

Статья №12. Насыщенные и ненасыщенные пары. Влажный воздух.

Теоретический материал.

Пар жидкости – газообразное состояние этой жидкости.

Над поверхностью жидкости всегда есть пары этой жидкости, которые образуются из-за её испарения. За счёт диффузии часть молекул пара возвращается обратно в жидкость.

Если число частиц, покидающих жидкость за единицу времени, больше числа частиц, возвращающихся в жидкость за тот же промежуток времени, то пар называется **ненасыщенным**.

Если число частиц, покидающих жидкость за единицу времени, равно числу частиц, возвращающихся в жидкость за тот же промежуток времени, то пар называется **насыщенным**. При этом говорят, что пар находится в **динамическом равновесии** со своей жидкостью. Такая ситуация возможна, если, например, ограничить объём над поверхностью воды. Тогда испарение может происходить только до определённого предела.

Если пар жидкости стал насыщенным, то большей концентрации молекул (значит, и давления) насыщенного пара при той же температуре достичь нельзя. Это означает, что давление насыщенного пара имеет единственное значение, зависящее только от его температуры. Если объём, занимаемый насыщенным паром, начать уменьшать при постоянной температуре, то пар начнёт конденсироваться в жидкость, так как концентрация его частиц и давление достигли предельного значения.

Чаще всего в задачах будут встречаться именно **водяные пары (далее – пары)**, поэтому ограничимся лишь их рассмотрением.

Пар обладает особенностью, заключающейся в том, что давление p_{II} пара не может превышать давление p_{III} насыщенного пара, т.е. $p_{II} \leq p_{III}$.

Давление p_{III} насыщенного пара зависит только от его температуры T . Его значение при различных температурах можно найти в справочных таблицах. Например, $p_{III} = p_0$ при $T = 100^{\circ}C$, где p_0 – нормальное атмосферное давление ($p_0 = 10^5 \text{ Па}$).

При $p_{II} < p_{III}$ пар является **ненасыщенным**, а при $p_{II} = p_{III}$ пар является **насыщенным**. Для пара вводится понятие относительной влажности $\varphi = \frac{p_{II}}{p_{III}}$, являющееся степенью его насыщенности. Чем ближе пар к насыщению, тем ближе к единице его относительная влажность. Для ненасыщенного пара $\varphi < 1$, для насыщенного – $\varphi = 1$.

Во всех процессах пар можно рассматривать как трёхатомный газ. Следовательно, число i степеней свободы у молекул пара равно 6, его молярная теплоёмкость C_V при постоянном объёме равна $3R$, внутренняя энергия U пара равна $3\nu RT$, где ν – количество моль пара.

Рассмотрим некоторый объём пара, запёртый в сосуде под поршнем. В различных процессах отвода и подвода тепла ненасыщенный пар ведёт себя как обычный газ. Масса m_{II} ненасыщенного пара не изменяется ($m_{II} = const$), в то время как для насыщенного пара она может изменяться (например, может происходить конденсация пара в воду). Поэтому, для ненасыщенного пара справедливы законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Шарля, а для насыщенного – нет.

Влажный воздух – смесь сухого воздуха и пара, где сухой воздух – обычный газ (или смесь газов) без особенностей.

Также для влажного воздуха вводится понятие относительной влажности. **Относительной влажностью φ воздуха** называется относительная влажность содержащегося в нём пара, т.е. $\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{нп}}}$, где $p_{\text{п}}$ – давление пара, $p_{\text{нп}}$ – давление насыщенного пара при данной температуре T .

По закону Дальтона давление влажного воздуха $p_{\text{ВВ}}$ равно сумме давления $p_{\text{СВ}}$ сухого воздуха и давления $p_{\text{п}}$ пара, т.е. $p_{\text{ВВ}} = p_{\text{СВ}} + p_{\text{п}}$.

Рассмотрим примеры решения задач.

Примеры решения задач.

ВОДЯНОЙ ПАР

Пример 1.

В цилиндре под поршнем находится ненасыщенный водяной пар с относительной влажностью 75% при температуре 100°C . Поршень вдвигают в цилиндр так, что объём под поршнем уменьшается в 1,5 раза при неизменной температуре. Чему станет равно давление пара (в кПа)?

Решение:

При температуре 100°C давление насыщенного пара равно нормальному атмосферному давлению, т.е. 100кПа . Первоначально давление пара равнялось 75кПа . После уменьшения объёма в $4/3$ раза давление пара станет равным 100кПа , и пар станет насыщенным. Дальнейшее уменьшение объёма будет происходить за счёт уменьшения массы пара – пар будет конденсироваться в воду. Давление при этом будет оставаться неизменным, т.к. пар является насыщенным.

Ответ: 100кПа .

Пример 2.

В цилиндрическом сосуде под поршнем находится $\nu = 2$ моль водяного пара при давлении p . Давление насыщенного водяного пара при этой температуре равно $2p$. Поршень вдвигают в цилиндр так, что объём под поршнем уменьшается в 4 раза при неизменной температуре. Найти массу m образовавшейся при этом воды.

Решение:

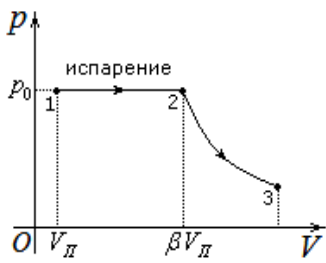
При уменьшении объёма пара в 2 раза его давление увеличивается от p до $2p$ и пар становится насыщенным, следовательно, дальнейшее уменьшение объёма происходит при постоянном давлении $2p$ и часть пара конденсируется. Поскольку в процессе конденсации объём уменьшается в 2 раза, масса образовавшейся воды равна половине начальной массы пара. Итак: $m = 0,5m_{\text{пара}} = 0,5\mu\nu = 18\text{г}$, где $\mu = 18\text{г/моль}$.

Ответ: $m = 0,5\mu\nu = 18\text{г}$.

Пример 3. [МФИ 1996]

В сосуде находится водяной пар и вода при температуре $T = 100^{\circ}\text{C}$. В процессе изотермического расширения вода начинает испаряться. К моменту, когда она вся испарилась, объём пара увеличился в $\beta = 10$ раз. Найти отношение объёмов пара и воды в начале опыта.

Решение:



Поскольку в сосуде находится вода, пар является насыщенным. Давление насыщенного пара при $T = 100^{\circ}\text{C}$ равно $p_0 = 10^5 \text{ Па}$. Пока происходит испарение воды (процесс 1-2 на pV -диаграмме), пар насыщен и его давление не изменяется. Пусть V_{II} – объём пара в начале опыта, m_{II} – масса пара в начале опыта, V_B – объём воды в начале опыта, ρ_B – плотность воды, μ – молярная масса пара ($\mu = 18 \text{ г/моль}$). Предположим, что $V_B \ll V_{II}$. Уравнения Менделеева-Клапейрона

для пара в состояниях 1 и 2: $p_0 V_{II} = \frac{m_{II}}{\mu} RT$ и $p_0 \beta V_{II} = \frac{m_{II} + \rho_B V_B}{\mu} RT$, откуда $p_0 V_{II} (\beta - 1) = \frac{\rho_B V_B}{\mu} RT$,

следовательно, $\frac{V_{II}}{V_B} = \frac{\rho_B RT}{\mu p_0 (\beta - 1)} \approx 191$. Видим, что $V_B \ll V_{II}$, значит, предположение верно.

Ответ: $\frac{V_{II}}{V_B} = \frac{\rho_B RT}{\mu p_0 (\beta - 1)} \approx 191$.

Пример 4.

Вода и водяной пар находятся в цилиндре под поршнем при температуре $T = 110^{\circ}\text{C}$. Вода занимает при этом 0,1% от объёма цилиндра. При медленном увеличении объёма при неизменной температуре вода начинает испаряться. К моменту, когда она вся испарилась, пар совершил работу $A = 177 \text{ Дж}$, а объём, который он занимал, увеличился на $\Delta V = 1,25 \text{ л}$. Найти давление, при котором производился опыт. Сколько воды и пара было в цилиндре в начальном состоянии?

Решение:

Процесс испарения воды происходит при постоянном давлении, т.к. пар при этом остается насыщенным. Таким образом, работа A , совершённая паром к моменту испарения всей воды, равна $p_{\text{нп}} \Delta V$, следовательно,

давление пара во время опыта $p_{\text{нп}} = \frac{A}{\Delta V} = 1,5 \text{ атм}$ (1). В этом процессе вся вода испарилась и, следовательно, заняла объём ΔV . Найдём количество испарившейся воды m_B . Из уравнений состояния для насыщенного пара:

$p_{\text{нп}} \Delta V = \frac{m_B}{\mu} RT$ (2). Из соотношений (1) и (2) следует, что $A = \frac{m_B}{\mu} RT$, откуда $m_B = \frac{A \mu}{RT} = 1 \text{ г}$. Значит,

начальный объём цилиндра $V = 1 \text{ л}$. Из уравнения состояния для насыщенного пара: $p_{\text{нп}} (V - V_B) = \frac{m_{II}}{\mu} RT$.

Поскольку $V_B \ll V$, то $p_{\text{нп}} (V - V_B) \approx p_{\text{нп}} V$, значит, $p_{\text{нп}} V = \frac{m_{II}}{\mu} RT$, откуда $m_{II} = \frac{p_{\text{нп}} V \mu}{RT}$.

Итого: $m_{II} = \frac{V \mu}{RT} \cdot \frac{A}{\Delta V}$.

Ответ: $p_{\text{нп}} = \frac{A}{\Delta V} = 1,5 \text{ атм}$, $m_B = \frac{A \mu}{RT} = 1 \text{ г}$, $m_{II} = \frac{V \mu}{RT} \cdot \frac{A}{\Delta V}$.

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Пример 5.

В цилиндре под поршнем находится воздух с относительной влажностью 40% при температуре $T = 100^\circ\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении. Найти давление воздуха в цилиндре после уменьшения объёма воздуха в 5 раз при неизменной температуре.

Решение:

Рассмотрим влажный воздух до сжатия. По условию давление влажного воздуха равно атмосферному давлению p_0 . Пар является ненасыщенным. Давление пара равно $0,4p_0$. По закону Дальтона давление сухого воздуха равно $0,6p_0$.

Рассмотрим влажный воздух после сжатия в 5 раз. Заметим, что при таком сжатии пар становится насыщенным, значит, давление пара станет равным p_0 . По закону Бойля-Мариотта давление сухого воздуха должно увеличиться в 5 раз и стать равным $3p_0$. По закону Дальтона давление влажного воздуха равно $4p_0$.

Ответ: $4p_0$.

Пример 6. [Пенкин М.А.]

В гладком вертикальном цилиндре под невесомым поршнем при температуре $T = 100^\circ\text{C}$ находится воздух с относительной влажностью $\varphi = 20\%$. На поршень медленно насыпают песок. Чему равна масса песка, насыпанного на поршень, когда объём цилиндра под поршнем уменьшился в 6 раз, а на стенках цилиндра выступила роса массой $m_B = 0,2 \text{ г}$? Температура в цилиндре поддерживается постоянной. Атмосферное давление $p_0 = 10^5 \text{ Па}$. Начальная высота поршня над дном $H = 2 \text{ м}$.

Решение:

Пусть V_0 – объём влажного воздуха до сжатия, S – площадь поперечного сечения цилиндра, μ – молярная масса пара ($\mu = 18 \text{ г/моль}$), m_{II} – масса пара до сжатия. При $T = 100^\circ\text{C}$ давление насыщенного пара равно $p_0 = 10^5 \text{ Па}$.

Рассмотрим влажный воздух до сжатия. Так как поршень неподвижен и невесом, то давление влажного воздуха равно атмосферному давлению p_0 . Пар является ненасыщенным. Давление пара равно $0,2p_0$. По закону Дальтона давление сухого воздуха равно $0,8p_0$.

Рассмотрим влажный воздух после сжатия в 6 раз. Так как поршень неподвижен и невесом, то давление влажного воздуха равно $p_0 + \frac{Mg}{S}$. Заметим, что пар при таком сжатии становится насыщенным, значит, давление пара равно p_0 . По закону Дальтона давление сухого воздуха равно $\frac{Mg}{S}$.

По закону Бойля-Мариотта для сухого воздуха давление сухого воздуха должно увеличиться в 6 раз и стать равным $4,8p_0$, следовательно, $4,8p_0 = \frac{Mg}{S}$, откуда $p_0 S = \frac{5}{24} Mg$ (1).

Уравнение состояния пара в начале и конце опыта даёт уравнения $0,2p_0 \cdot V_0 = \frac{m_{II}}{\mu} RT$ и $p_0 \cdot \frac{V_0}{6} = \frac{m_{II} - m_B}{\mu} RT$, откуда $\frac{1}{30} p_0 V_0 = \frac{m_B}{\mu} RT$. Поскольку $V_0 = S \cdot H$, то $\frac{1}{30} p_0 S \cdot H = \frac{m_B}{\mu} RT$ (2).

Из уравнений (1) и (2) получаем, что $\frac{1}{30} \cdot \frac{5}{24} Mg \cdot H = \frac{m_B}{\mu} RT$, откуда $M = \frac{144m_B RT}{\mu g H} \approx 253 \text{ кг}$.

Ответ: $M = \frac{144m_B RT}{\mu g H} \approx 253 \text{ кг}$, где $\mu = 18 \text{ г/моль}$.

Пример 7. [МФТИ 2003]

Влажный воздух находился в цилиндре под поршнем при температуре $T = 100^{\circ}\text{C}$ и давлении $p_1 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Если увеличить давление на поршень в $\beta = 2$ раза в изотермическом процессе, то объём, занимаемый воздухом, уменьшается в $\gamma = 2,5$ раза, а на стенках цилиндра выпадает роса. Найти начальную относительную влажность φ воздуха в цилиндре. Объёмом образовавшейся жидкости пренебречь.

Решение:

Если φ – начальная относительная влажность воздуха в цилиндре, то начальное давление сухого воздуха равно $p_1 - \varphi p_{\text{НП}}$, где $p_{\text{НП}} = 10^5 \text{ Па}$ – давление насыщенного пара в цилиндре при температуре 100°C . В случае выпадения росы пар становится насыщенным и давление сухого воздуха в цилиндре равно $p_2 - p_{\text{Н}}$, где p_2 – давление воздуха после сжатия ($p_2 = \beta \cdot p_1$). Для сухого воздуха при изменении давления в изотермическом процессе справедлив закон Бойля-Мариотта: $(p_1 - \varphi \cdot p_{\text{Н}}) \cdot V_1 = (p_2 - p_{\text{Н}}) \cdot V_2$, где V_1 и V_2 – начальный и конечный объёмы цилиндров ($V_1 = \gamma \cdot V_2$). Перепишем последнее уравнение в виде $(p_1 - \varphi \cdot p_{\text{Н}}) \cdot \gamma = (p_2 - p_{\text{Н}})$.

Отсюда $\varphi = \frac{p_1}{p_{\text{Н}}} \left(1 - \frac{\beta}{\gamma} \right) + \frac{1}{\gamma}$, $\varphi = 0,64$.

Ответ: $\varphi = \frac{p_1}{p_{\text{Н}}} \left(1 - \frac{\beta}{\gamma} \right) + \frac{1}{\gamma} = 64\%$.

Домашнее задание.

Задача 1. [МФТИ 2005] В цилиндре под поршнем находится ненасыщенный водяной пар при температуре $T = 100^{\circ}\text{C}$. В процессе изотермического сжатия конечный объём пара уменьшается в $k = 6$ раз по сравнению с первоначальным объёмом пара. При этом часть пара конденсируется, а объём образовавшейся воды составляет $\alpha = 1/1720$ часть от конечного объёма пара. Во сколько раз увеличилось давление пара в указанном процессе? Плотность воды $\rho = 1 \text{ г/см}^3$.

Задача 2. [МФТИ 2009] В цилиндре под поршнем находится воздух с относительной влажностью 70%. Объём цилиндра изотермически уменьшили в 10 раз. Какая часть водяного пара сконденсировалась? Объёмом жидкости в конечном состоянии можно пренебречь.

Задача 3. В цилиндре под поршнем находится воздух с относительной влажностью 50% при температуре 100°C и удвоенном нормальном атмосферном давлении. Найти давление воздуха в цилиндре уменьшения объёма воздуха в 3 раза при неизменной температуре.

Задача 4. В гладком вертикальном цилиндре под невесомым поршнем при температуре $T = 100^{\circ}\text{C}$ находится воздух с относительной влажностью $\varphi = 20\%$. Какую массу песка нужно медленно насыпать на поршень площадью $S = 0,01 \text{ м}^2$, чтобы на стенках цилиндра выступила роса? Температура в цилиндре поддерживается постоянной. Атмосферное давление $p_0 = 10^5 \text{ Па}$.

16 декабря 2009 г.

Межвузовский центр воспитания и развития
 талантливейшей молодежи в области
 естественно-математических наук
 "Физтех-центр"

Составители: Пенкин М.А., Шувалов Н.Д., Беяков О.Е.

E-mail: abitu@phystech.edu, fmicky@gmail.com

Сайт: www.abitu.ru