теплоты» при постоянной температуре; он отдаёт её, конденсируясь, и пока он не кончился, температура привязана к давлению и равна 100°C.

Ответ. 1) $t_1 = 100^\circ\text{C}$; 2) $M_\text{В} \approx 11{,}9$ г; 3) $H \approx 0{,}32$ м (поршень опускается).