

Общеобразовательная школа №1189 им. И.В. Курчатова

Фазовые переходы

Составитель: Бойченко А.М.
Пособие по физике, 10 класс
термодинамика, ч. 3
фазовые переходы

Москва 2008

Оглавление

3.1 Фазовые переходы.....	3
Удельная теплота парообразования.....	3
Удельная теплота плавления.....	4
Удельная теплота сгорания.....	5
Изотермы реального газа.....	5
Насыщенный, ненасыщенный пар.....	6
Зависимость $p(T)$ для насыщенного пара.....	7
Уравнение Ван-дер-Ваальса.....	8
Изотермы реального и ван-дер-ваальсовского газов.....	9
3.2 Диаграммы состояния.....	11
3.3 Влажность воздуха.....	13
Абсолютная влажность.....	14
Упругость водяного пара.....	14
Относительная влажность.....	14
Дефицит влажности.....	14
Точка росы.....	14
Гигрометры.....	15
Психрометры.....	16
Приложение. Характеристики насыщенного водяного пара.....	17
Примеры решения задач	18

3.1 Фазовые переходы

Вещества могут находиться в трех *агрегатных состояниях* – газообразном, жидком и кристаллическом (твердом). Однако, агрегатное состояние не характеризует полностью состояние вещества. Например, некоторые вещества имеют несколько кристаллических решеток (см. пособие по твердому телу). Чтобы иметь возможность различать большое разнообразие различных состояний вещества вводится более широкое понятие – *фаза*.

Фаза – термодинамически равновесное состояние вещества, отличающееся по физическим свойствам от других возможных равновесных состояний (фаз). Под фазовым переходом подразумевается переход вещества из одного состояния (фазы) в другое при изменении внешних условий – температуры, давления и т.п. и связан с качественными изменениями свойств вещества. При некоторых условиях возможно сосуществование нескольких фаз. На границе раздела фаз в таком случае непрерывно происходят процессы перехода из одной фазы в другую, компенсирующие друг друга. Такое равновесие фаз называется *динамическим*.

Удельная теплота парообразования. *Испарение* – это процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное (*пар*). В этом процессе происходит вырывание атомов или молекул из жидкости. В жидком состоянии атомы или молекулы вещества располагаются достаточно близко друг к другу, потенциальная энергия их взаимодействия отрицательна (см. пособие по газовым законам, а также рис. 1.1 этого пособия). Для вырывания молекул требуется энергия, т.е. испарение веществ сопровождается затратами энергии. Испарение, происходящее не только с поверхности жидкости, но и внутри жидкости называется *кипением*. Соответственно, температура, при которой происходит кипение, называется *температурой кипения*. Температура кипения зависит от внешнего давления. Затраты энергии при испарении характеризуют *удельной теплотой испарения* или *удельной теплотой парообразования* (при кипении) L – т.е. количеством теплоты, необходимым для превращения при постоянной температуре 1 кг жидкости в пар. Для испарения массы m вещества, следовательно, требуется количество теплоты

$$Q = Lm$$

Обратный процесс перехода газообразного состояния (*пара*) в жидкое называется *конденсацией*. При конденсации количество теплоты, наоборот, выделяется, причем количество теплоты, затрачиваемое для превращения при постоянной температуре жидкости в пар, равно выделяемому количеству теплоты при конденсации такого же количества вещества при той же температуре.

На границе раздела жидкости и пара непрерывно происходит испарение и конденсация. При динамическом равновесии жидкости и пара эти процессы компенсируют друг друга, при этом масса жидкости и масса пара не меняются

во времени. Давление паров при динамическом равновесии жидкости и пара называется *давлением насыщенных паров*. Кипение происходит при той температуре, при которой давление насыщенных паров равно внешнему давлению.

При непрерывном подводе к жидкости количества теплоты процессы испарения преобладают над процессами конденсации. При этом масса жидкости с течением времени уменьшается, температура жидкости увеличивается. Так будет продолжаться до тех пор (если к тому времени жидкость полностью не испарится), пока температура жидкости не станет равной температуре кипения. Далее температура жидкости не будет повышаться до тех пор, пока она полностью не выкипит, т.е. не превратится полностью в пар. При отводе теплоты от пара, его температура не будет уменьшаться ниже температуры кипения до тех пор, пока давление пара не станет равным давлению насыщенных паров при температуре кипения.

Удельная теплота испарения зависит от температуры (см. приложение). С повышением температуры она снижается. Температура, при которой удельная теплота испарения становится равной нулю, называется *критической* (см. также ниже п. насыщенный, ненасыщенный пар). При критической температуре жидкость и пар не различимы.

Процесс перехода вещества из твердого состояния в газообразное называется *сублимацией* (см. также ниже §3.3 (диаграммы состояния)).

Удельная теплота плавления. *Плавление* – это процесс перехода вещества из твердого (кристаллического) состояния в жидкое. Плавление происходит при определенной температуре, которая называется *температурой плавления*. Температура плавления зависит от внешнего давления. Наличие определенной температуры плавления – важный признак кристаллического строения твердых тел. По этому признаку их легко отличить от аморфных твердых тел (см. пособие по твердому телу), которые не имеют фиксированной температуры плавления. Аморфные твердые тела переходят в жидкое состояние постепенно, размягчаясь при повышении температуры.

Плавление характеризуется *удельной теплотой плавления* λ – т.е. количеством теплоты, необходимым для превращения 1 кг кристаллического вещества при температуре плавления в жидкость той же температуры. Для расплавления массы m вещества при температуре плавления, следовательно, требуется количество теплоты

$$Q = \lambda m$$

В процессе плавления температура вещества при подводе к нему тепла не увеличивается до тех пор, пока оно полностью не расплавится.

При остывании расплава температура вещества понижается, пока не станет равной температуре плавления. При дальнейшем отводе тепла температура не меняется до тех пор, пока вещество полностью не кристаллизуется. При этом количество теплоты, выделяющееся при превращении 1 кг расплава при температуре плавления в кристаллическое

состояние той же температуры равно удельной теплоте плавления. Т.е. количество теплоты, затрачиваемое на расплавление вещества при температуре плавления равно количеству теплоты, выделяющееся при его кристаллизации (при той же температуре (плавления)).

Удельная теплота сгорания. Количество теплоты можно получать в результате сжигания некоторых веществ (*топлива*). Количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании топлива, называется *теплотой сгорания*. Теплота сгорания, отнесенная к единице массы (или объема), называется *удельной теплотой сгорания* q . Таким образом, при полном сгорании массы m топлива выделяется количество теплоты, равное

$$Q = qm$$

Изотермы реального газа. Ранее была установлена связь термодинамических параметров для идеального газа в равновесии (1.11). Какие изменения следует ожидать в реальном случае? Рассмотрим проведем на примере паров воды. Заклучим в поршень пары воды и начнем его изотермически сжимать (уменьшать объем паров). Пока в поршне содержатся только пары воды, их давление будет расти при уменьшении объема (рис. 3.1). Как только в системе произойдет фазовый переход (появится хотя бы

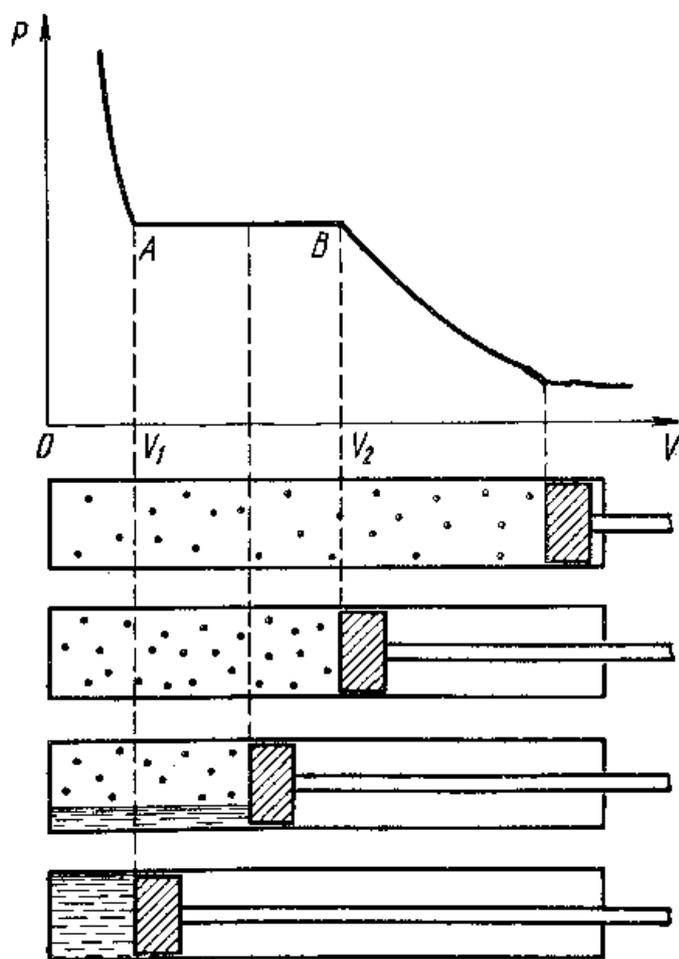


рис. 3.1.

небольшая капля воды) рост давления прекратится. Давление будет постоянным до тех пор, пока весь пар не перейдет в жидкость. На p - V диаграмме это соответствует горизонтальному участку на изотерме. После этого будет наблюдаться рост давления при дальнейшем сжатии поршня, но под поршнем теперь уже пара нет – только вода.

Насыщенный, ненасыщенный пар. Если мы будем увеличивать температуру паров, то размер горизонтального участка на изотермах будет сокращаться. По мере повышения температуры левая граница горизонтального участка будет сдвигаться вправо, а правая – влево. Если мы проведем кривую через границы горизонтальных участков изотерм при разных температурах (ее название – *бинодаль*), то она будет иметь характерный вид, напоминающий колпак или колокольчик (рис. 3.2). Точка, в которой длина горизонтального отрезка давления становится равной нулю, называется *критической точкой* (точка K на рис. 3.2). В этой точке жидкость и пар не различимы. Изотерма,

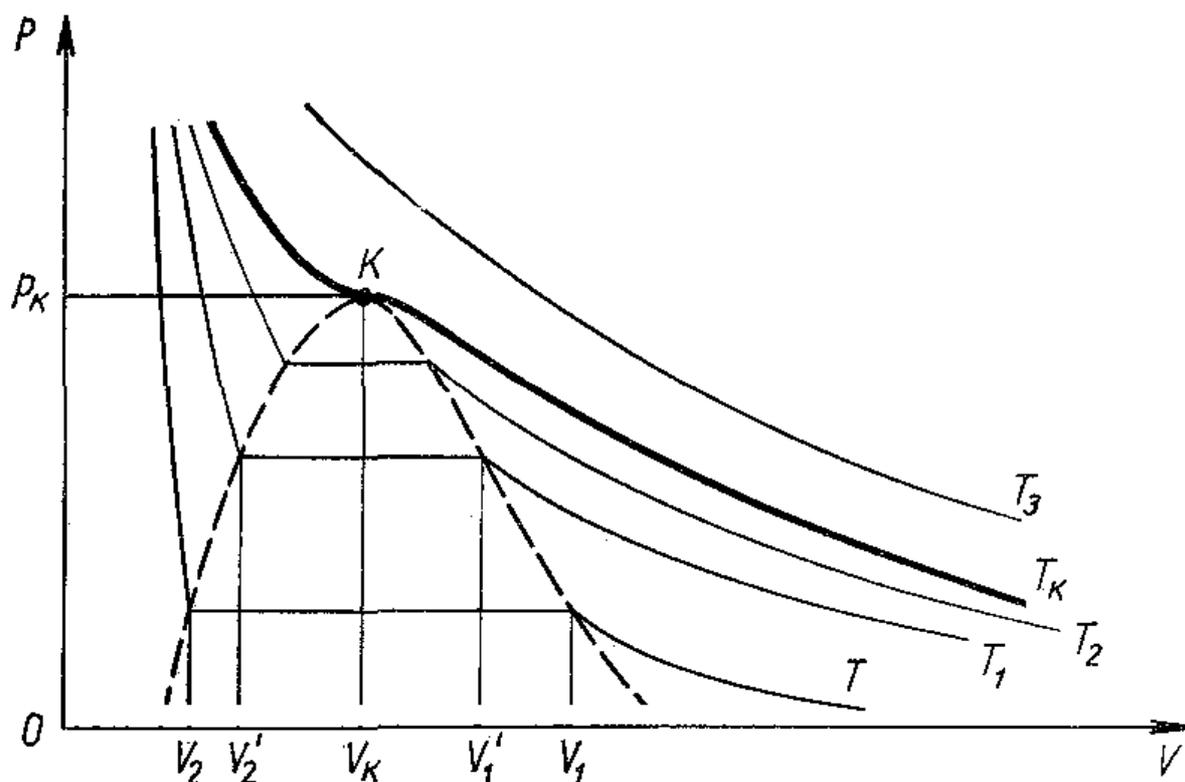


рис. 3.2.

проходящая через эту точку, называется *критической*, также называется и температура, соответствующая этой изотерме. Для воды критическая температура составляет примерно $374\text{ }^\circ\text{C}$ (см. точнее приложение). Если изотерма проходит выше критической точки, то никаким сжатием или растяжением объема пар нельзя изотермически перевести в жидкость, если же изотерма проходит ниже критической точки, то это возможно. Чтобы различить

пар в таких различных состояниях, различные области на p - V диаграмме имеют различные названия – газ, насыщенный и ненасыщенный пар (рис. 3.3).

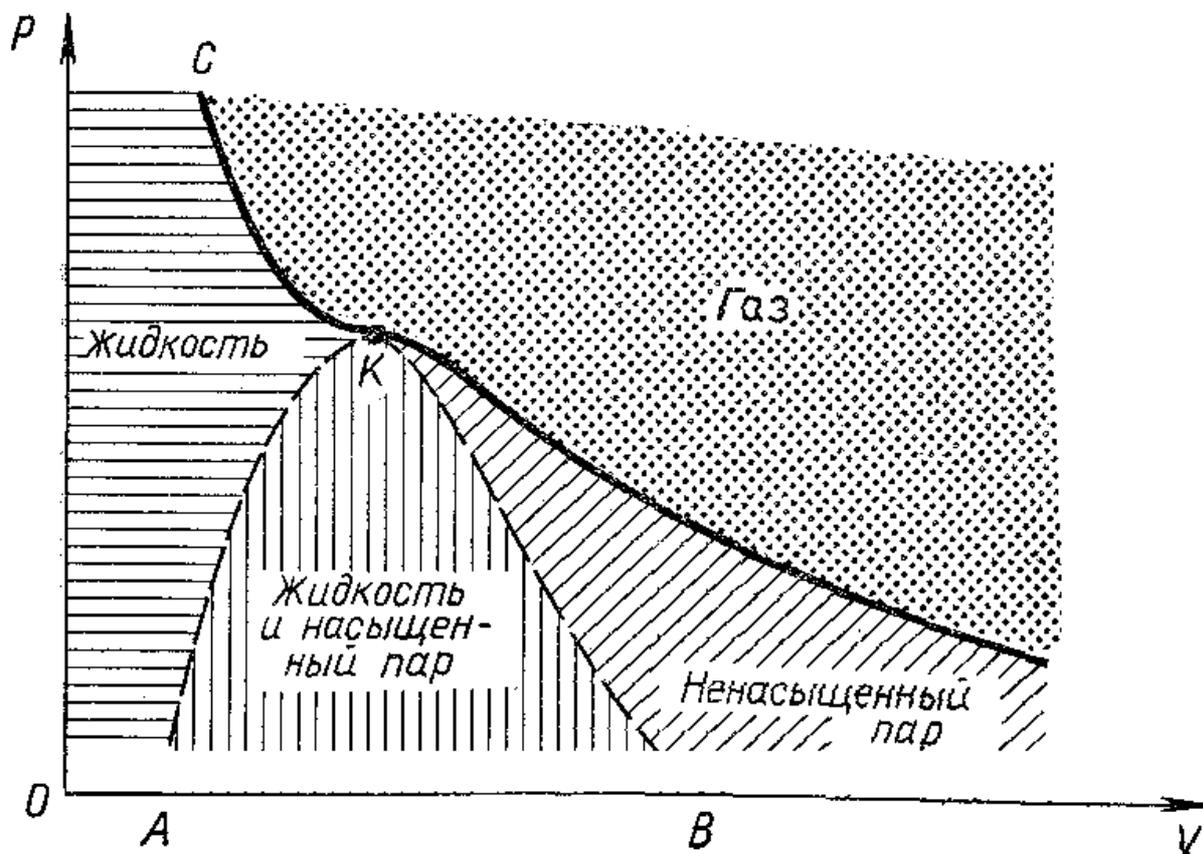


рис. 3.3.

Отметим интересный факт, следующий из вида бинодаль. Допустим, мы изохорически нагреваем чайник с водой, объем которого V_1 ($V_1' > V_k$) (рис. 3.2). Тогда по мере нагревания, воды в чайнике будет становиться все меньше и в некоторый момент времени вся вода перейдет в пар (см. также рис. 3.3). Эта ситуация с точки зрения обыденной практики (например, приготовления чая) не вызывает ничего удивительного. Теперь будем изохорически нагревать чайник с водой, объем которого V_2 ($V_2' < V_k$) (рис. 3.2). Тогда по мере нагревания, воды в чайнике будет становиться все больше и с некоторого момента времени в чайнике будет оставаться только вода (см. также рис. 3.3, следует заметить, что чайник в этом случае должен быть закупоренный). Если же нагревание будет продолжено далее, то в точке, в которой температура воды станет равной критической вся вода перейдет в газ.

Зависимость $p(T)$ для насыщенного пара. Для фиксированного числа молей идеального газа зависимость $p(T)$ для изохорического процесса является линейной (1.11). Это соотношение можно переписать в виде

$$p = \frac{\rho}{\mu} RT$$

При нагревании насыщенного пара давление будет расти при нагревании быстрее, поскольку в процессе испарения количество вещества в газообразном состоянии будет увеличиваться, т.е. будет расти плотность пара. Только после полного испарения жидкости зависимость опять станет линейной (рис. 3.4).

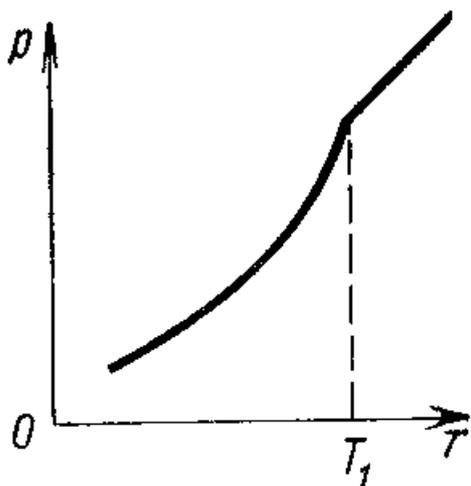


рис. 3.4.

Уравнение Ван-дер-Ваальса. Как учесть отличие реального газа от идеального? Самым простым и результативным оказался подход Ван-дер-Ваальса. Попробуем *феноменологически* (т.е. описательным, приближенным способом, с помощью (по возможности наименьшего числа) параметров, значения которых выбираются в соответствии с экспериментом) подкорректировать уравнение (1.8) для идеального газа.

Атомы и молекулы реального газа имеют хоть и малый (§1.1), но конечный размер. Следовательно, объем, доступный им для движения будет меньшим, что должно все сильнее проявляться по мере роста плотности газа. Это обстоятельство можно учесть заменой в уравнении (1.8) V_μ на $(V_\mu - b)$, где b – некоторая постоянная, различная для различных газов. С другой стороны, особенно при переходе к большим плотностям, будет проявляться взаимное притяжение атомов и молекул (рис. 1.1). Это притяжение будет частично компенсировать давление газа. Эффективная сила притяжения между атомами или молекулами пропорциональна как числу притягивающих, так и числу притягиваемых атомов, точнее, их произведению. Каждое из этих чисел пропорционально плотности газа, т.е. обратно пропорционально объему. Таким образом, эффективное притяжение можно учесть заменой в уравнении (1.8) p на $(p + a/V_\mu^2)$, где a – некоторая постоянная, различная для различных газов. Итак, уравнение (1.8) с учетом описанной корректировки перейдет в уравнение

$$\left(p + \frac{a}{V_\mu^2} \right) (V_\mu - b) = RT$$

Можно написать данное уравнение и для произвольного количества вещества. Заменяв объем одного моля V_μ на V/ν получим обобщение уравнения (1.11)

$$\left(p + \frac{av^2}{V^2} \right) \left(\frac{V}{\nu} - b \right) = RT$$

Переобозначив постоянные a и b

$$a' = \nu^2 a, \quad b' = \nu b$$

окончательно получаем

$$\left(p + \frac{a'}{V^2} \right) (V - b') = \nu RT \tag{3.1}$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса (3.1) описывает реальные газы лучше по сравнению с уравнением идеального газа (1.11), но все равно приближенно. Воображаемый газ, точно подчиняющийся уравнению (3.1) называется *ван-дер-ваальсовским*.

Изотермы реального и ван-дер-ваальсовского газов. Изотермы ван-дер-ваальсовского газа для различных температур схематически представлены на рис. 3.5. В некотором диапазоне давлений каждому значению (по давлению) соответствует три значения объема. Реальная изотерма при той же температуре имеет плоский участок, причем значение $p_{нп}$ соответствует равенству площадей $F_2 = F_3$ (рис. 3.6). Видно, что при $V < V_{ж}$ и $V > V_{г}$ изотермы реального и ван-дер-ваальсовского газов практически совпадают, т.е. уравнение Ван-дер-Ваальса описывает не только газообразное, но и жидкое состояние вещества.

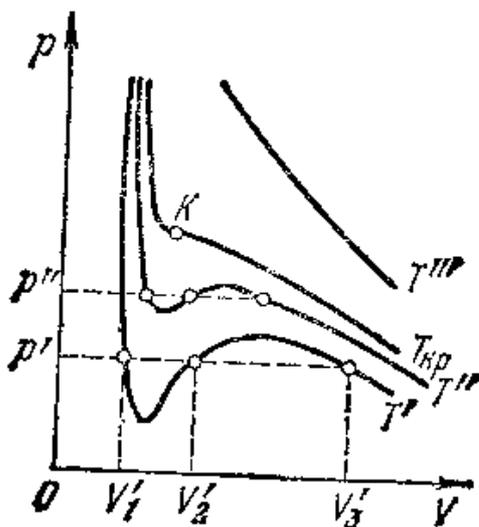


рис. 3.5.

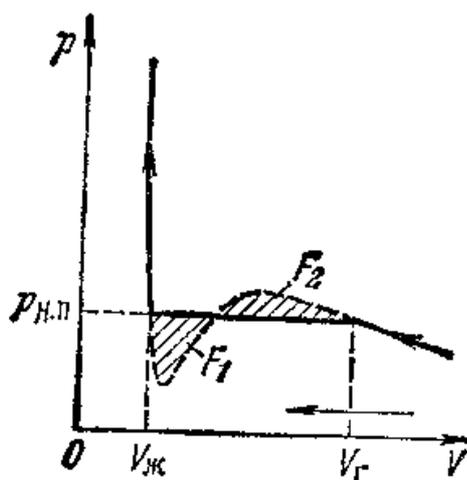


рис. 3.6.

Можно ли экспериментально реализовать участки 1-2-3-4 изотерм ван-дер-ваальсовских газов (рис. 3.7)? Участки 1-2 и 3-4 реализовать можно, но для этого вещество должно быть тщательно очищено. Если на этих участках в среде возникают посторонние включения (например, пылинки, инородные примеси),

то вещество переходит на реальную изотерму (переходы А-В и С-Д, рис. 3.7). Итак, состояния на участках 1-2 и 3-4 не совсем устойчивы, они называются *метастабильными* состояниями. Вещество в состояниях 1-2 называется *перегретой жидкостью*, в состояниях 3-4 – *пересыщенным паром*.

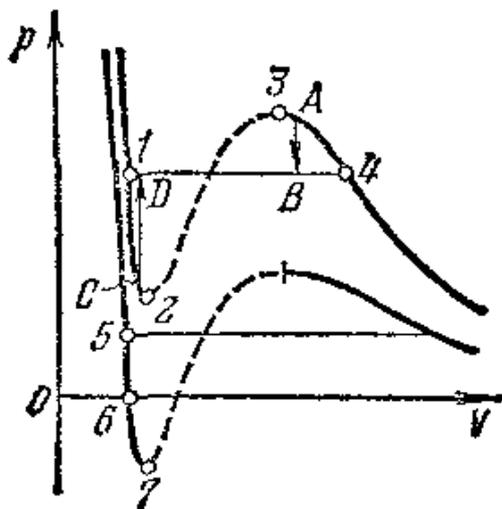


рис. 3.7.

Возможна ситуация, когда изотерма Ван-дер-Ваальса пересекает ось V (участок 6-7, рис. 3.7). Вещество под отрицательным давлением находится под действием растяжения. Такие состояния при известных условиях тоже могут быть реализованы. В таких случаях участок 5-6 соответствует перегретой, а участок 6-7 – *растянутой жидкости*.

Участок 2-3 является неустойчивым. На данном участке увеличение объема должно было бы сопровождаться ростом давления. Участки 2-3 экспериментально не реализуются.

Пересыщенный пар можно получить при резком расширении (не пересыщенного) пара (переход 1-2 на рис. 3.8). В этом случае процесс можно считать адиабатным, следовательно, он сопровождается охлаждением пара, т.е. происходит переход на одну из низколежащих изотерм. Как уже отмечалось выше, состояние пересыщенного пара является метастабильным. Достаточно возникнуть какому-либо центру конденсации (например, пылинка, капелька жидкости) как состояние переходит на реальную изотерму (рис. 3.7) и перестает быть пересыщенным. Центром конденсации могут служить заряженные частицы (например, ионы). Эта особенность используется в *камере Вильсона*, которая представляет собой камеру, содержащую воздух с пересыщенными парами воды. Пролетающая через камеру частица ионизует вокруг себя молекулы, которые в свою очередь становятся центрами конденсации водяных паров. Таким образом визуализируется *трек* (траектория) пролетающей частицы, поскольку мелкие капельки воды образуют хорошо видимый след.

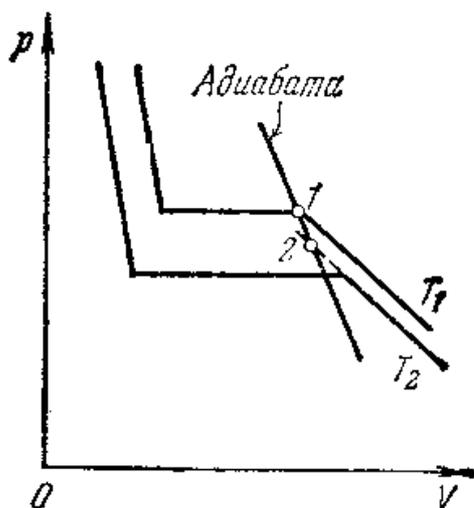


рис. 3.8.

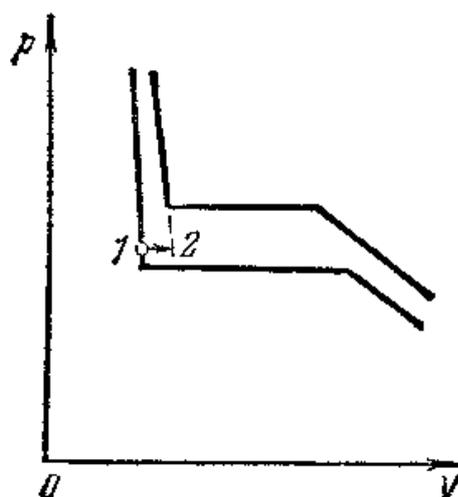


рис. 3.9.

Перегретую жидкость можно получить путем нагревания тщательно очищенной жидкости в состоянии с давлением, меньшим давлению насыщенных паров при данной температуре (переход 1-2 на рис. 3.9). При появлении инородных включений (например, песчинок, пузырьков газа) происходит вскипание жидкости и переход в не перегретое состояние (рис. 3.7). Центром вскипания могут стать (как и в камере Вильсона) заряженные частицы. Трек частицы визуализируется в этом случае пузырьками, такой прибор по визуализации траектории пролетающей частицы называется *пузырьковой камерой*.

3.2 Диаграммы состояния

Выше рассмотрение процессов при фазовых превращениях проводилось с помощью p - V диаграмм. Состояния, в которых жидкость и пар находятся в равновесии, на p - V диаграммах занимают области с площадью, отличной от нуля (см. область насыщенного пара на рис. 3.3). На p - T диаграммах данные области представляют собой линии (рис. 3.10), которые называются *кривыми испарения*. Горизонтальный отрезок на изотерме p - V диаграммы в области равновесия соответствует точке на p - T диаграмме. При охлаждении насыщенного пара его давление уменьшается. На p - T диаграмме это соответствует движению вниз от критической точки K по кривой испарения. При таком движении в некоторый момент мы достигаем температуры, при которой кроме жидкости в равновесии с паром может находиться также вещество в твердом состоянии. Такая точка на диаграмме называется *тройной точкой* (точка T_r , рис. 3.10-3.12). Эта точка является единственной, в которой одновременно могут находиться в равновесии три фазы вещества: твердая, жидкая и газообразная. Тройной точке воды соответствует давление 4.58 мм рт. ст. и температура 0.0075 °С.

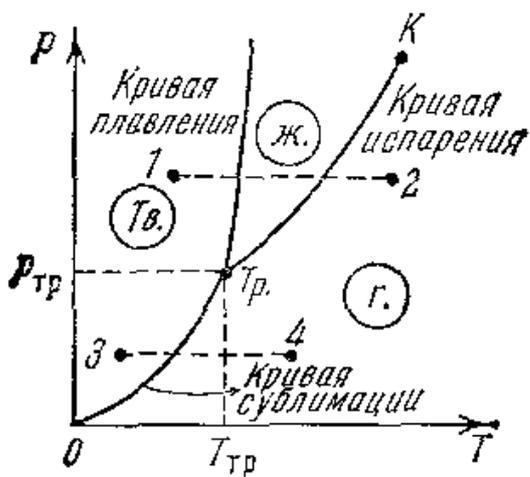


рис. 3.10.

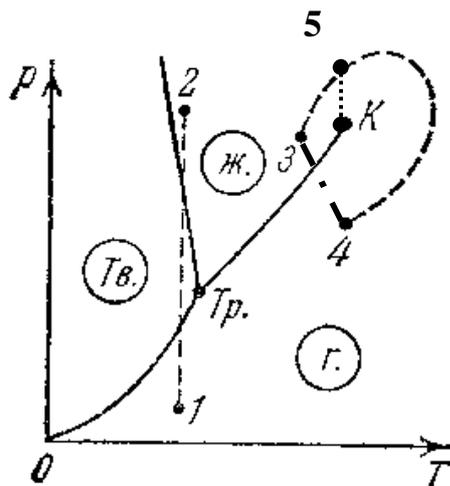


рис. 3.11.

Если мы далее будем уменьшать температуру, то твердое состояние может находиться в равновесии только с паром. В этих областях нагревание твердых тел будет сопровождаться сразу их испарением, без перехода через промежуточную жидкую фазу. Такой переход из кристаллического состояния в газообразное минуя плавление является разновидностью парообразования и называется *сублимацией*. Соответственно кривая равновесия кристаллической фазы и пара называется *кривой сублимации*. Таким образом, если далее продолжать отнимать у тела тепло, то мы будем двигаться вниз от тройной точки по кривой сублимации. Появление и исчезновение инея в морозную погоду является примером процесса сублимации водяных паров и обратного к ней процесса. Вплоть до конца 20 века при продаже мороженого летом использовалась углекислота (сухой лед). В процессе сублимации углекислоты отнималась теплота, что приводило к поддержанию низкой температуры коробок с мороженым, при этом внутренность коробок оставалась сухой.

В тройной точке, характеризующейся температурой $T_{тр}$ и давлением $p_{тр}$, в равновесии, как уже отмечалось, находятся твердая, жидкая и газообразная фаза вещества. При других давлениях кристаллическая фаза может также находиться в равновесии с жидкостью, однако температура плавления будет отлична от $T_{тр}$. Связь температуры плавления с давлением отражает *кривая плавления*. Итак, в тройной точке встречаются три кривые – испарения, плавления и сублимации. Кривые плавления могут характеризоваться разным наклоном (рис. 3.10, 3.11). Так в случае, показанном на рисунке 3.10, при изотермическом сжатии с температурой $T < T_{тр}$ вещество из газообразного состояния переходит в кристаллическое. В случае, показанном на рисунке 3.11, при аналогичном изотермическом сжатии вещество сначала из газообразного состояния переходит в кристаллическое, а при дальнейшем изотермическом сжатии переходит из кристаллического состояния в жидкое.

Выше отмечалось, что вещество может иметь несколько кристаллических фаз (модификаций). В таком случае кроме рассмотренной выше тройной точки

существуют и другие точки, в которых вещество в равновесии также может одновременно находиться в трех состояниях. Эти точки по аналогии тоже называются тройными. Однако, среди равновесных фаз в таких точках нет газовой. В качестве примера на рис. 3.12 представлен случай, соответствующий веществу с двумя кристаллическими модификациями. В точке Tr' находятся в равновесии жидкость и обе кристаллические модификации.

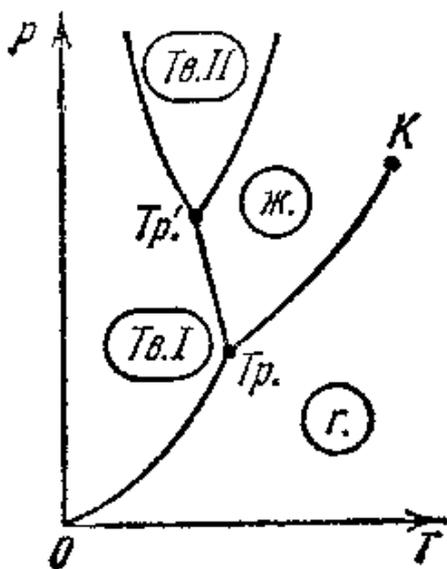


рис. 3.12.

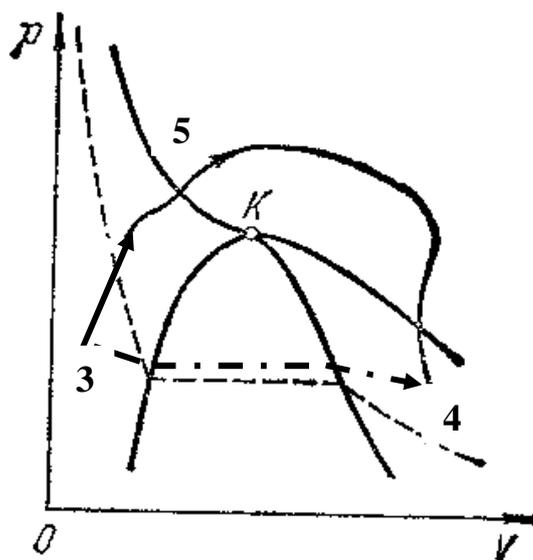


рис. 3.13.

Итак, каждая точка на p - T диаграмме изображает определенное равновесное состояние вещества. Поэтому эти диаграммы называются *диаграммами состояния*. Разные фазы на такой диаграмме разделяются кривыми испарения, плавления и сублимации.

Рассмотрим, например, переход из точки 3 в точку 4 через кривую испарения (штрих-пунктирная кривая) и в обход ее над критической точкой (пунктирная кривая) на p - T диаграмме (рис. 3.11). На p - V диаграмме процессы будут выглядеть как на рис. 3.13. Переход через кривую испарения на рис. 3.11 соответствует штрих-пунктирной кривой на рис. 3.13, причем точке на кривой испарения рис. 3.11 соответствует весь горизонтальный участок рис. 3.13. Переход жидкого состояния в газообразное происходит постепенно. При переходе же в обход кривой испарения жидкость при критической температуре (в точке 5) переходит в газ, т.е. переход в данном случае носит скачкообразный характер.

3.3 Влажность воздуха

Воздух представляет собой смесь различных газов, содержащихся в атмосфере Земли. В основном это азот (75.52%), кислород (23.15%), инертные газы (в основном аргон 1.28%) и углекислый газ (0.05%). Остальные компоненты – водяной пар, озон, перекись водорода, азотная кислота,

аммиачные соединения, углеводороды, микроорганизмы, минеральная пыль, йод, спирты и т.д. содержатся в очень малых количествах. Важным фактором, влияющим на жизнедеятельность живых организмов, является наличие в этой смеси водяных паров, что характеризуется таким понятием, как влажность. От величины влажности воздуха зависит интенсивность испарения влаги с поверхности кожи человека и животных, а также листьев растений. Наиболее благоприятная относительная влажность для человека составляет 60-70%. Определенная влажность для нормального протекания технологических процессов требуется в различных производствах, таких как ткацкое, кондитерское и т.д. Для хранения продуктов, зерна, различных предметов (книг) произведений искусства (картин) необходимо также выдерживать влажность воздуха на определенном уровне.

Абсолютная влажность. Под *абсолютной влажностью* понимается концентрация водяного пара. Если размерность не указывается, то она подразумевается в г/м^3 .

Упругость водяного пара. Каждый из газов, входящих в состав воздуха, дает свой вклад в давление, называемое *парциальным давлением* данного газа. Парциальное давление водяного пара или другими словами давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали, называют *упругостью водяного пара*.

Относительная влажность r представляет собой отношение упругости водяного пара p_y к давлению насыщенных паров p_n при рассматриваемой температуре

$$r = p_y/p_n$$

Дефицит влажности представляет собой разность давления насыщенных паров и упругости водяного пара при рассматриваемой температуре $p_n - p_y$.

Точка росы. Зависимость давления насыщенных паров от температуры имеет характерный вид, показанный на рис. 3.14 (точная зависимость содержится в приложении). Видно, что при охлаждении ненасыщенного пара (точка A) в некоторый момент он станет насыщенным (точка B). При

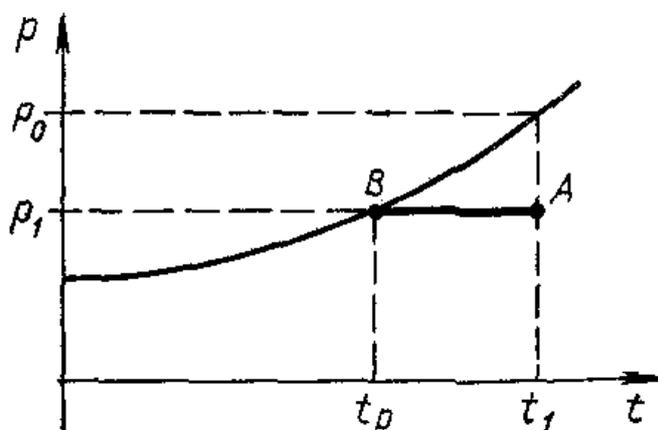


рис. 3.14.

охлаждении газа точка, отмечающая состояние пара на p - T диаграмме, будет двигаться от точки A к точке B по горизонтальному отрезку (процесс изобарический). Температура, соответствующая точке B , т.е. температура, при которой водяной пар становится насыщенным, называется *точкой росы*.

Гигрометры. Проведенное рассмотрение иллюстрирует работу *конденсационного гигрометра*. Как узнать относительную влажность в точке A при температуре t_1 ? Зная кривую зависимости давления насыщенных паров от температуры (рис. 3.14, а также приложение) мы знаем давление насыщенных паров в этой точке $p_n = p(t_1) = p_0$. Упругость же водяного пара можно найти охлаждая пар до точки росы $p_y = p(t_p) = p_1$.

Простейший конденсационный гигрометр представлен на рис. 3.15. Внутри металлической коробки K наливают легко испаряющуюся жидкость – эфир Э. Пропуская через коробку воздух с помощью резиновой груши $Г$ вызывают сильное испарение эфира и быстрое охлаждение коробки. Передняя стенка C коробки хорошо отполирована. Появление капелек на передней стенке означает, что водяной пар стал насыщенным. В момент появления капелек замечают температуру t_p по термометру внутри коробки. Таким образом, относительная влажность в точке A составляет

$$r = p_1/p_0$$

Обезжиренные человеческие волосы удлиняются при увеличении относительной влажности. Это свойство используют в *волосных гигрометрах*.

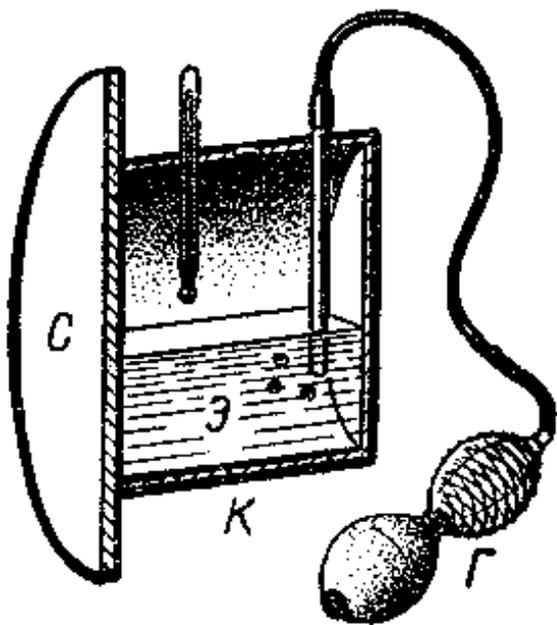


рис. 3.15.

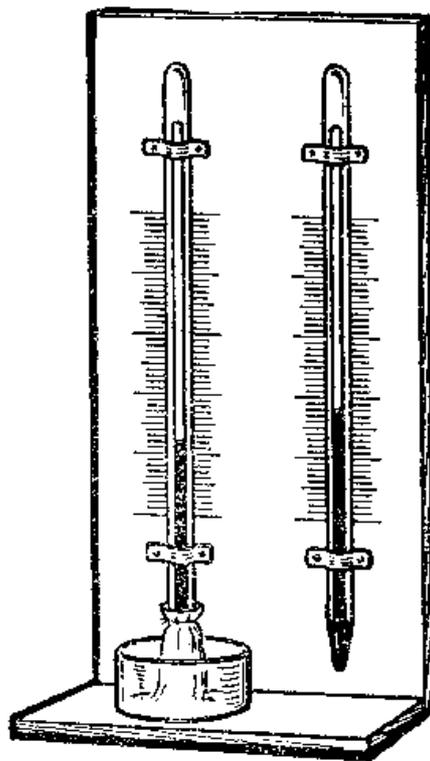


рис. 3.16.

Психрометр содержит два термометра (рис. 3.16). Резервуар одного из термометров окружен материалом, хорошо впитывающим воду, который в свою очередь приведен в соприкосновение с водой. Другой термометр используется по своему обычному назначению – измеряет температуру окружающей среды. В первом случае испарение воды приводит к охлаждению резервуара, измеряемая температура в этом случае будет всегда меньше по сравнению с температурой во втором случае. Чем меньше относительная влажность, тем больше расхождение показаний термометров и наоборот. По разности температур, используя специальные таблицы, можно восстановить влажность воздуха.

Приложение

Характеристики насыщенного водяного пара

Давление, кг/см ²	Температура, °С	Удельная теплота парообразования, кДж/кг
0.006	0	2300
0.02	17.2	2457
0.1	45.4	2388
0.2	59.7	2360
0.4	75.4	2322
0.6	85.45	2297
0.8	93.0	2278
0.9	96.2	2269
1	99.1	2262
1.0333	100	2260
1.23	105	2242
1.8	116.3	2215
2	119.6	2206
3	132.9	2168
4	142.9	2137
5	151.1	2111
6	158.1	2088
7	164.2	2067
8	169.6	2048
9	174.5	2031
10	179.0	2014
12	187.1	1964
14	194.1	1956
16	200.4	1930
18	206.2	1907
20	211.4	1882
30	232.8	1790
40	249.2	1712
56.1	270	1605
75.9	290	1480
101	310	1320
131	330	1140
169	350	893
215	370	440
225.2	374	113
225.65	374.15	0

Примеры решения задач

1. На рисунке П1 кривая $CLMGD$ представляет одну из реальных изотерм вещества, а пунктирная кривая $ALKGB$ отделяет область однофазного состояния вещества от области двухфазного. Показать, что в состоянии, изображаемом точкой M , массы жидкой и газообразной фаз относятся как $m_{ж}/m_{г} = MG/LM$ (правило рычага).

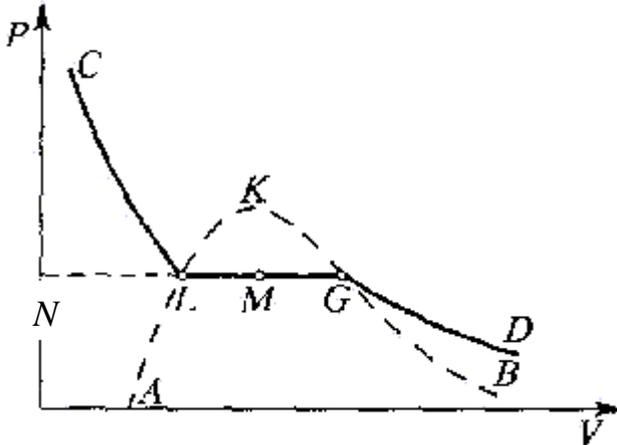


рис. П1

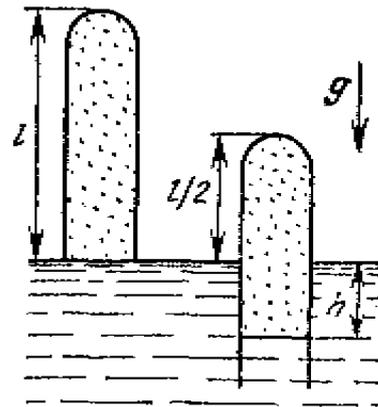


рис. П2

Решение. Будем считать, что масса вещества равна единице. Тогда удельные объемы жидкости и газа изобразятся длинами отрезков NL и NG , а удельный объем вещества в двухфазном состоянии – длиной отрезка NM . Если массы жидкости и газа равны соответственно $m_{ж}$ и $m_{г}$, то

$$V_M = |NM| = m_{ж}|NL| + m_{г}|NG|$$

Искомое соотношение получится отсюда, если принять во внимание, что $m_{ж} + m_{г} = 1$.

2. На сколько изменится подъемная сила воздушного шара объема V , если относительная влажность воздуха увеличится на $\Delta\alpha = 20\%$? Давление и температура влажного воздуха остались неизменными. Известно, что плотность насыщающих паров при данной температуре равна ρ . Молекулярные веса воздуха и паров воды соответственно равны $\mu_{в} = 29$ и $\mu_{п} = 18$ г/моль.

Ответ:
$$\Delta F = -\Delta\alpha V \left(\frac{\mu_{в}}{\mu_{п}} - 1 \right) \rho g \approx -0.12V\rho g.$$

Решение. Подъемная сила во влажном воздухе равна

$$F = [V(\rho_{в} + \alpha\rho) - M]g$$

где M – масса шара, α – относительная влажность. Увеличившаяся влажность $\alpha' = \alpha + \Delta\alpha$. Следовательно,

$$F' = [V(\rho_{в} + \Delta\rho_{в} + \alpha\rho + \Delta\alpha\rho) - M]g$$

где $\Delta\rho_{в}$ – изменение плотности воздуха. Таким образом,

$$\Delta F = F' - F = V(\rho_{в} + \Delta\alpha\rho)g$$

При неизменном общем давлении изменение давления воздуха будет равно $-\Delta\alpha p_H$, где p_H – давление насыщающих паров при заданной температуре, равное

$$p_H = \frac{\rho RT}{\mu_{\Pi}}$$

Следовательно, изменение плотности воздуха $\Delta\rho_B$ будет равно

$$\Delta\rho_B = -\frac{\Delta\alpha\mu_B p_H}{RT} = -\Delta\alpha \frac{\mu_B}{\mu_{\Pi}} \rho$$

Знак минус в этой формуле означает, что при увеличении влажности воздуха парциальное давление воздуха уменьшается. Искомое изменение подъемной силы будет, таким образом, равно

$$\Delta F = -\Delta\alpha V \left(\frac{\mu_B}{\mu_{\Pi}} - 1 \right) \rho g = -0.122 V \rho g \approx -0.12 V \rho g$$

Подъемная сила уменьшается, так как уменьшается плотность влажного воздуха.

3. Пробирка длины l , содержащая воздух и насыщенный водяной пар, касается открытым концом поверхности воды. Пробирку погружают в воду наполовину (см. рис. П2). При этом поверхность воды в пробирке оказывается на глубине h . Найти давление насыщенного водяного пара. Температуру паров воды и воздуха считать постоянной. Атмосферное давление p_0 , плотность воды ρ_0 .

Ответ: $p = p_0 - \rho_0 g h \frac{l + 2h}{l - 2h}$.

Решение. Закон Бойля-Мариотта мы можем писать только для воздуха, поскольку масса пара в начальном (1) и конечном (2) состояниях различна

$$p_1 l = p_2 (l/2 + h)$$

Давление p насыщенных паров воды при постоянной температуре остается неизменным. Запишем соотношения для давления в начальном

$$p_1 + p = p_0$$

и конечном состояниях

$$p_2 + p + \rho_0 g (l/2 - h) = p_0 + \rho_0 g l/2$$

Выразим из второго и третьего уравнений p_1 и p_2 и подставим их в первое, получаем

$$p = p_0 - \rho_0 g h \frac{l + 2h}{l - 2h}$$

4. В цилиндрическом сосуде под поршнем при температуре T находится насыщенный пар. Определить массу сконденсировавшегося пара при изотермическом вдвигании поршня, если при этом совершена работа A . Молярная масса пара равна μ .

Ответ: $\Delta m = \frac{A\mu}{RT}$.

Решение. Так как пар насыщенный конденсируется, то при сжатии его давление постоянно. Работа по сжатию

$$A = F\Delta l = pS\Delta l = p\Delta V = p(V - V_0)$$

где V и V_0 – конечный и начальный объемы пара. К пару можно применить уравнение газового состояния:

$$pV_0 = \frac{m_0}{\mu} RT, \quad pV = \frac{m}{\mu} RT$$

Это дает

$$A = p(V - V_0) = \frac{m - m_0}{\mu} RT$$

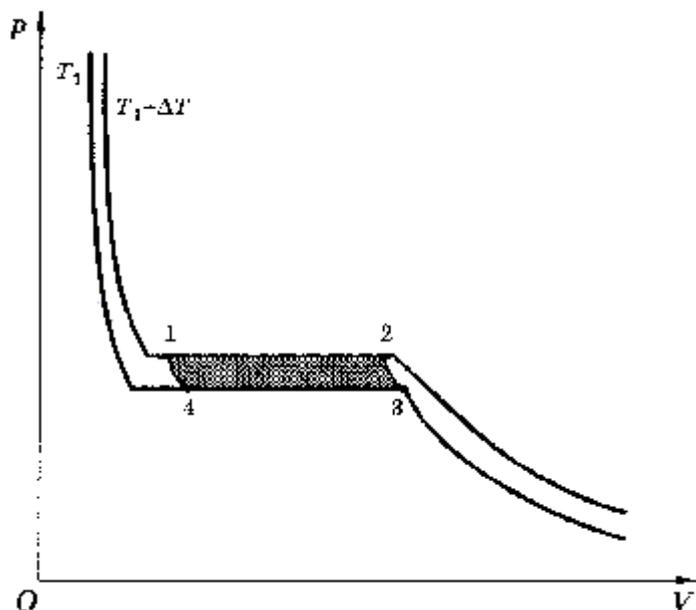
т.е.

$$\Delta m = \frac{A\mu}{RT}$$

5. Давление насыщенного водяного пара при температуре $T = 100^\circ\text{C}$ равно $p = 10^5$ Па. Каково давление насыщенного водяного пара при температуре $T_1 = T + \Delta T = 105^\circ\text{C}$? Удельная теплота испарения воды при 100°C равна $L = 2.3 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Ответ: $p_1 = p + \Delta p = p + \frac{LpM}{RT_1^2} \Delta T \approx 1.2 \cdot 10^5$ Па.

Решение. Представим изотермы насыщенного пара при температурах 100°C и 105°C (см. рис.). Рассмотрим цикл Карно 1-2-3-4, в котором на участке



цикла 1-2 один моль воды при температуре $T + \Delta T$ испаряется при изотермическом расширении, затем на участке цикла 2-3 охлаждается до температуры T в результате адиабатного расширения, на участке цикла 3-4 превращается из пара в жидкость в результате изотермического сжатия и на участке 4-1 возвращается в исходное состояние в результате адиабатного сжатия. Для цикла Карно можно записать

$$\frac{A}{Q_1} = \frac{\Delta T}{T_1} \quad (1)$$

где A – работа за цикл, Q – количество теплоты, полученное за цикл от нагревателя, ΔT – разность температур нагревателя и холодильника, T_1 – температура нагревателя.

От нагревателя при испарении одного моля воды получено количество теплоты

$$Q_1 = LM \quad (2)$$

где L – удельная теплота парообразования, M – масса одного моля воды. Работа пара за цикл определяется по площади цикла на p - V диаграмме:

$$A = \Delta p \Delta V \quad (3)$$

Из (1), (2), (3) следует:

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = \frac{LM}{T_1 \Delta V} \quad (4)$$

Пренебрегая объемом жидкости по сравнению с объемом пара, изменение объема пара ΔV при переходе из жидкого в газообразное состояние можно принять равным объему пара $\Delta V \approx V_{\text{п}}$. Тогда

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = \frac{LM}{T_1 V_{\text{п}}} = \frac{LM}{T_1 \frac{RT_1}{p}} = \frac{LpM}{RT_1^2}$$

Получаем

$$\Delta p = \frac{2.3 \cdot 10^6 \cdot 10^5 \cdot 18 \cdot 10^3}{8.31 \cdot 378^2} \cdot 5 \approx 2.2 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$$p_1 = p + \Delta p \approx 1.2 \cdot 10^5 \text{ Па (для сравнения см. приложение).}$$

6. При относительной влажности воздуха $r_1 = 50\%$ вода, налитая в блюдце, испарилась на открытом воздухе за время $\tau_1 = 40$ мин. За какое время τ_2 испарилась бы вода при $r_2 = 80\%$?

$$\text{Ответ: } \tau_2 = \frac{1-r_1}{1-r_2} \tau_1 = \frac{5}{2} \tau_1 = 100 \text{ мин.}$$

Решение. Наряду с процессом испарения жидкости идет и процесс конденсации пара. Скорость испарения в обоих случаях (и при $r_1 = 50\%$ и при $r_2 = 80\%$) одна и та же – она зависит только от температуры жидкости. Скорость же конденсации пропорциональна концентрации молекул пара в воздухе, т.е.

она пропорциональна относительной влажности и во втором случае выше, чем в первом.

Скорость убывания уровня воды можно представить как

$$V_y = V_{\text{исп}} - V_{\text{конд}}$$

При 100% влажности воздуха $V_{\text{исп}} = V_{\text{конд}}$. Учитывая все это, можно записать:

$$V_{y1} = V_{\text{исп}} - V_{\text{конд1}} = 0.5V_{\text{исп}}, \quad \text{при } r_1 = 50\%$$

$$V_{y2} = V_{\text{исп}} - V_{\text{конд2}} = 0.2V_{\text{исп}}, \quad \text{при } r_2 = 80\%$$

тогда

$$\tau_2 = \tau_1 \frac{V_{y1}}{V_{y2}} = \tau_1 \frac{1-r_1}{1-r_2} = \frac{5}{2} \tau_1 = 100 \text{ мин.}$$

Следует отметить, что это значение занижено – при недостаточной конвекции воздуха у самой поверхности воды образуется тонкий слой насыщенного пара, который сильно замедляет испарение.