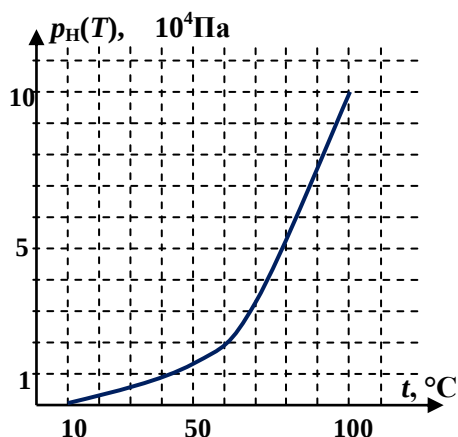


Набор задач для самостоятельного решения к вводному занятию «Фазовые переходы.

Пары и жидкости.».

Задача 1 (1 балл) [кривая фазового равновесия, пар]

На рисунке представлена зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры. Водяной пар охлаждают при неизменном давлении $p_0 = 20$ кПа от начальной температуры $t_0 = 70^\circ\text{C}$. На сколько градусов Цельсия нужно понизить температуру пара, чтобы началась его конденсация? Ответ запишите с точностью до целого значения.



Подсказка 1: Конденсация начинается, когда давление пара сравнивается с давлением насыщенного водяного пара.

Подсказка 2: Из графика можно найти, при какой температуре заданное давление сравнивается с давлением насыщенного пара.

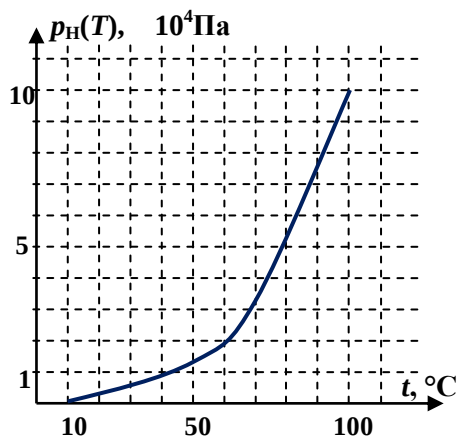
Решение:

Как видно из графика, давление $p_0 = 20$ кПа равно давлению насыщенного водяного пара при температуре $t \approx 61^\circ\text{C}$. Значит, при этой температуре и начнется конденсация. Для ее достижения необходимо охладить пар на $\Delta t = t_0 - t \approx 9^\circ\text{C}$.

Ответ: 9.

Задача 2 (3 балла) [газовые законы, кривая фазового равновесия, пар]

На рисунке представлена зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры. В цилиндрическом сосуде с вертикальными стенками под подвижным поршнем находится водяной пар при температуре $t_0 = 90^\circ\text{C}$ и давлении $p_0 = 10$ кПа. Поршень при этом располагается на высоте $h_0 = 60$ см над дном сосуда. Наружное давление увеличивается, и поршень опускается. На какой высоте будет находиться поршень в тот момент, когда на стенках сосуда появится роса? Ответ запишите в см, с точностью до целого значения.



Подсказка 1: Выпадение росы означает начало конденсации пара.

Подсказка 2: Конденсация начнется, когда давление пара достигнет $p_{нас}(t_0)$.

Подсказка 3: До начала конденсации вся вода в сосуде находится в газообразной форме, и к пару можно применить газовые законы.

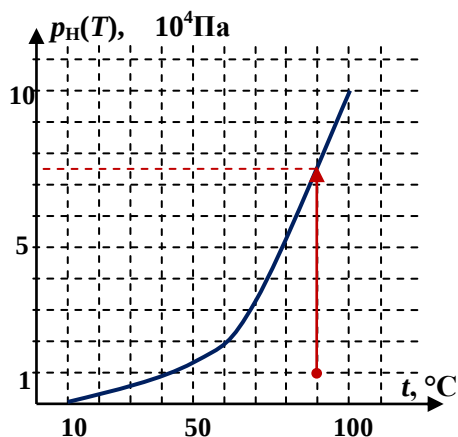
Решение:

Отметим начальную точку на графике, и, двигаясь по изотерме (красная линия) найдем, что давление пара станет равно давлению насыщенного пара при этой температуре

$p_{нас}(t_0) \approx 75$ кПа, когда оно возрастет в $\frac{p_{нас}(t_0)}{p_0} \approx 7,5$ раза. Именно в этот момент при

сжатии пара начнется его конденсация (выпадет роса). До этого момента вся вода в сосуде находится в газообразной форме, и к пару можно применить газовые законы. По закону Бойля-Мариотта находим, что для увеличения давления пара в 7,5 раза при изотермическом сжатии нужно во столько же раз уменьшить его объем. Для цилиндра это означает, что нужно

в 7,5 раза уменьшить его высоту. Итак, $h = \frac{p_0}{p_{нас}(t_0)} h_0 \approx 8$ см.



Ответ: 8.

Задача 3 (2 балла) [пар, конденсация, относительная влажность]

В сосуде с гладкими вертикальными стенками под подвижным поршнем находится водяной пар с температурой $t_0 = 100^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $r_0 = 40\%$. Внешнее давление увеличивают, и поршень опускается. Температуру при этом поддерживают неизменной. Каким станет давление пара в сосуде к тому моменту, когда его объем уменьшится в 4 раза по сравнению с первоначальным? Ответ дайте в килопаскалях, с точностью до целого значения. Нормальное атмосферное давление $p_A \approx 101$ кПа.

Подсказка 1: Вначале давление в сосуде равнялось $p_0 = r_0 p_A \approx 40,4 \text{ кПа}$, поскольку нормальное атмосферное давление равно давлению насыщенного пара воды при $t_0 = 100^\circ\text{C}$.

Подсказка 2: Если бы пар при уменьшении объема в 4 раза не начал конденсироваться, то давление пара увеличилось бы в 4 раза по сравнению с первоначальным.

Решение:

Вначале давление в сосуде равнялось $p_0 = r_0 p_A \approx 40,4 \text{ кПа}$, поскольку нормальное атмосферное давление равно давлению насыщенного пара воды при $t_0 = 100^\circ\text{C}$. Если бы пар при уменьшении объема в 4 раза не начал конденсироваться, то из закона Бойля-Мариотта (как и из уравнения Менделеева-Клапейрона) следовало бы, что давление пара увеличилось бы в 4 раза по сравнению с первоначальным. Но в этом случае оно стало бы равно $p = 4r_0 p_A \approx 161,6 \text{ кПа}$ при той же температуре $t_0 = 100^\circ\text{C}$. Но это значение больше, чем давление насыщенного пара воды при этой температуре ($p_A \approx 101 \text{ кПа}$), а в равновесном состоянии так быть не может! Значит, на самом деле к моменту, когда объем уменьшился в три раза, конденсация уже начнется, и давление пара будет равно $p_A \approx 101 \text{ кПа}$.

Ответ: 101.

Задача 4 (3 балла) [пар, конденсация, относительная влажность]

В сосуде с гладкими вертикальными стенками находится $m_0 = 40 \text{ г}$ воды под подвижным поршнем. Когда, удерживая поршень на постоянной высоте, сосуд с содержимым нагрели до температуры $t_0 = 100^\circ\text{C}$, вся вода испарилась, и относительная влажность образовавшегося пара стала равна $r_0 = 40\%$. Затем поршень плавно опускают вниз, поддерживая температуру неизменной. Сколько жидкой воды будет в сосуде к тому моменту, когда его объем уменьшится в 4 раза по сравнению с первоначальным? Ответ дайте в граммах, с точностью до целого значения. Нормальное атмосферное давление $p_A \approx 101 \text{ кПа}$.

Подсказка 1: Начальное давление пара в сосуде равнялось $p_0 = r_0 p_A$, и для начала конденсации это давление нужно увеличить до p_A .

Подсказка 2: В соответствии с законом Бойля-Мариотта, для этого нужно уменьшить объем сосуда V_0 от до rV_0 .

Подсказка 3: При дальнейшем сжатии плотность пара равна плотности насыщенного водяного пара, то есть неизменна вместе с температурой.

Решение:

Пусть V_0 – начальный объем сосуда. Начальное давление пара в сосуде равнялось $p_0 = r_0 p_A$, поскольку нормальное атмосферное давление равно давлению насыщенного пара воды при $t_0 = 100^\circ\text{C}$. Для начала конденсации это давление нужно увеличить до p_A , то есть в

$\frac{p_A}{r_0 \cdot p_A} = \frac{1}{r_0}$ раз. В соответствии с законом Бойля-Мариотта, для этого нужно уменьшить

объем сосуда V_0 от до $r_0 V_0$. При дальнейшем сжатии до объема $\frac{V_0}{4} < r_0 V_0$ плотность пара равна плотности насыщенного водяного пара, то есть неизменна вместе с температурой.

Значит, масса пара уменьшится до $m = \frac{V_0}{4} \frac{1}{r_0 V_0} m_0 = \frac{m_0}{4r_0}$. В результате масса

сконденсировавшейся воды $m_{\text{жс}} = m_0 - m = \frac{4r_0 - 1}{4r_0} m_0 = \frac{3}{8} m_0 = 15 \text{ г}$.

Ответ: 15.

Задача 5 (4 балла) [влажный воздух, относительная влажность]

В гладком вертикальном цилиндре под невесомым поршнем площадью $S = 0,01 \text{ м}^2$ находится воздух при температуре $t = 100^\circ\text{C}$ и относительной влажности $r = 20\%$. Какую массу m

песка нужно медленно насыпать на поршень, чтобы на стенках цилиндра выступила роса? При расчетах считайте температуру воздуха в цилиндре постоянной, наружное давление равным нормальному атмосферному $p_A \approx 10^5$ Па, ускорение свободного падения равным $g \approx 10$ м/с². Ответ дайте в килограммах, с точностью до целого значения.

Подсказка 1: Давление влажного воздуха в цилиндре складывается из парциальных давлений сухого воздуха и паров воды: $p = p_v + p_n$, причем $p_n = r p_A$.

Подсказка 2: Так как поршень невесом, в начальном состоянии это давление равно p_A .

Подсказка 3: В конечном состоянии давление влажного воздуха в цилиндре $p' = p_A + \frac{mg}{S}$.

Решение:

Давление влажного воздуха в цилиндре складывается из парциальных давлений сухого воздуха и паров воды: $p = p_v + p_n$, причем $p_n = r p_{\text{нп}}$. Давление насыщенных паров воды $p_{\text{нп}}$ при температуре $t = 100^\circ\text{C}$ равно нормальному атмосферному давлению, т.е. $p_{\text{нп}} = p_A$. Так как поршень невесом, в начальном состоянии давление в цилиндре равно атмосферному давлению p_A . Поэтому исходные парциальные давления сухого воздуха и паров воды равны соответственно $p_v = (1-r)p_A$ и $p_n = r p_A$. Для того чтобы выступила роса, необходимо увеличить парциальное давление паров воды до величины p_A , чего можно добиться, уменьшив объем паров в $\frac{1}{r}$ раз. По закону Бойля-Мариотта во столько же раз должно возрасти давление влажного воздуха в цилиндре. Из условия равновесия поршня в конечном состоянии следует равенство $p' = \frac{p_A}{r} = p_A + \frac{mg}{S}$. Отсюда $m = \frac{1-r}{rg} S p_A \approx 400$ кг.

Ответ: 400.

Задача 6 (5 баллов) [влажный воздух, относительная влажность]

В гладком вертикальном цилиндре под невесомым поршнем находится влажный воздух при температуре $t = 100^\circ\text{C}$. Наружное давление равно нормальному атмосферному p_A . На поршень медленно насыпают песок, и он опускается, оставаясь горизонтальным. К тому моменту, когда высота поршня над дном цилиндра стала в 3 раза меньше первоначальной, давление влажного воздуха в цилиндре достигло величины $p' = 2p_A$. Найдите относительную влажность воздуха в начальном состоянии. Ответ запишите в процентах, округлив до целого значения.

Подсказка 1: Так как поршень невесом, в начальном состоянии давление в цилиндре равно атмосферному давлению p_A , которое совпадает с давлением насыщенных паров воды при температуре $t = 100^\circ\text{C}$.

Подсказка 2: При уменьшении объема в 3 раза давление сухого воздуха возрастает в три раза.

Подсказка 3: Если бы пар не начал конденсироваться, его давление (а вместе с тем и общее давление в цилиндре) тоже возросло бы в 3 раза.

Решение:

Так как поршень невесом, в начальном состоянии давление в цилиндре равно атмосферному давлению p_A . Давление насыщенных паров воды при температуре $t = 100^\circ\text{C}$ равно нормальному атмосферному давлению, т.е. $p_{\text{нп}} = p_A$. Поэтому начальное давление водяных паров в цилиндре $p_n = r p_A$, где r – искомая начальная относительная влажность. Значит, начальное давление сухого воздуха в цилиндре $p_v = (1-r)p_A$. При уменьшении объема в 3 раза давление сухого воздуха возрастает в три раза, то есть $p'_v = 3(1-r)p_A$. Если бы пар не начал конденсироваться, его давление (а вместе с тем и общее давление в цилиндре) тоже возросло бы в 3 раза. Однако по условию оно возросло только в 2 раза. Значит, в конечном состоянии часть пара сконденсируется, и давление водяного пара будет равно давлению

насыщенного пара: $p'_\Pi = p_A$. Поскольку $p' = p'_\text{в} + p'_\Pi$, то

$$2p_A = 3(1-r)p_A + p_A \Rightarrow r = \frac{2}{3} \approx 67\%.$$

Ответ: 67.