



**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Лекция 6. Водяной пар и паровые процессы



Водяной пар – один из наиболее распространенных в теплотехнике газов. Он встречается в различных состояниях. В одних случаях, как это имеет место в процессах горения, водяной пар является составной частью продуктов сгорания топлив. Здесь он находится под очень малым давлением и при высокой температуре. В этих состояниях силы сцепления между молекулами очень малы, также мал объем самих молекул в сравнении с объемом газа.



Поэтому в этих случаях водяной пар можно рассматривать как идеальный газ.

Водяной пар как рабочее тело широко применяется в паровых двигателях и как теплоноситель – в теплообменных аппаратах. В обоих этих случаях он используется при таких давлениях и температурах, что пренебрежение в расчетах силами сцепления и объемом молекул повело бы к значительным погрешностям. Поэтому применять к водяному пару в этих состояниях законы идеальных газов было бы неправильно.



Нельзя поэтому применять к нему и уравнение состояния идеального газа.

В этих состояниях водяной пар рассматривают как реальный газ.

Определением связи между параметрами p , v , T для реальных газов, т. е. выявлением уравнения состояния для них, занимался ряд исследователей. Имеется большое количество уравнений, устанавливающих эту зависимость с той или иной степенью точности.



Уравнение, которое наиболее просто учитывает влияние сил сцепления и объема молекул, выведено Ван-дер-Ваальсом. Однако уравнение Ван-дер-Ваальса все же не учитывает ряда факторов и потому для реальных газов, в частности для водяного пара, в расчетах обычно не используется.



Отысканию зависимости между параметрами состояния реального газа посвящены работы проф. М. П. Вукаловича и проф. И. И. Новикова, которые, помимо влияния сил сцепления и объема самих молекул, учли также ассоциацию молекул, заключающуюся в объединении одиночных молекул в двойные, тройные и т. д. сложные комплексы, на что еще в свое время указывал Ван-дер-Ваальс. Уравнения состояния реальных газов имеют сложный характер и для пользования в повседневных расчетах неудобны



Поэтому их обычно используют для составления диаграмм, удобных для теплотехнических расчетов, и таблиц термодинамических свойств реальных газов, важных для техники.

На основании широко поставленных экспериментальных работ еще в СССР созданы подробные таблицы водяного пара: одни из них базируются на работах Московского энергетического института (таблицы Вукаловича), другие – на работах Всесоюзного теплотехнического института (таблицы ВТИ).



И те, и другие таблицы в технически важной области совпадают с достаточной для практических расчетов точностью.

Получение водяного пара в технике осуществляется по преимуществу в специальных агрегатах – паровых котлах.

В зависимости от назначения паровые котлы бывают разнообразных конструкций. По размерам паровые котлы также сильно отличаются между собой.

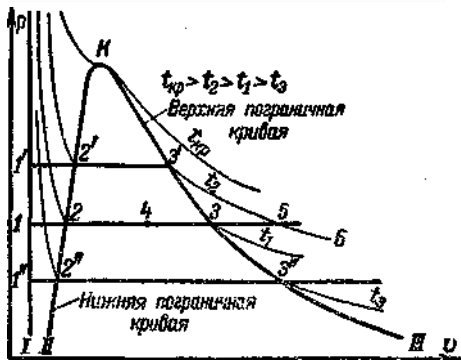


Для домашнего отопления применяются малые котлы с поверхностью нагрева в несколько квадратных метров. На крупных же электростанциях применяются паровые котлы в несколько тысяч квадратных метров и высотой в десятки метров, производящие до $400 \div 700$ т/ч пара. Проектируются котлы и на более высокую производительность.



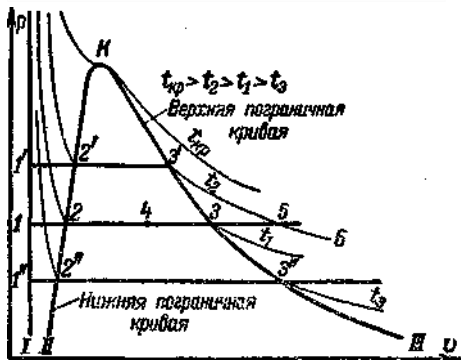
В паровых котлах независимо от их назначения, величины и конструкции водяной пар получается всегда принципиально одинаковым способом, а именно при постоянном давлении; величина же давления бывает весьма различна, от $1 \div 2$ до 300 ат.

Изучение свойств водяного пара мы начнем с рассмотрения его образования из воды, причем будем изображать изменение его состояния в *pv*-диаграмме.



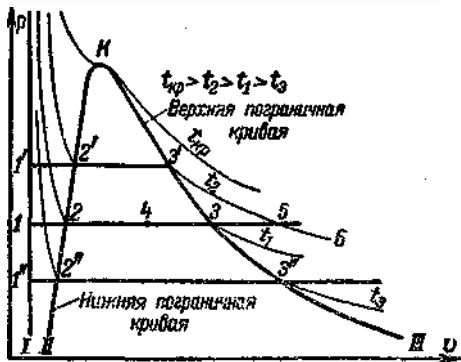
Пусть в цилиндре с подвижным поршнем имеется 1 кг воды при каком-либо давлении p_1 и температуре 0°C . Будем считать, что объем воды не изменяется от сжатия, и примем

$v'_0 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$, где v'_0 – удельный объем воды при 0°C и любом давлении. На pv -диаграмме эту точку обозначим 1. Начнем нагревать воду в цилиндре, подводя к ней тепло извне так, чтобы давление, под которым находится вода, оставалось постоянным.

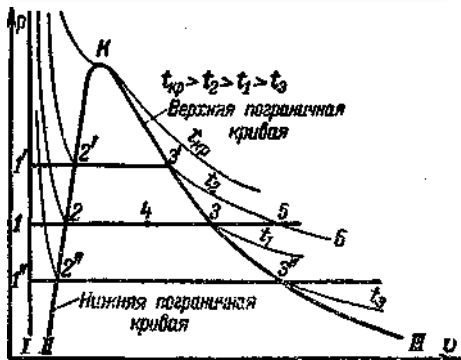


От нагревания объем воды будет увеличиваться (для простоты пренебрегаем тем, что вода имеет наибольшую плотность при $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, и считаем ее при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), а

температура повышаться. При некоторой температуре, зависящей от того, при каком давлении ведется нагревание, повышение температуры прекратится; начиная с этого момента, вода будет превращаться в пар.



По мере подвода тепла весовое количество воды будет уменьшаться, а весовое количество пара увеличиваться; объем пара при этом будет увеличиваться очень сильно. Подводя к жидкости, находящейся в цилиндре, достаточное количество тепла, мы, наконец, достигнем того, что вся вода превратится в пар, причем температура его в этот момент будет такая же, какую имела вода в момент, когда начался процесс парообразования.

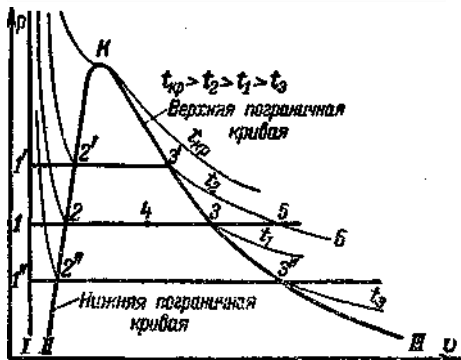


Отметим отдельные характерные состояния водяного пара в $p-v$ -диаграмме. Так как процесс нагревания происходит при постоянном давлении, то он изобразится

в виде прямой, параллельной оси абсцисс.

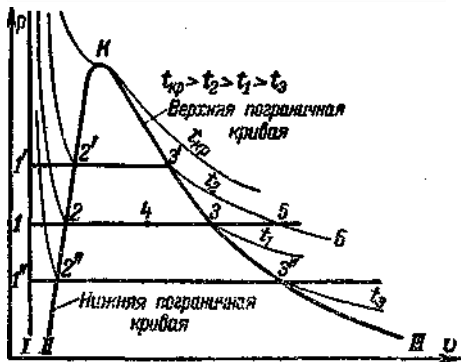
Точкой 1 мы обозначили состояние воды при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Точкой 2 обозначим состояние в тот момент, когда прекратилось повышение температуры и началось парообразование.



Объем воды при нагревании хотя и увеличивается, но незначительно; так, при повышении температуры до 100°C объем воды достигнет величины $v'=0,001043\text{ м}^3/\text{кг}$,

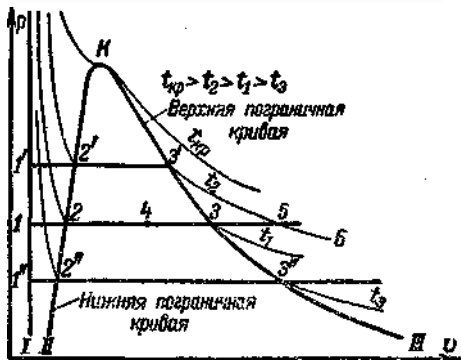
т. е. увеличится всего на 4,3 %. При температуре 200°C вода (при соответствующем давлении) будет иметь объем $v = 0,001157\text{ м}^3/\text{кг}$, т. е. объем увеличится на 15,7 % в сравнении с объемом при 0°C .



Иначе изменяется объем, когда вода превращается в пар. Если из 1 кг воды при 100 °С (давление 1,033 ат) получить пар той же температуры и давления, то

объем его будет $v'' = 1,673 \text{ м}^3/\text{кг}$, т.е. объем увеличится в 1 600 раз.

Если давление $p = 20 \text{ ат}$, то при переходе воды в пар той же температуры и давления объем ее увеличивается в 86 раз.

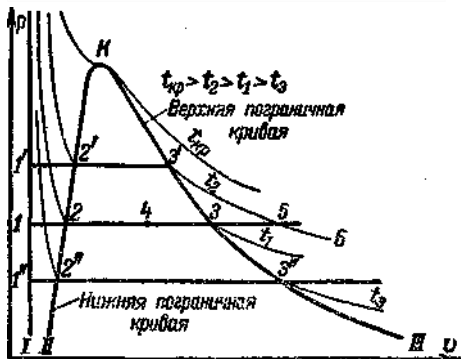


При давлении же в 100 ат
объем увеличивается только
в 12,7 раза.

Состояние водяного пара в
тот момент, когда исчезла
последняя капля воды,

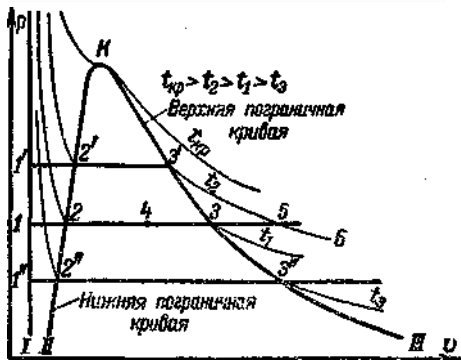
обозначено точкой 3.

Водяной пар, который получается в присутствии
воды (на *pv*-диаграмме он характеризуется
точками, лежащими на линии между 2 и 3),
обладает следующим свойством.



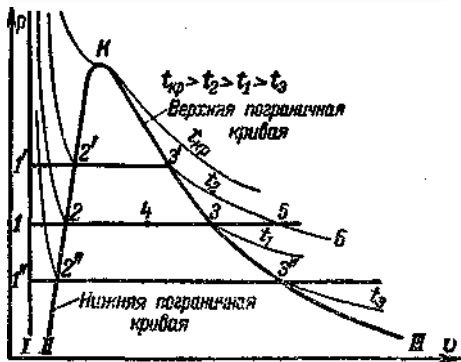
Если при постоянной температуре уменьшить его объем, давление в противоположность тому, что наблюдается у идеального газа, не

увеличится, так как часть пара превратится в жидкость. Наоборот, если, сохраняя постоянной температуру, увеличить объем, давление не упадет, а останется, постоянным, и при этом часть воды превратится в пар.



То обстоятельство, что в изотермическом процессе при изменении объема пар остается при одном и том же давлении, показывает, что каждому объему соответствует

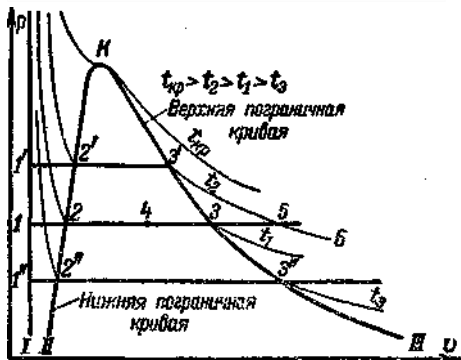
вполне определенное количество пара, в этом объеме находящегося. О таком паре говорят, что он «насыщает» пространство, в котором находится, и поэтому водяной пар в состояниях между точками 2 и 3 называется **насыщенным**.



В самой точке 2 это еще только кипящая вода, т. е. здесь начинается парообразование, в точке же 3 парообразование прекращается. Так как точка 3 характеризует

состояние, когда вся вода уже превратилась в пар, он здесь называется *сухим насыщенным паром*.

Во всех промежуточных состояниях между точками 2 и 3 рабочее тело представляет собой смесь кипящей воды и сухого насыщенного пара.

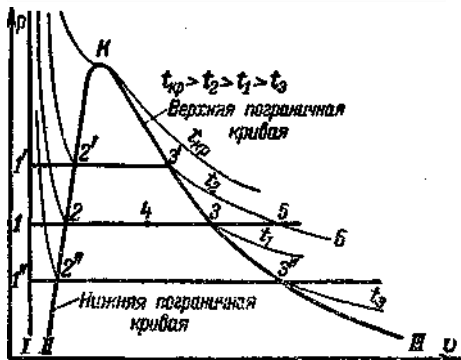


Такая смесь называется **влажным насыщенным паром**.

Массовая доля сухого насыщенного пара во влажном паре называется

степенью сухости пара и обозначается буквой **x** .

Если рассматривать 1 кг влажного пара, то **x** измеряет массу сухого пара, а **$(1 - x)$** – массу кипящей воды в 1 кг влажного пара.

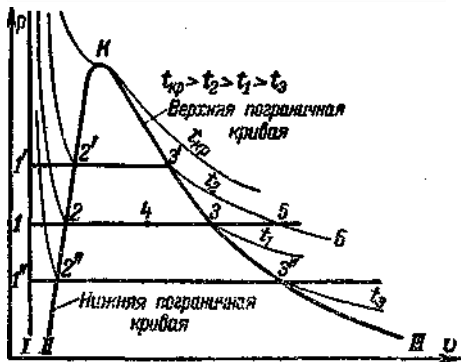


Чем выше давление, тем выше температура, при которой начинается кипение воды.

Так, при $p = 0,006228$ ат вода кипит при 0°C ; при $p = 1$ ат $t_{\text{н}} = 99,09^\circ\text{C}$; при $p = 50$ ат

$t_{\text{н}} = 262,7^\circ\text{C}$; при $p = 100$ ат $t_{\text{н}} = 309,5^\circ\text{C}$.

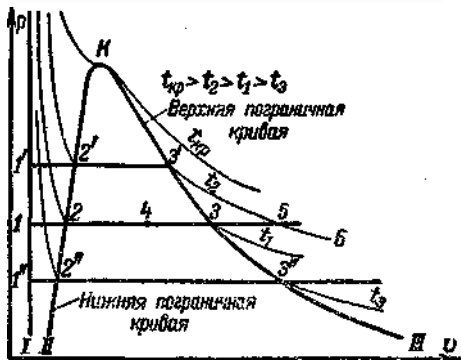
Удельный объем пара в точке 3, т.е. удельный объем сухого насыщенного пара, обозначается v'' .



Если, далее, взять воду при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и другом давлении p_2 , более высоком, чем давление p_1 то объем ее будет такой же, как и при p_1 т.е.

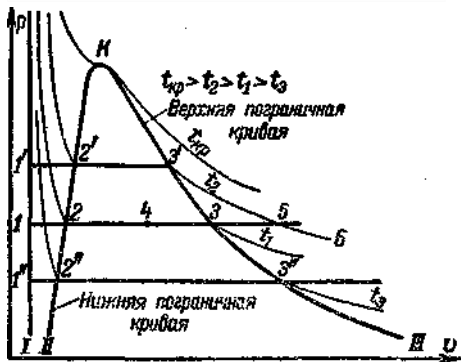
$$v'_0 = 0,001\text{ м}^3/\text{кг}, \text{ поскольку}$$

мы приняли, что вода несжимаема. При нагревании воды в этом случае процесс парообразования начнется при более высокой температуре t_H , так как взятое давление $p_2 > p_1$ следовательно, объем воды при достижении точки кипения будет больше, чем раньше.



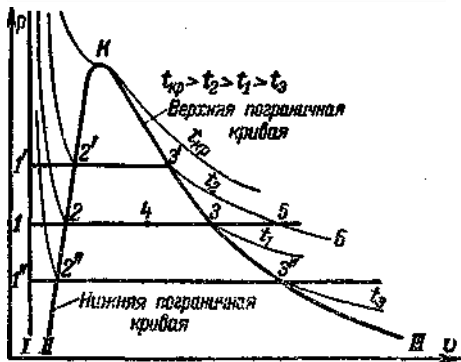
Если в этом случае начальное состояние воды обозначить 1', то состояние воды 2' при температуре кипения будет лежать на своей изобаре правее точки 2; продолжая

подводить тепло к кипящей воде, мы будем получать влажный насыщенный пар, и в точке 3' получим сухой насыщенный пар. Точка 3' лежит левее точки 3, так как сухому насыщенному пару более высокого давления соответствует меньший удельный объем.



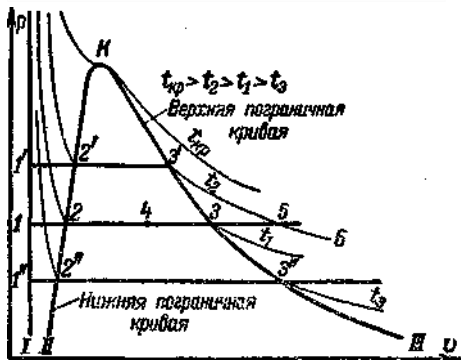
Если рассмотреть еще несколько случаев парообразования с повышающимся каждый раз начальным давлением воды, то точки, характеризующие состояние воды

при 0°C , будут ложиться на прямой, параллельной оси ординат; точки, соответствующие воде в состоянии кипения, по мере роста давления будут отклоняться вправо, а точки, соответствующие состоянию сухого насыщенного пара, – влево.



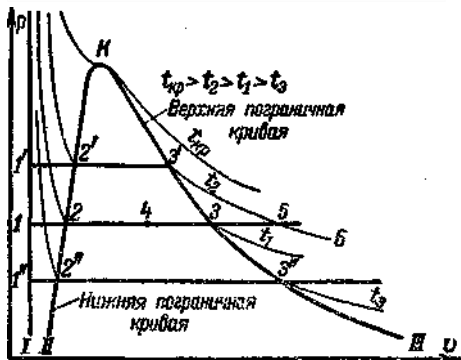
При некотором давлении точки, характеризующие эти два состояния, должны совпасть. Если провести линии через точки одинаковых характерных состояний, получим

три кривых: I, II и III. Линия I соединит все точки, характеризующие состояния воды при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и разных давлениях. Так как мы исходим из предположения, что вода несжимаема, эта линия должна быть параллельна оси ординат.



Линия II представляет собой геометрическое место точек, характеризующих воду в состоянии кипения при разных давлениях, а линия III – точек, характеризующих сухой

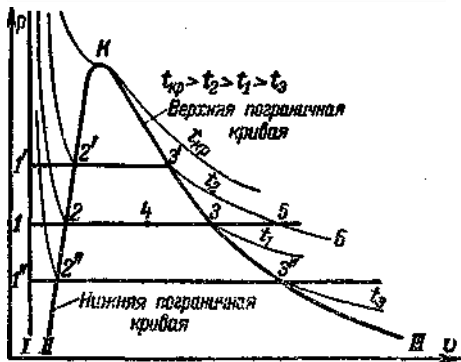
насыщенный пар. Эти две линии соединяются в точке **K**. Это значит, что при некотором давлении нет прямолинейного участка перехода воды в пар. Очевидно, что в этой точке кипящая вода и сухой насыщенный пар обладают одними и теми же параметрами состояния.



Эта точка называется
критической точкой.

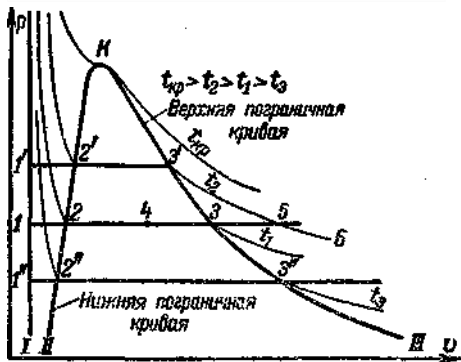
Все ее параметры называются критическими и имеют для водяного пара следующие значения: критическое

давление $p_{кр} = 225,65$ ат, критическая температура $t_{кр} = 374,15$ °С, критический удельный объем $v_{кр} = 0,00326$ м³/кг.



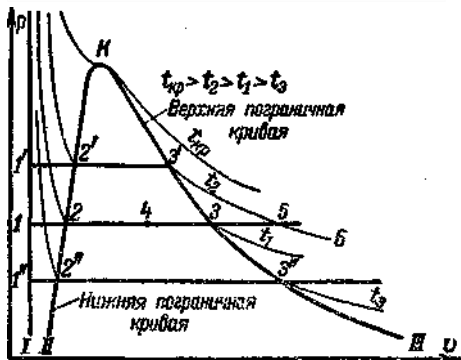
Линия II называется *нижней пограничной*, или *нижней предельной, кривой*; линия III – *верхней пограничной*, или *верхней предельной, кривой*.

Если к сухому насыщенному пару, состояние которого определяется точкой 3, продолжать подводить тепло при $p = \text{const}$, температура его будет увеличиваться.



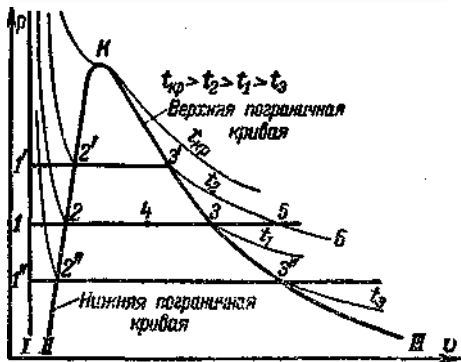
Линия II называется *нижней пограничной*, или *нижней предельной, кривой*; линия III – *верхней пограничной*, или *верхней предельной, кривой*.

Если к сухому насыщенному пару, состояние которого определяется точкой 3, продолжать подводить тепло при $p = \text{const}$, температура его будет увеличиваться.



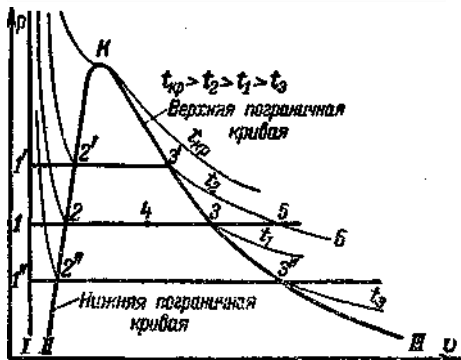
Так, пар, характеризующийся любой точкой 5, лежащей правее точки 3, имеет температуру более высокую, чем температура насыщения при данном давлении (точка

3), и поэтому называется *перегретым паром*. Он существенно отличается по своим свойствам от пара, который характеризуется точками, лежащими на отрезке 2-3. И действительно, проведем для пара в точке 5 изотерму.



Это будет кривая 3'-6. Она показывает, что перегретый пар при $t = \text{const}$, как и идеальный газ, может существовать и при большем и при меньшем давлении,

чем в точке 5. Следовательно, в противоположность насыщенному пару, перегретый пар не насыщает пространства, в котором он находится, т.е. перегретый пар – это ненасыщенный пар.



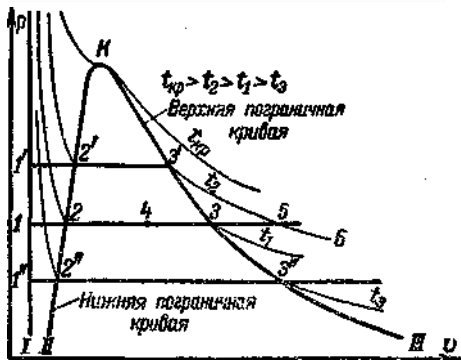
Таким образом, верхняя и нижняя пограничные кривые делят всю область на следующие состояния:

- 1) воду – между кривой I и II;
- 2) влажный насыщенный пар – между II и III;

– между II и III;

3) перегретый пар – правее кривой III.

Изотерма, проведенная через точку **K**, называется *критической изотермой*.



По мере перехода от критической изотермы ко все более высоким изотермам их форма постепенно приближается к гиперболе, т.е. по мере повышения

температуры свойства водяного пара приближаются к свойствам идеального газа.



Итак, вода и водяной пар могут находиться в пяти состояниях:

1. Недогретая до температуры кипения вода. При этом параметры состояния обозначаются как p, v, T, h, u, s .

2. Кипящая вода (кривая $x = 0$). При этом параметры состояния обозначаются как p, v', T_s, h', u', s' .

3. Мокрый пар. При этом параметры состояния обозначаются как p, v, T_s, h, u, s .



4. Сухой насыщенный пар (кривая $x = 1$). При этом параметры состояния обозначаются как $p, v'', T_s, h'', u'', s''$.

5. Перегретый пар. При этом параметры состояния обозначаются как p, v, T, h, u, s .



Для идеальных газов зависимость между параметрами p , v и T устанавливается уравнением состояния $pv=RT$, причем два из этих параметров однозначно определяют третий. Перегретый и насыщенный пары по своим свойствам существенно отличаются от идеальных газов. Поэтому соотношения между параметрами p , v и T перегретых и насыщенных паров значительно сложнее, чем уравнение состояния идеального газа.



Для насыщенных паров давление является функцией температуры. Таким образом, для насыщенных паров две переменные p и T не определяют состояния. Причем удельный объем v_x определяется степенью сухости пара x . Удельный объем v_x является функцией параметров p и x или T и x . Следовательно, чтобы определить состояние насыщенного пара, необходимо установить зависимости вида $p = f(T)$, $v_x = f(p)$.



В настоящее время известны многочисленные уравнения состояния перегретого водяного пара. Эти уравнения связывают между собой основные параметры p , v и T .

Одним из наиболее точных уравнений состояния водяного пара является уравнение Вукаловича-Новикова. Однако такие уравнения имеют весьма сложный вид и расчеты по ним чрезвычайно трудоемки.



Поэтому при практических расчетах параметров пара используются специальные таблицы и диаграммы, составленные на основании экспериментальных и теоретических данных. В них приводятся соответствующие друг другу значения p , T , v' , v'' , h' , h'' , s' , s'' .

В настоящее время составлены подробные таблицы для перегретого и насыщенного водяного пара до температур $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давления 98 МПа .



Таблицы составлены с высокой степенью точности. Известны три вида таблиц:

1. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре);
2. Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению);
3. Термодинамические свойства воды и перегретого пара.



В первой таблице указывают температуры сухого насыщенного пара и кипящей воды и соответствующие им давление, энтальпии, энтропии, теплоту парообразования и удельные объёмы.

Во второй таблице указывают давление сухого насыщенного пара и кипящей воды и соответствующие им температуру, энтальпии, энтропии, теплоту парообразования и удельные объёмы.



В третьей таблице для различных сочетаний температур и давлений приводятся соответствующие им энтальпия, энтропия и удельный объём недогретой до температуры кипения воды и перегретого пара.



В практических расчетах для определения параметров воды и водяного пара пользуются таблицами теплофизических свойств воды и водяного пара. В них представлены параметры для четырех состояний: недогретой до температуры кипения воды; кипящей воды; сухого насыщенного пара и перегретого пара. В таблицах I и II содержатся параметры насыщения (кипящей воды и сухого пара), а также значения теплоты парообразования

$$r = h'' - h', \text{ кДж/кг}. \quad (6.1)$$



Значения параметров мокрого пара в таблице отсутствуют, поэтому они рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}h &= h''x + h'(1 - x), \\v &= v''x + v'(1 - x), \\s &= s''x + s'(1 - x),\end{aligned}\tag{6.2}$$



Порядок расчета процессов с помощью таблиц:

1. Определяется состояние (одно из пяти) воды или водяного пара в начальной точке путем сравнения исходных данных с табличными.
2. Определяются параметры в начальной точке.
3. Определяется состояние в конечной точке.
4. Определяются параметры в конечной точке.
5. Рассчитывается теплота и работа процесса.
6. Дается иллюстрация процесса в p - v -, T - s -, h - s -диаграммах.



При определении состояния в начальной и конечной точках сравнивают исходные параметры с табличными ($p_s, t_s, v', v'', h', h'', s', s''$).

Для перегретого пара:

при заданном $p: t > t_s, v > v'', h > h'', s > s''$;

при заданной $t: p < p_s, v > v'', h > h'', s > s''$.

Для недогретой до температуры кипения воды:

при заданном $p: t < t_s, v < v', h < h', s < s'$;

при заданной $t: p > p_s, v < v', h < h', s < s'$.



Для мокрого пара:

$$t = t_s, p = p_s, v' < v < v'', h' < h < h'', \\ s' < s < s''.$$

Для кипящей воды:

$$t = t_s, p = p_s, v = v', h = h', s = s'.$$

Для сухого насыщенного пара:

$$t = t_s, p = p_s, v = v'', h = h'', s = s''.$$



Формулы для расчета теплоты и работы в процессах изменения состояния воды и водяного пара получены на основании соотношений:

$$q = h_2 - h_1 + l, \quad q = u_2 - u_1 + w,$$
$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv, \quad l = - \int_{p_1}^{p_2} v dp, \quad q = \int_{s_1}^{s_2} T ds.$$



Формулы расчета теплоты и работы в процессах изменения состояния

Процесс	Работа, w	Работа, l	Теплота, q
Изохорный	0	$v(p_1 - p_2)$	$q = u_2 - u_1$
Изобарный	$p(v_2 - v_1)$	0	$h_2 - h_1$
Изотермический	$q - (u_2 - u_1)$	$q - (h_2 - h_1)$	$T(s_2 - s_1)$
Адиабатный	$u_1 - u_2$	$h_1 - h_2$	0



Особенности расчета изменения параметров, теплоты и работы процессов воды и водяного пара по сравнению с процессами идеального газа состоят в следующем. Для воды и водяного пара:

- не выполняются связи между параметрами, полученные на основе уравнения состояния идеального газа;
- не применима молекулярно-кинетическая теория теплоемкости;



- для изотермического процесса $q \neq w \neq l$,
т. к. $h = f(p, T)$, $\Delta u \neq 0$, $\Delta h \neq 0$, т. к.
 $u = f(p, T)$;
- изменение параметров рассчитывается через
параметры начальной и конечной точек, а не
через теплоемкости

$$\Delta h = h_2 - h_1, \Delta u = u_2 - u_1, \Delta s = s_2 - s_1.$$