

Насыщенный пар

Темы кодификатора ЕГЭ: насыщенные и ненасыщенные пары, влажность воздуха.

Если открытый стакан с водой оставить на долгое время, то в конце концов вода полностью улетучится. Точнее — испарится. Что такое испарение и почему оно происходит?

Испарение и конденсация

При данной температуре молекулы жидкости обладают разными скоростями. Скорости большинства молекул находятся вблизи некоторого среднего значения (характерного для этой температуры). Но попадаются молекулы, скорости которых значительно отличаются от средней как в меньшую, так и большую сторону.

На рис. 1 изображён примерный график распределения молекул жидкости по скоростям. Голубым фоном показано то самое большинство молекул, скорости которых группируются около среднего значения. Красный «хвост» графика — это небольшое число «быстрых» молекул, скорости которых существенно превышают среднюю скорость основной массы молекул жидкости.

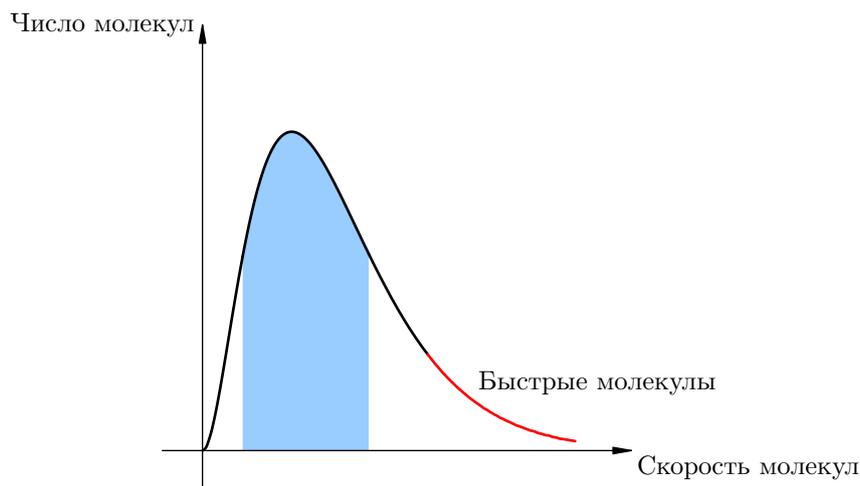


Рис. 1. Распределение молекул по скоростям

Когда такая весьма быстрая молекула окажется на свободной поверхности жидкости (т. е. на границе раздела жидкости и воздуха), кинетической энергии этой молекулы может хватить на то, чтобы преодолеть силы притяжения остальных молекул и вылететь из жидкости. Данный процесс и есть *испарение*, а молекулы, покинувшие жидкость, образуют *пар*.

Итак, *испарение* — это процесс превращения жидкости в пар, происходящий на свободной поверхности жидкости¹.

Может случиться, что через некоторое время молекула пара вернётся обратно в жидкость. Процесс перехода молекул пара в жидкость называется *конденсацией*. Конденсация пара — процесс, обратный испарению жидкости.

¹При особых условиях превращение жидкости в пар может происходить по всему объёму жидкости. Данный процесс вам хорошо известен — это *кипение*.

Динамическое равновесие

А что будет, если сосуд с жидкостью герметично закрыть? Плотность пара над поверхностью жидкости начнёт увеличиваться; частицы пара будут всё сильнее мешать другим молекулам жидкости вылетать наружу, и скорость испарения станет уменьшаться. Одновременно начнёт увеличиваться скорость конденсации, так как с возрастанием концентрации пара число молекул, возвращающихся в жидкость, будет становиться всё больше.

Наконец, в какой-то момент скорость конденсации окажется равна скорости испарения. Наступит *динамическое равновесие* между жидкостью и паром: за единицу времени из жидкости будет вылетать столько же молекул, сколько возвращается в неё из пара. Начиная с этого момента количество жидкости перестанет убывать, а количество пара — увеличиваться; пар достигнет «насыщения».

Насыщенный пар — это пар, который находится в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью. Пар, не достигший состояния динамического равновесия с жидкостью, называется ненасыщенным.

Давление и плотность насыщенного пара обозначаются p_n и ρ_n . Очевидно, p_n и ρ_n — это максимальные давление и плотность, которые может иметь пар при данной температуре. Иными словами, давление и плотность насыщенного пара всегда превышают давление и плотность ненасыщенного пара.

Свойства насыщенного пара

Оказывается, что состояние насыщенного пара (а ненасыщенного — тем более) можно приближённо описывать уравнением состояния идеального газа (уравнением Менделеева — Клапейрона). В частности, имеем приближённое соотношение между давлением насыщенного пара и его плотностью:

$$p_n = \frac{\rho_n}{\mu} RT. \quad (1)$$

Это весьма удивительный факт, подтверждаемый экспериментом. Ведь по своим свойствам насыщенный пар существенно отличается от идеального газа. Перечислим важнейшие из этих отличий.

1. *При неизменной температуре плотность насыщенного пара не зависит от его объёма.*

Если, например, насыщенный пар изотермически сжимать, то его плотность в первый момент возрастёт, скорость конденсации превысит скорость испарения, и часть пара конденсируется в жидкость — до тех пор, пока вновь не наступит динамическое равновесие, в котором плотность пара вернётся к своему прежнему значению.

Аналогично, при изотермическом расширении насыщенного пара его плотность в первый момент уменьшится (пар станет ненасыщенным), скорость испарения превысит скорость конденсации, и жидкость будет дополнительно испаряться до тех пор, пока опять не установится динамическое равновесие — т. е. пока пар снова не станет насыщенным с прежним значением плотности.

2. *Давление насыщенного пара не зависит от его объёма.*

Это следует из того, что плотность насыщенного пара не зависит от объёма, а давление однозначно связано с плотностью уравнением (1).

Как видим, закон Бойля — Мариотта, справедливый для идеальных газов, для насыщенного пара не выполняется. Это и не удивительно — ведь он получен из уравнения Менделеева — Клапейрона в предположении, что масса газа остаётся постоянной.

3. При неизменном объёме плотность насыщенного пара растёт с повышением температуры и уменьшается с понижением температуры.

Действительно, при увеличении температуры возрастает скорость испарения жидкости. Динамическое равновесие в первый момент нарушается, и происходит дополнительное испарение некоторой части жидкости. Пара будет прибавляться до тех пор, пока динамическое равновесие вновь не восстановится.

Точно так же при понижении температуры скорость испарения жидкости становится меньше, и часть пара конденсируется до тех пор, пока не восстановится динамическое равновесие — но уже с меньшим количеством пара.

Таким образом, при изохорном нагревании или охлаждении насыщенного пара его масса меняется, поэтому закон Шарля в данном случае не работает. Зависимость давления насыщенного пара от температуры уже не будет линейной функцией.

4. Давление насыщенного пара растёт с температурой быстрее, чем по линейному закону.

В самом деле, с увеличением температуры возрастает плотность насыщенного пара, а согласно уравнению (1) давление пропорционально произведению плотности на температуру.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры является экспоненциальной (рис. 2). Она представлена участком 1–2 графика. Эту зависимость нельзя вывести из законов идеального газа.

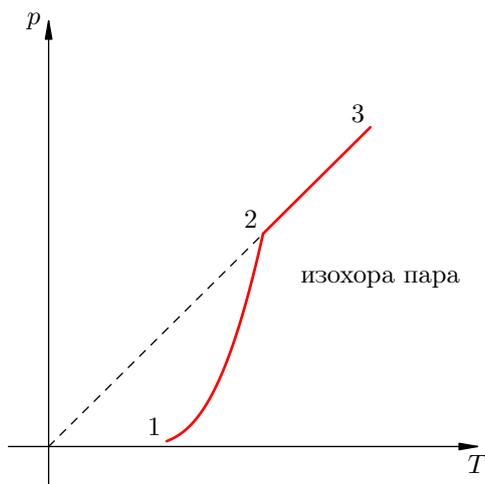


Рис. 2. Зависимость давления пара от температуры

В точке 2 вся жидкость испаряется; при дальнейшем повышении температуры пар становится ненасыщенным, и его давление растёт линейно по закону Шарля (участок 2–3).

Вспомним, что линейный рост давления идеального газа вызван увеличением интенсивности ударов молекул о стенки сосуда. В случае нагревания насыщенного пара молекулы начинают бить не только сильнее, но и чаще — ведь пара становится больше. Одновременным действием этих двух факторов и вызван экспоненциальный рост давления насыщенного пара.

Влажность воздуха

Воздух, содержащий водяной пар, называется *влажным*. Чем больше пара находится в воздухе, тем выше *влажность* воздуха.

Абсолютная влажность — это парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе (т. е. давление, которое водяной пар оказывал бы сам по себе, в отсутствие других газов). Иногда абсолютной влажностью называют также плотность водяного пара в воздухе.

Относительная влажность воздуха φ — это отношение парциального давления водяного пара в нём к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре. Как правило, это отношение выражают в процентах:

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{н}}} \cdot 100\%.$$

Из уравнения Менделеева-Клапейрона (1) следует, что отношение давлений пара равно отношению плотностей. Так как само уравнение (1), напомним, описывает насыщенный пар лишь приближённо, мы имеем приближённое соотношение:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100\%.$$

Одним из приборов, измеряющих влажность воздуха, является *психрометр*. Он включает в себя два термометра, резервуар одного из которых завёрнут в мокрую ткань. Чем ниже влажность, тем интенсивнее идёт испарение воды из ткани, тем сильнее охлаждается резервуар «мокрого» термометра, и тем больше разность его показаний и показаний сухого термометра. По этой разности с помощью специальной психрометрической таблицы определяют влажность воздуха.