

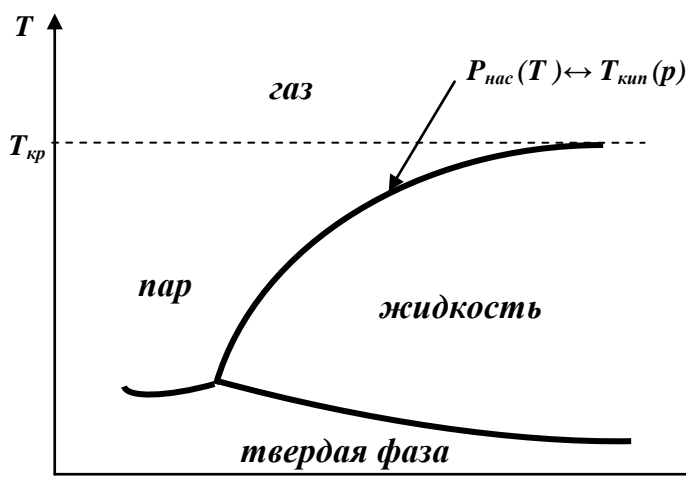
## 10-11 классы, подготовка к теоретическому туру

### олимпиады школьников «Робофест» по физике

#### Теоретический обзор к занятию к вводному занятию «Фазовые переходы. Пары и жидкости.».

Агрегатное состояние (твердое, жидкое или газообразное) заданного вещества при заданных условиях определяется движением и взаимодействиями молекул, из которых это вещество состоит. Движение молекул определяется температурой, а взаимодействие молекул зависит от расстояния между ними, то есть от плотности вещества. Поэтому для каждого конкретного *равновесного* состояния вещества задание температуры и плотности однозначно определяет и его агрегатное состояние. Часто вместо плотности удобно следить за давлением, при котором находится вещество – ведь уравнение состояния вещества обычно позволяет связать плотность с давлением и температурой. Например, для газов, близких к идеальному, из уравнения Менделеева-Клапейрона  $pV = \frac{m}{\mu}RT$  можно найти, что  $\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu p}{RT}$ . Таким

образом, агрегатное состояние заданного вещества (часто используют также термин «фаза» данного вещества) обычно определяется давлением и температурой. Например, вода при температуре  $+10^{\circ}C$  и давлении  $10^5 Pa$  должна (в устойчивом равновесном состоянии) быть жидкой, а при температуре  $150^{\circ}C$  и том же давлении – газообразной. Если на координатной плоскости «давление-температура» выделить области, отвечающие каждому из возможных агрегатных состояний, мы получаем *фазовую диаграмму* вещества в координатах  $p - T$ :

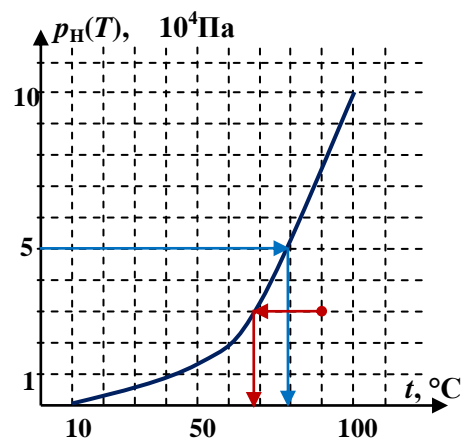


Ясно, что выделенные области будут соприкасаться по своим границам, точки которых отмечают состояния *фазового равновесия*, в которых возможно сосуществование двух или даже более фаз (на представленной диаграмме можно заметить точку, в которой сходятся кривые фазового равновесия – как видно, в ней возможно сосуществование трех фаз; такие точки называют «*тройными точками*»). Все состояния фазового равновесия отвечают совершенно определенным комбинациям значений давления и температуры, поэтому по одному из них определяются другое. В качестве примера снова обратим внимание на воду, для которой при нормальном атмосферном давлении  $p_A \approx 101 kPa$  равновесное сосуществование жидкой и газообразной фаз возможно только при температуре кипения  $t_K = 100^{\circ}C$ . Отметим: равенство здесь точное, поскольку это значение температуры кипения воды при нормальном атмосферном давлении входит в **определение** шкалы Цельсия. Для произвольного вещества кривая, проходящая через точки равновесия жидкой и газообразной фазы, является графиком зависимости *температуры кипения* жидкости от давления. На этой диаграмме можно выделить так называемую критическую температуру, выше которой кривая равновесия этих фаз не поднимается. Это означает, что при температурах выше критической вещество нельзя перевести в жидкую фазу изотермическим сжатием – при любом давлении свойства вещества будут качественно отличаться от свойств жидкостей. Будем называть далее *газом* газообразное состояние вещества при температуре выше критической (то есть газ

нельзя конденсировать, не охлаждая его), а **паром** – газообразное состояние вещества при температуре ниже критической (пар можно конденсировать, просто сжимая его). Пар, находящийся в равновесии с жидкой фазой того же вещества, называют *насыщенным*. Значения параметров состояния для насыщенного пара определяются условием фазового равновесия, поэтому при заданной температуре давление насыщенного пара данного вещества имеет строго определенное значение. Графиком зависимости  $p_{нас}(T)$  является все та же кривая равновесия жидкой и газообразной фазы на фазовой диаграмме. Можно сделать вывод, что нам без таблиц известно давление насыщенного пара воды при температуре  $t_K = 100^\circ C$ , так как из определения шкалы Цельсия следует, что это в точности нормальное атмосферное давление  $p_A \approx 101 \text{ кПа}$ .

**Пример 1:** На рисунке изображен график зависимости давления насыщенного пара воды от температуры. Найдите:

- Температуру кипения воды при давлении  $p_1 = 50 \text{ кПа}$ .
- Температуру  $t_2$ , при которой в сосуде с гладкими вертикальными стенками, содержащим водяной пар под подвижным поршнем, выпадет роса, если в начальном состоянии – при температуре  $t_0 = 90^\circ C$  – давление пара равнялось  $p_0 = 30 \text{ кПа}$ . Давление над поршнем неизменно.



**Решение:** Так как этот график одновременно является графиком зависимости температуры кипения от давления, то ответ на вопрос (а) находится непосредственно из графика (синие линии):  $t_K(p_1) \approx 79^\circ C$ . В вопросе (б) нужно обратить внимание, что при указанных условиях давление пара в сосуде определяется внешним давлением и весом поршня, то есть оно не будет меняться (охлаждение пара происходит изобарически). Проводя изобару от начальной точки до кривой равновесия, находим точку выпадения росы (красные линии)  $t_2 \approx 58^\circ C$ .

**Пример 2:** В сосуде с гладкими вертикальными стенками под подвижным поршнем находится водяной пар с температурой  $t_0 = 100^\circ C$  и давлением  $p_0 = 50 \text{ кПа}$ . 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 три раза по сравнению с первоначальным?

**Решение:** Если бы пар при таком сжатии не начал конденсироваться, то из закона Бойля-Мариотта (как и из уравнения Менделеева-Клапейрона) следовало бы, что давление пара увеличилось в три раза. Но в этом случае оно стало бы равно  $150 \text{ кПа}$  при той же температуре  $t_0 = 100^\circ C$ . 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 (нетрудно догадаться, что она начнется в тот момент, когда давление пара достигнет  $p_A$ , то есть при уменьшении объема в  $\frac{p_A}{p_0} \approx 2$  раза). Ясно, что конденсация не закончилась (для того, чтобы

весь пар превратить в жидкую воду, нужно от начала конденсации уменьшить его объем более чем в 1700 раз, так как нужно довести плотность вещества до плотности жидкой воды). Поэтому в конечном состоянии под поршнем находятся в равновесии пар и вода при  $t_0 = 100^\circ C$ . Значит, пар является насыщенным, и его давление равно  $p_A \approx 101 \text{ кПа}$ .

При нарушении равновесия фаз в физических системах происходят *фазовые переходы*. Так называют процессы, в которых вещества изменяют свои агрегатные состояния. В школьном курсе подробно рассматриваются три агрегатных состояния вещества (газообразное, жидкое и твердое) и переходы между ними. В этом занятии мы уделим особое внимание равновесию

между паром и жидкостью и переходам между ними. Из материалов занятия, посвященного *уравнению теплового баланса*, мы знаем, что каждому фазовому переходу присуща определенная энергетика: при изменении агрегатного состояния определенной массой (или определенным количеством вещества) происходит выделение или поглощение определенного количества тепловой энергии (поскольку при переходе изменяется энергия молекул). Этот эффект характеризуется *удельной* (на единицу массы) или *молярной* (на 1 моль) *теплотой перехода*.

**Пример 3:** Пусть в примере 2 масса водяного пара в сосуде равнялась  $m = 60$  г. Какое количество теплоты было отведено от сосуда от момента начала конденсации пара до того момента, когда объем пара стал в три раза меньше первоначального? Удельная теплота парообразования воды равна  $\lambda_r \approx 2260$  Дж/г.

**Решение:** В момент начала конденсации, когда, согласно решению примера 2, объем был равен половине первоначального, жидкой воды в сосуде еще не было, а пар стал насыщенным. Так как далее температура не изменялась, то плотность пара, равная плотности насыщенного пара при данной температуре, тоже не изменялась, а объем пара до окончания сжатия уменьшается еще примерно в  $\frac{3}{2} \approx 1,5$  раза (объем образовавшейся воды очень маленький, и им можно пренебречь). Значит, масса пара уменьшилась в полтора раза (стала равна двум третям от начальной). Поэтому сконденсировалась одна треть от первоначальной массы пара. Для сохранения температуры сосуда с паром выделяющуюся при этом теплоту конденсации необходимо забрать от сосуда. Значит, количество теплоты  $Q = \frac{m}{3} \lambda_r \approx 45200$  Дж, или 45,2 кДж.

Для описания состояния паров часто используют характеристики, называемые *абсолютной* и *относительной влажностью*. Абсолютная влажность  $D$  характеризует содержание газообразной формы вещества в единице объема и равна плотности пара данного вещества

$$D \equiv \rho_{\text{пара}} = \frac{m_{\text{пара}}}{V} = \frac{\mu p_{\text{пара}}}{RT},$$

Относительная влажность  $r$  характеризует степень насыщенности паров данного вещества и равна отношению давления пара к давлению насыщенного пара этого вещества при данной температуре:

$$r \equiv \frac{p_{\text{пара}}}{p_{\text{нас}}(T)} = \frac{\rho_{\text{пара}}}{\rho_{\text{нас}}(T)}.$$

Из связи плотности с давлением и температурой можно заметить, что для паров, похожих по свойствам на идеальный газ, можно считать относительную влажность и как отношение плотности пара к плотности насыщенного пара при данной температуре. Относительную влажность часто выражают в процентах. Отметим сразу, что эти понятия (несмотря на присутствие слова «влажность») могут относиться не только к парам воды, но и к парам любого вещества. Довольно часто на практике и в задачах возникает необходимость анализа состояний систем, представляющих из себя смесь газа (вещества, для которого рассматриваемые температуры выше критической), пара и (возможно) жидкости. Наиболее типичным примером такой «парогазовой смеси» является **влажный воздух** – смесь сухого воздуха и водяного пара при «бытовых» температурах. Такие температуры оказываются выше критической для основных компонент сухого воздуха (азота и кислорода), и поэтому они во всех процессах сохраняют газообразное состояние. Для воды эти температуры ниже критической, и поэтому при сжатии или охлаждении может начаться *конденсация* пара, а при расширении и нагревании – *испарение* жидкости. Для газов во всех состояниях можно использовать уравнение состояния идеального газа – уравнение Менделеева-Клапейрона, в то время как для паров это можно делать только до достижения насыщения. Параметры состояния насыщенного пара определяются из условия фазового равновесия. В частности, при изотермическом сжатии насыщенного пара его давление не растет, а остается постоянным. При этом масса газа уменьшается благодаря конденсации – вплоть до того момента, когда весь пар сконденсируется. Отметим, что задание относительной влажности

пара при известной температуре фактически означает задания давления этого пара (так как давление насыщенного пара для заданного вещества – некоторая фиксированная функция температуры).

**Пример 4:** Найдите давление водяного пара с относительной влажностью 60% при температуре  $100^{\circ}\text{C}$ .

**Решение:** В соответствии с определением относительной влажности, давление пара  $p = r \cdot p_{\text{нас}}(t)$ . Мы знаем, что давление насыщенного пара воды при температуре  $t_K = 100^{\circ}\text{C}$  равно нормальному атмосферному  $p_{\text{нас}}(t_K) = p_A \approx 101\text{кПа}$ . Поэтому искомое давление  $p = 0,6 \cdot p_A \approx 60,6\text{кПа}$ .

Задачи, посвященные изучению смесей пара, газа и жидкости, решаются как обычные задачи, посвященные газовым законам, термодинамике или тепловому балансу, но с использованием понимания особенностей поведения паров до и после достижения насыщения. К системе уравнений при этом обычно добавляются соотношения, следующие из определений абсолютной или (и) относительной влажностей.

**Пример 5:** В комнате объемом  $V = 50\text{м}^3$  при температуре  $t = 27^{\circ}\text{C}$  относительная влажность воздуха равнялась  $r_1 = 30\%$ . Сколько килограмм воды нужно испарить в этой комнате, чтобы при той же температуре относительная влажность воздуха стала равна  $r_2 = 30\%$ ? Давление насыщенного пара воды при этой температуре  $p_{\text{нас}}(t) \approx 15\text{кПа}$ .

**Решение:** Из уравнения Менделеева-Клапейрона  $pV = \frac{m}{\mu}RT$  можно выразить массу пара в

комнате через давление этого пара  $m = \frac{\mu p V}{RT}$ . Давление пара можно определить по

относительной влажности и давлению насыщенного пара  $p = r \cdot p_{\text{нас}}(t)$ . Поэтому

$m = r \frac{\mu p_{\text{нас}}(t)V}{RT}$ . Следовательно, увеличение массы водяного пара при увеличении

относительной влажности  $\Delta m = m_2 - m_1 = (r_2 - r_1) \frac{\mu p_{\text{нас}}(t)V}{RT} \approx 1,08\text{кг}$ .