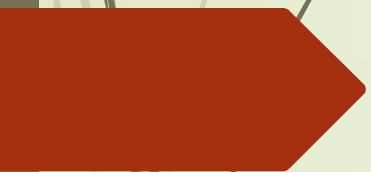


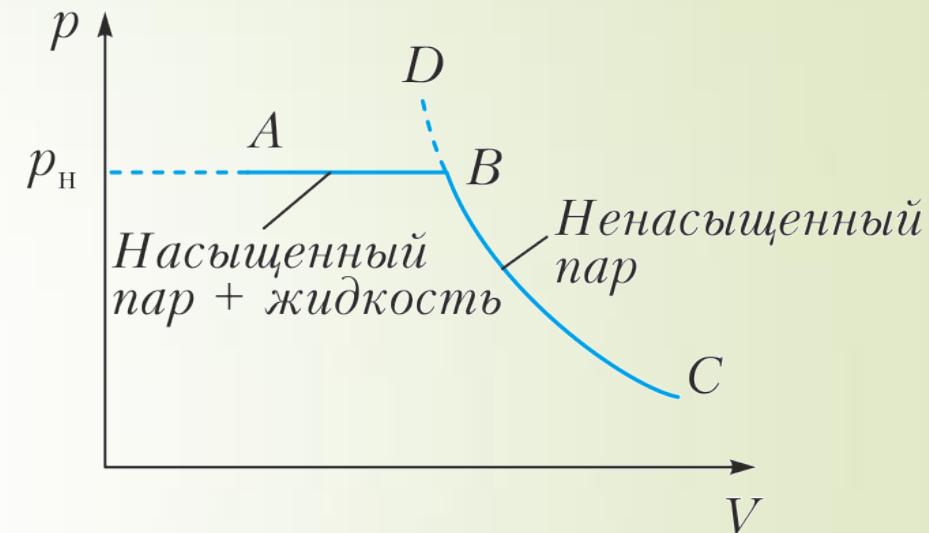
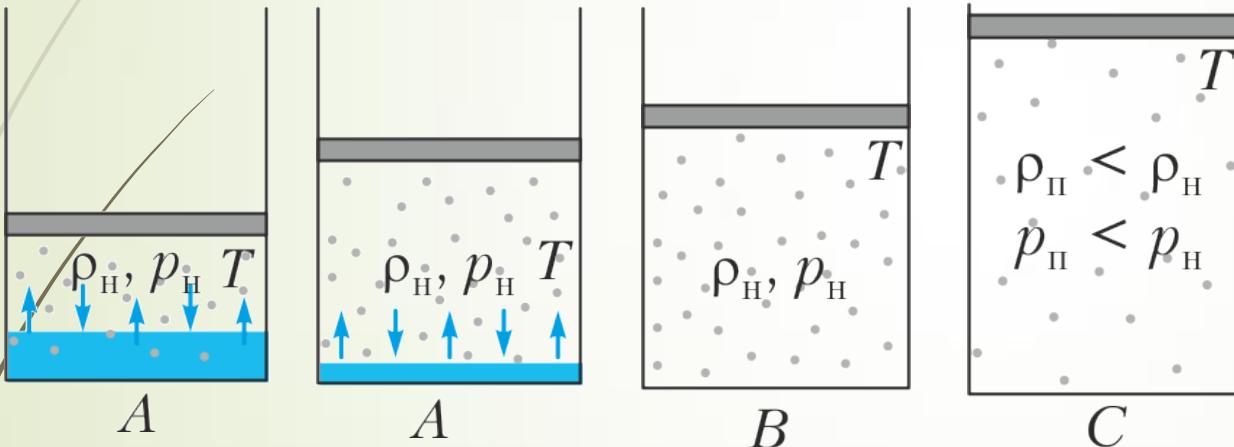
Задачи на влажность и пары



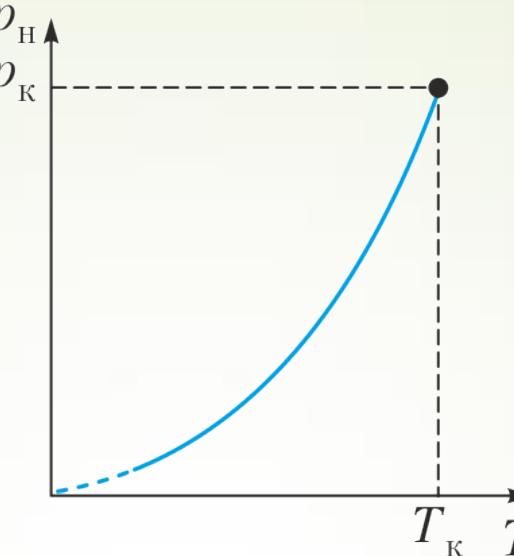
Профессор А.И.Черноуцан,
зав. кафедрой физики РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина,
зам. главного редактора журнала «КВАНТ»

Немного теории

Насыщенный пар – находится в динамическом равновесии с жидкостью



Давление и плотность насыщенного пара зависят только от температуры!



$$p_{\text{H}} = \frac{\rho_{\text{H}}}{M} RT, \quad p_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{M} RT.$$

Удивительно!!!

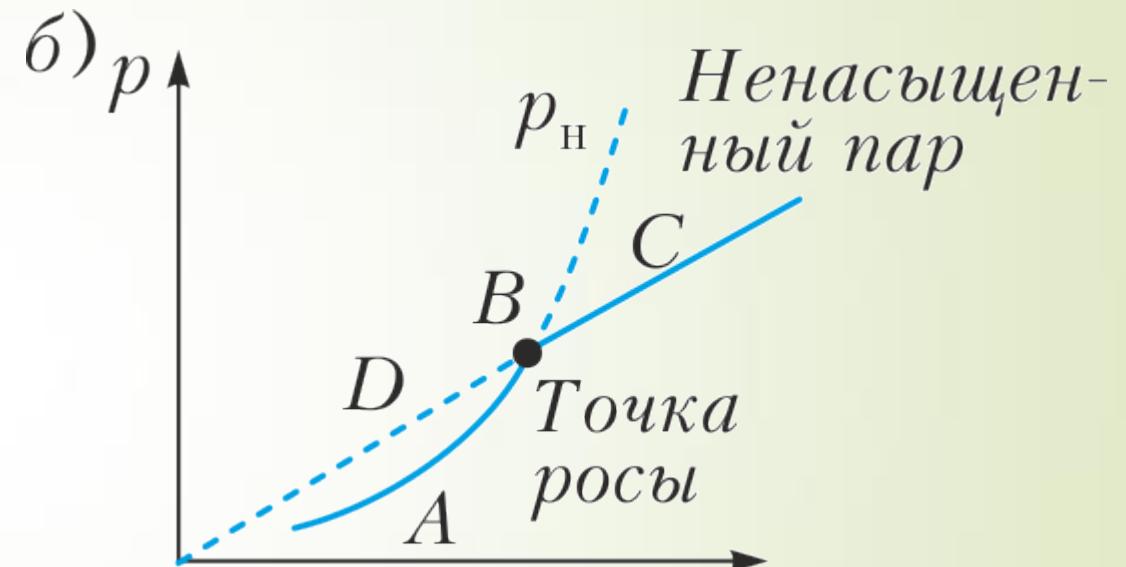
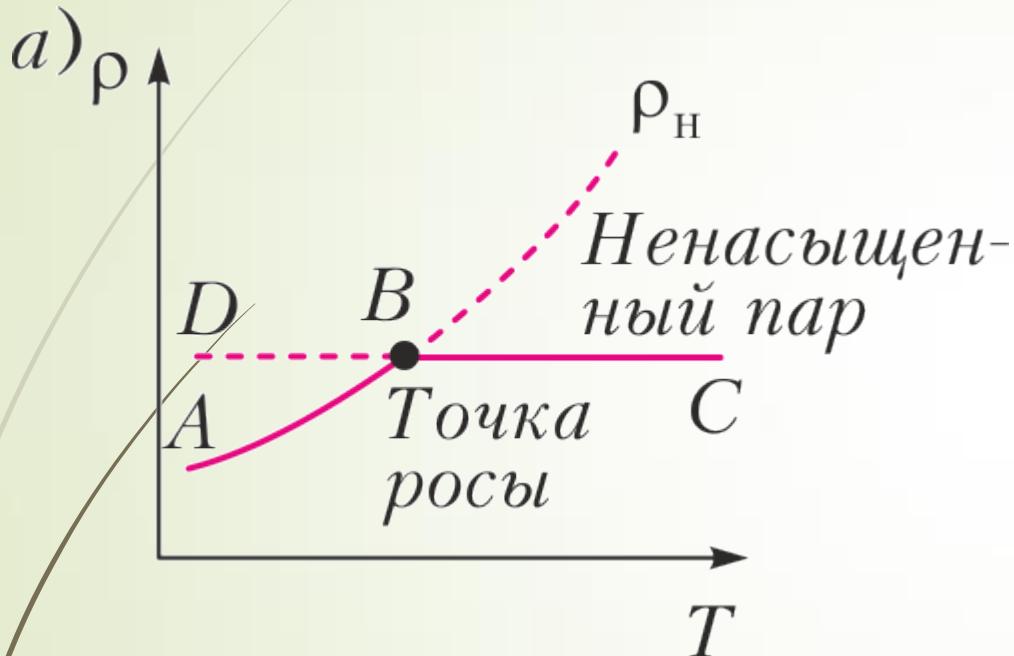
Кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара сравнивается с внешним давлением

$T = 647,3 \text{ К}$	$p_{\text{H}} = 221 \text{ атм}$
(критическая точка),	
$T = 390 \text{ К}$	$p_{\text{H}} = 180 \text{ кПа}$
(скороварка),	
$T = 373 \text{ К}$	$p_{\text{H}} = 100 \text{ кПа}$
(на уровне моря)	
$T = 340 \text{ К}$	$p_{\text{H}} = 30 \text{ кПа}$
(на Эльбрусе),	
$T = 300 \text{ К}$	$p_{\text{H}} = 3,6 \text{ кПа}$
$T = 288 \text{ К}$	$p_{\text{H}} = 1,7 \text{ кПа}$

Относительная влажность:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{H}}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{H}}}$$

Изохорное охлаждение пара



Конкурсные задачи (за решение или идею – приз!!)

Задача 1. Длинную пробирку заполняют водой и опускают в широкий сосуд с водой открытым концом вниз. Длина выступающей над водой части пробирки равна $l = 0,5$ м, у верхнего конца остался маленький пузырек воздуха. Какой будет разница между уровнями воды в пробирке и в сосуде, если пробирку нагреть до 100°C ?



Задача 2. В сосуде объемом 1 л находится 1 моль азота при нормальном атмосферном давлении. Сколько азота надо изотермически удалить из сосуда, чтобы давление уменьшилось вдвое? (Если не хватает данных – спросите!)

Задача 3. В одном сосуде объемом $V_1 = 10$ л находится воздух с относительной влажностью 40% (или $\varphi_1 = 0,4$), а в другом сосуде объемом $V_2 = 30$ л – воздух при той же температуре, но с относительной влажностью 60% (или $\varphi_2 = 0,6$). Сосуды соединены тонкой трубкой с краном. Какая относительная влажность установится после открывания крана?

$$\varphi_1 \rho_h V_1 + \varphi_2 \rho_h V_2 = \varphi' \rho_h (V_1 + V_2)$$

$$\varphi' = \frac{\varphi_1 V_1 + \varphi_2 V_2}{V_1 + V_2} = 0,55$$

Ответ: 55%

Задача 4. Какую массу воды надо дополнительно испарить в комнате объемом $V = 49,8 \text{ м}^3$, чтобы при температуре $t = 27^\circ\text{C}$ повысить относительную влажность от $\varphi_1 = 25\%$ до $\varphi_2 = 50\%$? Давление насыщенных паров воды при температуре 27°C равно $p_h = 3,6 \text{ кПа}$.

$$m = \frac{p_{\Pi} VM}{RT} = \frac{(\varphi p_h) VM}{RT}$$

$$\Delta m = m_2 - m_1 = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1) p_h VM}{RT} = 324 \text{ г}$$

Задача 5. В закрытой теплице объемом $V = 33,2 \text{ м}^3$ относительная влажность воздуха в дневное время при температуре $t_1 = 27^\circ\text{C}$ была равна $\varphi_1 = 75\%$. Какая масса росы выпадет в теплице ночью, когда температура понизится до $t_2 = 15^\circ\text{C}$? Давление насыщенных паров воды при температуре 27°C равно $p_{\text{н}1} = 3,6 \text{ кПа}$, при температуре $15^\circ\text{C} - p_{\text{н}2} = 1,7 \text{ кПа}$.

$$\varphi_2 = 1 \quad !!!$$

$$m_{\text{росы}} = m_1 - m_2 = \frac{\varphi_1 p_{\text{н}1} V M}{R T_1} - \frac{p_{\text{н}2} V M}{R T_2} = 223 \text{ г}$$

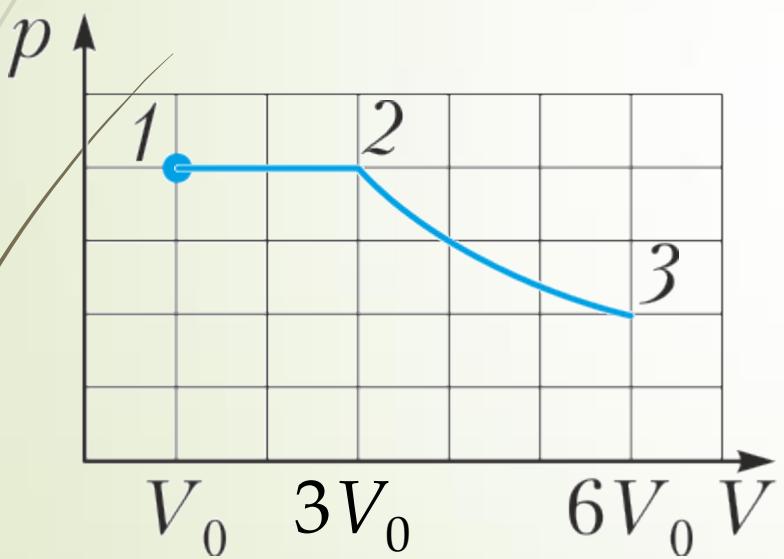
$$m_{\text{росы}} > 0$$

Задача 6 (ЕГЭ). Относительная влажность воздуха в закрытом сосуде равна $\varphi_1 = 40\%$. Какой будет относительная влажность после изотермического уменьшения объема в 3 раза?

- 1) 40%
- 2) 90%
- 3) 100%
- 4) 120%

В следующих трех задачах предполагается, что в сосуде находятся только жидкость и ее пар (воздуха в сосуде нет!)

Задача 7 (ЕГЭ). В цилиндре под поршнем при комнатной температуре t_0 долгое время находятся только вода и ее пар. Масса жидкости в два раза больше массы пара. Первоначальное состояние системы показано точкой 1 на pV -диаграмме (см. рисунок). Медленно перемещая поршень, объем V под поршнем **изотермически** увеличивают от V_0 до $6V_0$. Постройте график зависимости давления p в цилиндре от объема V на отрезке от V_0 до $6V_0$.



- Пока вся вода не испарится, пар будет насыщенным, $p = \text{const}$ (1-2)
- После увеличения объема в 3 раза пар станет ненасыщенным (состояние 2)
- Ненасыщенный пар расширяется в 2 раза изотермически как идеальный газ (2-3)

Задача 8. Сосуд содержит жидкость и ее насыщенный пар. При изотермическом увеличении объема в 4 раза давление уменьшается в 3 раза. Найдите отношение массы пара к массе жидкости в начальном состоянии. Объемом жидкости пренебречь.

1. Объем ненасыщенного пара увеличился в 3 раза (2-3)
2. Объем насыщенного пара перед этим увеличился в $4/3$ раза (1-2)
3. Масса пара при этом увеличилась в $4/3$ раза за счет испарения жидкости.
4. Масса жидкости была в 3 раза меньше массы пара.

Задача 9. Жидкость и ее насыщенный пар находятся в цилиндре под поршнем при некоторой температуре, причем масса пара вдвое больше массы жидкости. Температуру системы изобарно поднимают до 91 °C, объем при этом увеличивается на 56%. На сколько градусов нагрели содержимое цилиндра?

1. Изобарный процесс с насыщенным паром $\longrightarrow T = \text{const}, V_2 = 1,5V_1$

2. Изобарный процесс с ненасыщенным паром $\longrightarrow V_3/V_2 = 1,56/1,5 = 1,04$

$$T_3/T_2 = 1,04$$

3. $T_1 = T_2 = T_3/1,04 = 364 \text{ K}/1,04 = 350 \text{ K}, \quad \Delta T = 14 \text{ K}$

Теперь – жидкость, пар и воздух. Масса воздуха не меняется.

Задача 10. В закрытом сосуде при температуре 100°C находится влажный воздух с относительной влажностью $\varphi = 40\%$ под давлением $p_1 = 2$ атм. Объем сосуда изотермически уменьшили в 3 раза. Чему будет равно конечное давление?

$$p_{\text{H}} = p_0 = 100 \text{ кПа} \longrightarrow p_{\text{п1}} = \varphi p_0 = 0,4p_0 \longrightarrow p_{\text{в1}} = p_1 - p_{\text{п1}} = 2p_0 - 0,4p_0 = 1,6p_0$$

Если нет конденсации пара, то

$$p_{\text{п1}}V_1 = p_{\text{п2}}V_2, p_{\text{п2}} = 3p_{\text{п1}} > p_{\text{H}} !!!$$

Конденсация началась,

$$p_{\text{п2}} = p_{\text{H}} = p_0, \quad p_{\text{в2}} = 3p_{\text{в1}} = 4,8p_0$$

$$p_2 = p_{\text{в2}} + p_{\text{п2}} = 5,8p_0 = 580 \text{ кПа}$$

Задача 11. В закрытом сосуде при температуре 100°C находится влажный воздух под давлением $p_1 = 2$ атм. После того как объем сосуда изотермически уменьшили в 5 раз, давление увеличилось в 4 раза. Чему была вначале равна относительная влажность?

Конденсация началась! $\longrightarrow p_{\text{п}2} = p_{\text{H}} = p_0$

$$p_{\text{в}2} = p_2 - p_{\text{п}2} = 4p_1 - p_{\text{п}2} = 8p_0 - p_0 = 7p_0$$

$$p_{\text{в}1} = \frac{p_{\text{в}2}}{5} = 1,4p_0 \longrightarrow p_{\text{п}1} = p_1 - p_{\text{в}1} = 2p_0 - 1,4p_0 = 0,6p_0$$

$$\varphi_1 = \frac{p_{\text{п}1}}{p_{\text{H}}} \cdot 100\% = \frac{0,6p_0}{p_0} \cdot 100\% = 60\%$$

Задача 12. В закрытом сосуде объемом $V = 83$ л находится влажный воздух при температуре 87°C . Вначале давление в сосуде $p_1 = 60$ кПа, влажность $\varphi_1 = 40\%$. Каким стало давление после того, как в сосуд ввели $m = 20$ г воды? Давление насыщенного пара при 87°C составляет $p_{\text{н}} = 60$ кПа.

$$p_{\text{п1}} = \varphi_1 p_{\text{н}} = 24 \text{ кПа} \quad p_{\text{в}} = p_1 - p_{\text{п1}} = 36 \text{ кПа}$$

Предположим, что вся вода испарилась.

Тогда дополнительное давление паров воды

$$\Delta p_{\text{п}} = \frac{\Delta m R T}{M V} = 40 \text{ кПа} \longrightarrow p'_{\text{п}} = 64 \text{ кПа} > p_{\text{н}} \\ (36 + 64 = 100 \text{ кПа})???$$

В конце осталась вода, пар – насыщенный

$$p'_{\text{п}} = 60 \text{ кПа} + 36 \text{ кПа} = 96 \text{ кПа}$$

Задача 13. В сосуде объемом $V_1 = 20$ л находятся вода, водяной пар и воздух при давлении $p_1 = 3$ атм. При изотермическом расширении до $V_2 = 40$ л в сосуде сохраняется немного воды, а давление уменьшается до $p_2 = 2$ атм. Найдите массу воды, испарившейся в процессе расширения.

$$\frac{p_1 - p_{\text{H}}}{p_2 - p_{\text{H}}} = \frac{V_2}{V_1} \longrightarrow p_{\text{H}} = \frac{p_2(V_2/V_1) - p_1}{(V_2/V_1) - 1} = 1 \text{ атм} \longrightarrow T = 373 \text{ К}$$

$$\Delta m = \frac{p_{\text{H}}(V_2 - V_1)\text{M}}{RT} = 11,6 \text{ г}$$

Задача 14. В стакан налиты две несмешивающиеся жидкости: четыреххлористый углерод CCl_4 и вода. При нормальном атмосферном давлении CCl_4 кипит при $76,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, вода – при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. При равномерном нагревании стакана в водяной бане кипение на границе раздела жидкостей начинается при температуре $65,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите, какая из жидкостей быстрее выкипает при таком «пограничном» кипении и во сколько раз. Давление насыщенных паров воды при $65,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 192 мм рт. ст.

$$p_{\text{H}2} = p_0 - p_{\text{H}1} = (750 - 192) \text{ мм рт.ст.} = 558 \text{ мм рт.ст.}$$

$$m_1 = \frac{p_{\text{H}1} V M_1}{R T}, \quad m_2 = \frac{p_{\text{H}2} V M_2}{R T} \quad \longrightarrow \quad \frac{m_2}{m_1} = \frac{p_{\text{H}2} M_2}{p_{\text{H}1} M_1} = \frac{558 \text{ мм рт.ст.} \cdot 152 \text{ г/моль}}{192 \text{ мм рт.ст.} \cdot 18 \text{ г/моль}} \approx 25$$

Конкурсные задачи

Задача 1

$p_{\text{н}} = p_{\text{атм}}$, на уровне воды в сосуде

Задача 2

На первый взгляд – надо откачать 14 г

Но! Вычислим температуру (если это газ):

$$T = \frac{pV}{vR} = \frac{10^5 10^{-3}}{1 \cdot 8,3} = 12 \text{ К}$$

Температура кипения при атмосферном давлении $T_{\text{к}} = 77 \text{ К}$ (надо было спросить!)

Масса газа $m = \frac{pVM}{RT_{\text{к}}} = \frac{10^5 10^{-3} 28}{8,3 \cdot 77} \approx 4,4 \text{ г}$

Надо удалить $23,6 + 2,2 = 25,8 \text{ г.}$

В сосуде объемом 30 л находится 1 моль воды при нормальном атмосферном давлении. Сколько воды надо изотермически удалить из сосуда, чтобы давление уменьшилось вдвое? (9,3 г)

Спасибо за внимание!

acher2009@yandex.ru

А.Черноуцан «Физика. Задачи с ответами и решениями», М.
Книжный дом Университет, 2004 – 2012.

А.Черноуцан «Пары. Влажность», Квант, 2014, №3

<http://kvant.mccme.ru/>