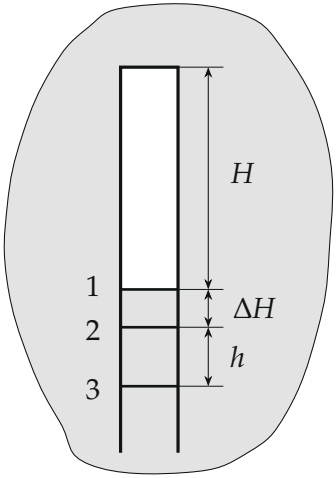
Пробирка во влажном воздухе при нагревании

Задача 2. [Физтех 2022/23, 11 класс, варианты 11-05–11-08, задача 2] В воде на некоторой глубине удерживают пробирку в вертикальном положении, обращённую открытым концом вниз (см. рис.). Столб влажного воздуха имеет длину $H = 8$ см, температура установилась $t_1 = 27\,^\circ$C, в таком состоянии пробирка находилась достаточно долго. В некоторый момент температуру системы резко поднимают до температуры $t_2 = 57\,^\circ$C, сохраняя прежнее давление. При этом вода в пробирке быстро опустилась с уровня 1 до уровня 2. После этого уровень воды начал медленно двигаться до уровня 3, опустившись на $h = 10{,}3$ мм. Изменением гидростатического давления на границе «воздух–вода» в пробирке можно пренебречь.

1. Найти расстояние ΔH между первым и вторым уровнями.
2. Найти давление в пробирке P_0. Ответ дать в мм рт. ст.

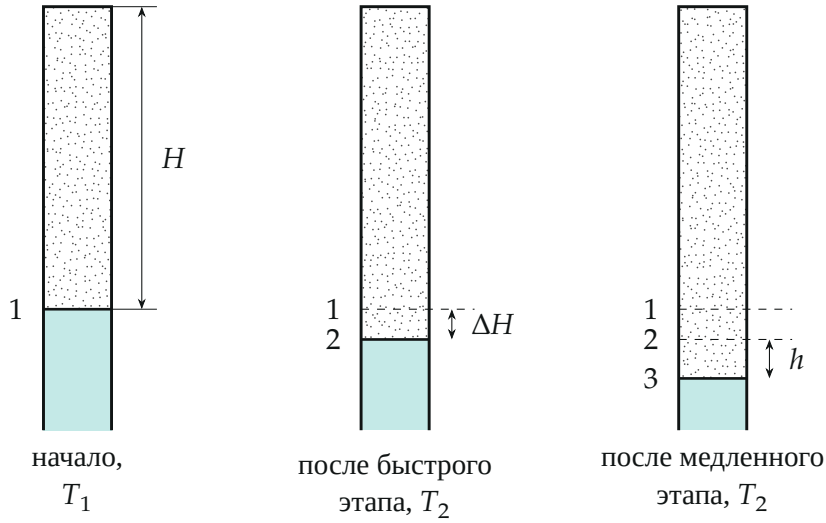
Примечание: давление насыщенного пара воды при температуре t_1 равно $P_1 = 27$ мм рт. ст., при температуре t_2 равно $P_2 = 130$ мм рт. ст.



▲ **Решение.** **Что происходит.** Под водой влажный воздух в пробирке находится в равновесии с водой достаточно долго, поэтому его пар насыщенный: давление пара $P_1 = 27$ мм рт. ст. Нагрев идёт в два этапа.

Быстрый: за короткое время вода не успевает испариться, количество пара остаётся прежним, а давление в пробирке по условию равно P_0 все время. Значит, смесь «воздух + пар» ведёт себя как один идеальный газ при постоянном давлении, и её объём растёт пропорционально температуре — уровень падает с первого на второй. *Медленный:* при t_2 пар ненасыщенный (его давление $27 < 130$ мм рт. ст.), вода испаряется, пока пар снова не станет насыщенным, и столб растёт ещё на h — уровень падает со второго на третий. Неизменным остаётся только количество сухого воздуха: на нём построен второй пункт. Класс задачи: насыщенный пар (смесь газов, закон Дальтона), насыщение в начале и в конце.

Обозначения. S — площадь сечения пробирки; $T_1 = 300$ К и $T_2 = 330$ К — температуры по Кельвину; $H = 80$ мм; P_0 — давление в пробирке (оно не меняется); $P_1 = 27$ и $P_2 = 130$ мм рт. ст. — давления насыщенного пара при T_1 и T_2.



начало, T_1 | после быстрого этапа, T_2 | после медленного этапа, T_2

Три состояния столба воздуха (масштаб 1 мм = 0,05 см; бирюзовое — вода): длина $H = 80$ мм, затем $H + \Delta H = 88$ мм, затем $H + \Delta H + h = 98{,}3$ мм.

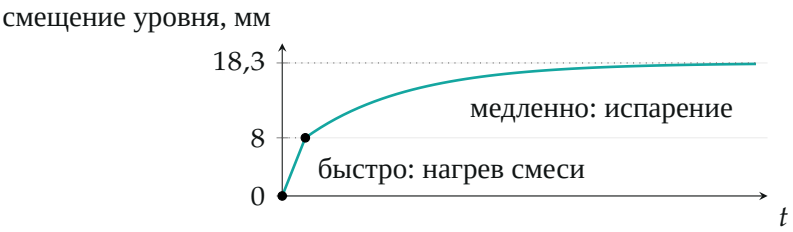
Пункт 1. Расстояние ΔH. В быстром этапе количество газа в пробирке (воздух и пар вместе) не меняется, а давление смеси остаётся равным P_0. Применим для смеси закон Гей-Люссака, то есть уравнение состояния идеального газа для двух состояний при $P_0 = \text{const}$ (объём столба

равен длина $\times S$):

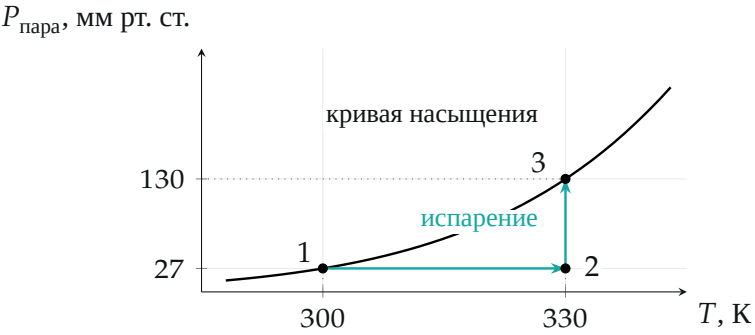
$$\frac{P_0 HS}{T_1} = \frac{P_0(H+\Delta H)S}{T_2} \Rightarrow \Delta H = H\,\frac{T_2 - T_1}{T_1} = 80\text{ мм} \cdot \frac{30}{300} = 8\text{ мм}.$$

Уровень опустился: столб воздуха вырос на 10%, так как температура выросла на 30 К из 300 К.

Обратите внимание: формула для смеси целиком применима только потому, что нагрев быстрый. Пар не успел испариться, поэтому и его количество, и количество воздуха не изменились, и парциальные давления остались прежними ($P_1 = 27$ мм рт. ст. для пара). Температуры — в кельвинах: $T = t + 273$.



Смещение уровня воды (схематически, времена не в масштабе): скачок на $\Delta H = 8$ мм и затем медленное приближение к $\Delta H + h = 18{,}3$ мм.



Состояние пара: 1 — насыщенный при T_1; 2 — после быстрого нагрева (давление пара прежнее, 27, а насыщенному при T_2 отвечает 130: пар ненасыщенный); 3 — снова насыщенный; 1 → 2 — быстрый нагрев, 2 → 3 — испарение. Кривая $P \propto \exp(-b/T)$ проведена через две заданные точки.

Пункт 2. Давление P_0.

1. Сухой воздух. После быстрого этапа пар ненасыщенный, и в медленном этапе он испаряется, поэтому количества пара в начале и в конце разные, а количество сухого воздуха ν — одно и то же: воздух в воде не растворяется и не уходит. Парциальное давление воздуха — разность полного и парциального давления пара (закон Дальтона): в начале $P_0 - P_1$, в конце, когда пар снова насыщен при T_2, $P_0 - P_2$. Уравнение состояния воздуха в начале и в конце:

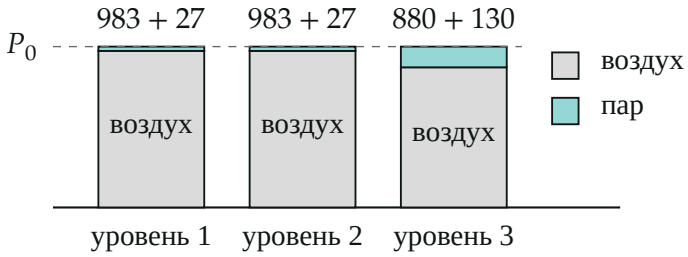
$$\frac{(P_0 - P_1)\,HS}{T_1} = \nu R = \frac{(P_0 - P_2)\,(H + \Delta H + h)\,S}{T_2}.$$

2. Решение. Отсюда

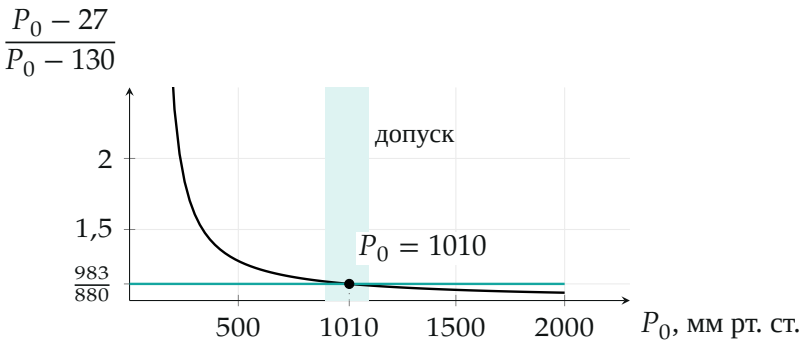
$$\frac{P_0 - P_1}{P_0 - P_2} = \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{H + \Delta H + h}{H} = \frac{300}{330} \cdot \frac{80 + 8 + 10{,}3}{80} = \frac{983}{880}.$$

Освободимся от дробей: $880\,(P_0 - 27) = 983\,(P_0 - 130)$, то есть $103\,P_0 = 983 \cdot 130 - 880 \cdot 27 = 104\,030$ и

$$P_0 = \frac{104\,030}{103}\ \text{мм рт. ст.} = 1010\ \text{мм рт. ст.}$$



Парциальные давления (мм рт. ст.) в трёх состояниях: сумма всё время равна $P_0 = 1010$; пар — сверху, воздух — снизу.



Левая часть уравнения как функция P_0 (чёрная кривая) и найденное по задаче значение $983/880$ (бирюзовая прямая): пересечение даёт $P_0 = 1010$; заливка — допуск 900–1100 мм рт. ст. Кривая в этой области почти плоская, и малая неточность в h заметно меняет P_0.

Проверка. Размерность: обе стороны уравнения безразмерны, P_0 — в мм рт. ст., как и P_1, P_2. Второй способ: произведение PV/T для сухого воздуха должно быть одним и тем же в начале и в конце: $983 \cdot 80/300 = 262{,}1$ и $880 \cdot 98{,}3/330 = 262{,}1$ — равны. Пункт 1 тоже проверяется по-другому: относительная длина $(H + \Delta H)/H = T_2/T_1 = 1{,}1$, откуда 88 мм. Предел: если бы пар не испарялся (P_2 в формуле заменить на P_1), столб в конце был бы 88 мм, то есть $h = 0$ — верно. Допуск по условию 900–1100 объясняется чувствительностью: если считать $h = 10{,}0$ мм вместо 10,3, получится около 1040 мм рт. ст. Правдоподобие: P_0 больше атмосферного 760 мм рт. ст. на 250 мм рт. ст., что отвечает глубине около трёх с половиной метров воды — пробирку держат под водой. Смысл: нагрев сразу расширяет влажный воздух по закону Гей-Люссака, а дальше добавляется пар, и по этому добавлению можно измерить давление в пробирке.

Ответ. 1) $\Delta H = 8$ мм; 2) $P_0 = 1010$ мм рт. ст.