

## МОДУЛЬ 3. ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

### Лекция 3.1

#### ПОЛУЧЕНИЕ ПАРОВ И ИХ ПАРАМЕТРЫ

Для получения электрической энергии на Тепловых электрических станциях используют перегретый водяной пар.

Пар может получаться двумя способами: при испарении и при кипении. В процессе испарения молекулы жидкости у ее поверхности, имеющие бóльшую скорость, чем другие молекулы, преодолевают силы молекулярного сцепления, создающие поверхностное натяжение, и вылетают в окружающее пространство. Чем выше температура жидкости, тем более интенсивно происходит испарение.

При кипении частицы пара образуются во всей массе жидкости и, имея меньший удельный вес, чем жидкость, устремляются вверх, соединяясь при этом движении с другими частицами пара и, создавая таким образом клубки. Такие клубки пара, достигая поверхности жидкости, преодолевают силы поверхностного натяжения и вылетают в окружающее пространство, вызывая характерное для процесса кипения бурление.

Этот процесс может происходить лишь при вполне определенной для данного давления температуре воды, называемой *температурой насыщения*, или *кипения*, и обозначаемой через  $t_s$  или  $t_H$ .

В практических условиях пар обычно образуется при постоянном давлении. Такой процесс и рассматривается ниже.

Допустим, что 1 кг воды при 0 °С заключен в цилиндре с подвижным поршнем, нагруженным постоянным грузом с общим весом  $P$  (рис.1, положение 1). В первой стадии получения пара вода подогревается от 0 °С до температуры насыщения  $t_s$ , соответствующей данному давлению. Если при температуре 0 °С удельный объем воды был  $v_0$ , то при нагревании до температуры  $t_s$  он увеличится до объема  $v'$  (предполагая условно, что парообразования в этой стадии не было). Этот объем воды называется *удельным объемом жидкости* (рис. 1, положение 2). При дальнейшем нагревании наступает вторая стадия, когда кипящая вода постепенно переходит в пар (рис. 1, положение 3). Пар, образующийся из кипящей воды называется *насыщенным*, практически же он является *влажным насыщенным*, или, сокращенно, просто влажным. Этот пар представляет собой смесь собственно сухого пара с капельками воды, увлеченными из нее при кипении. В

процессе кипения количество пара в цилиндре увеличивается, а воды – уменьшается до тех пор, пока последняя капля воды не превратится в пар. В этот момент пар становится **сухим насыщенным**, называемым сокращенно просто **сухим** (рис. 1, положение 4).

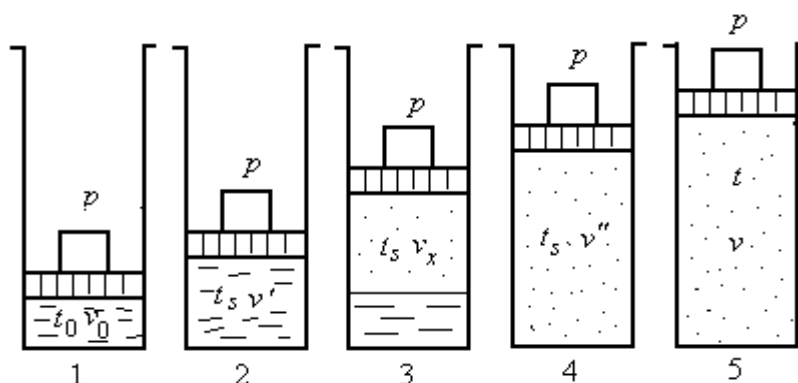


Рис. 1. Стадии получения перегретого пара

Влажный пар характеризуется степенью сухости  $x$ . *Степенью сухости называется отношение веса сухого пара к общему весу влажного пара. Численно степень сухости равна весу сухого насыщенного пара в килограммах, содержащемуся в 1 кг влажного пара.* Например, если влажный пар имеет степень сухости  $x = 0,85$ , то это значит, что 1 кг его содержит 0,85 кг сухого пара и 0,15 кг воды. Величина  $(1 - x)$  называется *степенью влажности пара*. В приведенном примере она равна 0,15. Чем пар суше, тем его степень сухости больше; для сухого пара  $x = 1$ , для воды  $x = 0$ .

Так как объем пара всегда больше объема воды, из которой он получился, то с увеличением степени сухости пара удельный объем влажного пара  $v_x$  также увеличивается и при степени сухости  $x = 1$  становится равным удельному объему сухого пара  $v''$  (рис. 1, положение 4). Следовательно,  $v' < v_x < v''$ . Обычно  $v''$  значительно больше  $v'$ . Например, при давлении 10 ата  $v''$  больше  $v'$  почти в 200 раз. Когда процесс кипения протекает при постоянном давлении, температура воды, как было сказано выше, остается также постоянной; такую же температуру  $t_s$  имеет насыщенный пар. Основываясь на этом, насыщенному пару (как влажному, так и сухому) можно дать такое определение: *насыщенным называется пар, имеющий температуру воды, из которой он получился.*

Если к сухому пару подводить теплоту при постоянном давлении, то он становится **перегретым** паром. Процесс перегрева является третьей стадией парообразования, сопровождающийся повышением температуры пара и увеличением его удельного объема (рис. 1, положение 5).

Температура перегретого пара обозначается через  $t$ , а удельный объем его через  $v$ .

Из сказанного следует, что *перегретым* называется пар, имеющий температуру выше температуры воды, из которой он получился. Разность  $t - t_s$  называется *степенью перегрева*, или *перегревом*. Чем выше температура перегретого пара, тем больше перегрев и удельный объем  $v$ .

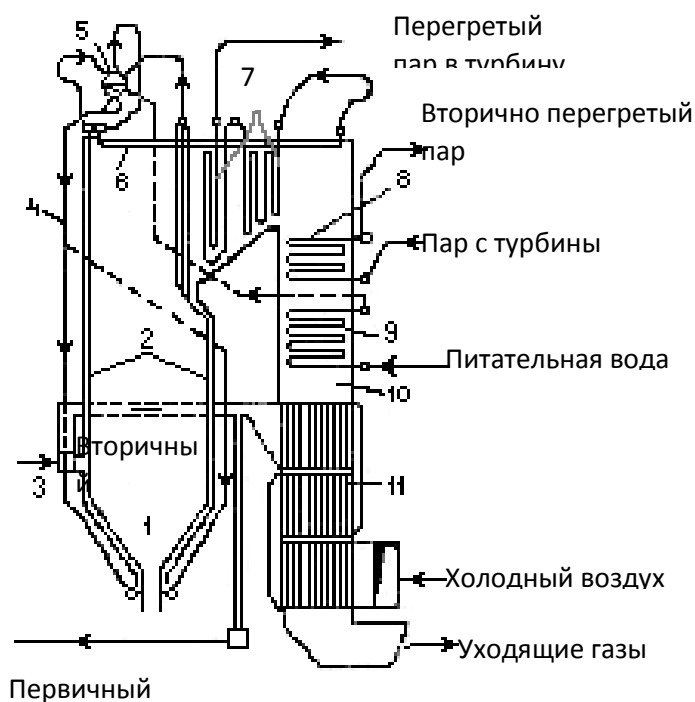


Рис. 2. Практический способ получения перегретого пара.

Схема барабанного котла с естественной циркуляцией:

- 1 – топочная камера; 2 – топочные экраны; 3 – горелки; 4 – опускные трубы;  
 5 – барабан; 6 – радиационный пароперегреватель; 7 – конвективный пароперегреватель; 8 – промежуточный перегреватель; 9 – экономайзер;  
 10 – конвективный газоход; 11 – воздухоподогреватель

Перегретый пар по сравнению с насыщенным имеет следующие преимущества. Во-первых, отнятие теплоты от перегретого пара связано только с уменьшением его температуры и удельного объема, конденсации же пара при этом не происходит. В ряде случаев, когда влажный пар отдает теплоту (например, в трубопроводах, в цилиндре паровой машины или турбины), конденсация его влечет за собой ряд нежелательных явлений, поэтому указанное свойство перегретого пара является очень важным. Во-вторых, теплопроводность перегретого пара меньше, чем влажного, вследствие чего он медленнее теряет теплоту, чем насыщенный пар. Благодаря указанным свойствам в теплотехнике в

основном используют перегретый пар, хотя в некоторых случаях, наоборот, бывает предпочтительнее влажный пар.

Итак, процесс парообразования в общем случае можно разделить на три стадии: 1) подогрев воды до температуры насыщения; 2) испарение (парообразование) кипящей воды и, наконец, 3) превращение сухого пара в перегретый. При этом сухой пар является границей между влажным и перегретым паром. Такое состояние пара крайне неустойчиво, так как даже при самом незначительном подводе или отводе теплоты он превращается или в перегретый или во влажный пар.

Из рассмотренного процесса парообразования следует также, что в присутствии воды пар может быть только влажным. Такой пар при подводе к нему теплоты становится суше, оставаясь все-таки влажным. Перегретый пар можно получить только в том случае, если он не будет соприкасаться с водой. Практически в теплотехнике перегретый пар получается в особых устройствах, называемых пароперегревателями. Схема получения такого пара указана на рис. 2. На нем цифрой 1 обозначена топка парового котла, в которой происходит превращение воды во влажный пар. Этот пар отводится из топки по топочным экранам 2 в барабан котла 5, в котором происходит отделение пара от воды. И далее сухой пар из барабана котла направляется в трубчатые змеевики 6, 7, являющиеся пароперегревателями. Пароперегреватели обогрываются горячими газами, идущими из топки котла (уходящими газами). Так как пароперегреватель все время сообщен с паровым пространством котла, то давление пара в пароперегревателе приблизительно такое же, как и в котле.

### ЛИНИИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Изобразим рассмотренный в предыдущем подразделе процесс парообразования графически в системе  $vP$ -координат. Допустим, что при заданном давлении  $P_1$  и температуре  $0^\circ\text{C}$  удельный объем воды равен  $v_0$ . Это состояние воды изобразим на диаграмме точкой  $a_1$  (рис.3). Так как процесс парообразования происходит при постоянном давлении, то линия такого процесса будет являться изобарой, идущей из точки  $a_1$  вправо. Положим, что в момент начала кипения, когда температура подогреваемой воды станет равной  $t_s$ , состояние воды (жидкости) определяется точкой  $b_1$ ; в этот момент удельный объем воды увеличится до  $v'$ . При дальнейшем подводе теплоты будет получаться влажный пар, а когда вся вода перейдет в пар, он станет сухим (точка  $c_1$ ). Так как в процессе получения насыщенного пара температура его остается постоянной, то участок изобары  $b_1c_1$  является

одновременно и изотермой. Итак, точка  $b_1$  показывает начало кипения, а точка  $c_1$  – конец его; поэтому в точке  $b_1$  степень сухости  $x = 0$ , а в точке  $c_1$  степень сухости  $x = 1$ . Все промежуточные точки относятся к влажному пару. Понятно, что чем правее на линии  $b_1c_1$  располагается точка, определяющая состояние влажного пара, тем этот пар суше.

Если сухому пару сообщить некоторое количество теплоты, то он перейдет в перегретый пар, состояние которого может определяться, например, точкой  $d_1$ . Чем теплоты будет подведено больше, тем удельный объем перегретого пара  $v$  будет также больше, и точка  $d_1$  расположится дальше от точки  $c_1$ .

Если подобный процесс парообразования повторить при более высоком давлении  $p_2$  (например, увеличив нагрузку на поршень), то соответствующая этому давлению изобара расположится выше.

Воду (жидкость) считают практически несжимаемой и полагают, что удельный объем ее не зависит от давления. Поэтому без заметной погрешности можно точку  $a_2$ , определяющую состояние воды при давлении  $p_2$  и температуре  $0^\circ\text{C}$ , расположить на одной вертикали с точкой  $a_1$ . Строго же говоря, точка  $a_2$  должна быть расположена несколько левее точки  $a_1$ .

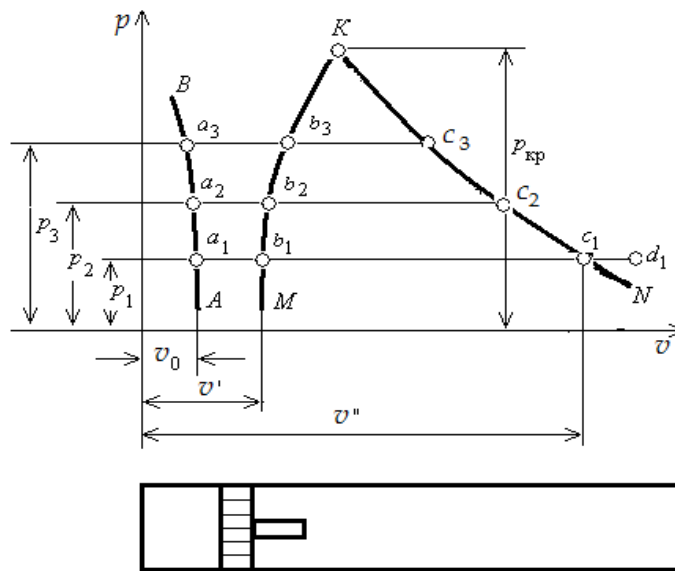


Рис. 3. Изображение в осях  $vP$  процессов парообразования, протекающих при постоянных давлениях

Как уже говорилось, с увеличением давления температура насыщения  $t_s$  повышается. Поэтому для того, чтобы довести воду до температуры кипения при более высоком давлении, ей нужно сообщить больше теплоты. При этом вода больше расширится

и удельный объем жидкости  $v'_2$  станет больше, чем  $v'_1$ . Ясно, что и точка  $b_2$ , определяющая состояние воды в момент начала кипения, должна быть расположена на изобаре  $p_2$  правее точки  $b_1$ .

Точка  $c_2$ , определяющая на диаграмме состояние сухого пара при давлении  $p_2$ , расположится на изобаре  $p_2$  левее точки  $c_1$ , так как опыт показывает, что с увеличением давления объем сухого пара уменьшается.

Проводя процесс парообразования при еще более высоком давлении  $p_3$ , получим точки  $a_3; b_3; c_3$ , определяющие состояние воды соответственно при  $0^\circ\text{C}$ , при начале кипения и в конце кипения, когда получится сухой пар.

Если одноименные точки на диаграмме соединить, то получим линию  $AB$  удельных объемов воды при  $0^\circ\text{C}$  и две линии  $MK$  и  $NK$ , сходящиеся в точке  $K$ . Линия  $MK$  представляет собой геометрическое место точек, обозначающих состояния воды в моменты начала кипения, а линия  $NK$  – геометрическое место точек, соответствующих состояниям сухого пара. Таким образом, линии  $MK$  и  $NK$  делят всю диаграмму на три области: область воды, лежащую левее  $MK$ , область влажного пара, расположенную между линиями  $MK$  и  $NK$ , и область перегретого пара, находящуюся правее линии  $NK$ . Кривая  $MK$  называется *линией жидкости*, а кривая  $NK$  – *линией сухого насыщенного пара*. Очевидно, что в точке  $K$  вода и насыщенный пар обладают одними и теми же значениями параметров  $p$ ,  $v$  и  $t$ , которые обозначаются  $p_k; v_k; t_k$  и называются *критическими*, а сама точка  $K$  – *критической точкой*.

Критическую точку имеет не только вода, но и все вообще вещества, что впервые было установлено Д.И. Менделеевым. Это открытие имеет чрезвычайно важное значение для всего дальнейшего развития теории реальных газов и поэтому представляет ценный вклад в мировую науку.

В настоящее время установлено, что для воды:

- критическое давление  $p_k = 225,65 \approx 225$  ата;
- критическая температура  $t_k = 374,15 \approx 374^\circ\text{C}$  и
- критический удельный объем  $v_k = 0,0031$  м<sup>3</sup>/кг.

Критическая точка лежит на границе трех состояний: перегретого и насыщенного паров и воды. Если, не изменяя объема, уменьшить давление (повести процесс по стрелке, идущей вниз на рис. 4), то получим влажный пар.

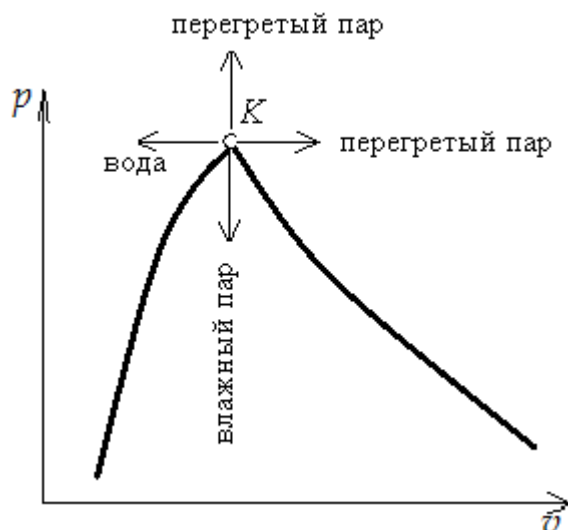


Рис. 4. Критическая точка  $K$  лежит на границе трех состояний: воды, влажного пара и перегретого пара

Если, также не изменяя объема, увеличить давление (стрелка вверх), то получим перегретый пар, и, наконец, если, не изменяя давления, уменьшить объем (стрелка влево), то получим воду.

### КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Представим себе, что в цилиндре под поршнем содержится перегретый пар. Пусть температура этого пара будет  $t_1$  и состояние его определяется на диаграмме точкой 1 (рис. 5).

Будем сжимать этот пар, оставляя температуру его неизменной (для чего теплоту от пара нужно отводить). Такой процесс сжатия может быть графически изображен линией 1–2, которая является изотермой перегретого пара. По мере сжатия давление пара, как это видно на диаграмме, будет повышаться, а сам пар все больше приближаться к состоянию насыщения и, наконец, в точке 2 превратится в сухой пар. При дальнейшем сжатии он перейдет в область влажного пара и будет становиться все более и более влажным (будет конденсироваться), пока не превратится весь в воду (точка 3). Так как такая конденсация происходит при постоянной температуре, то и давление пара должно также оставаться неизменным, а потому изотерма 2–3 будет являться одновременно и изобарой. Дальнейшее сжатие воды будет происходить по линии 3–4. Повторяя такой же процесс для перегретого пара, имеющего более высокую начальную температуру  $t'_1$  и определяемого на диаграмме точкой  $1'$ , получим изотерму  $1' - 2' - 3' - 4'$ , отличающуюся от первой более коротким

горизонтальным участком.

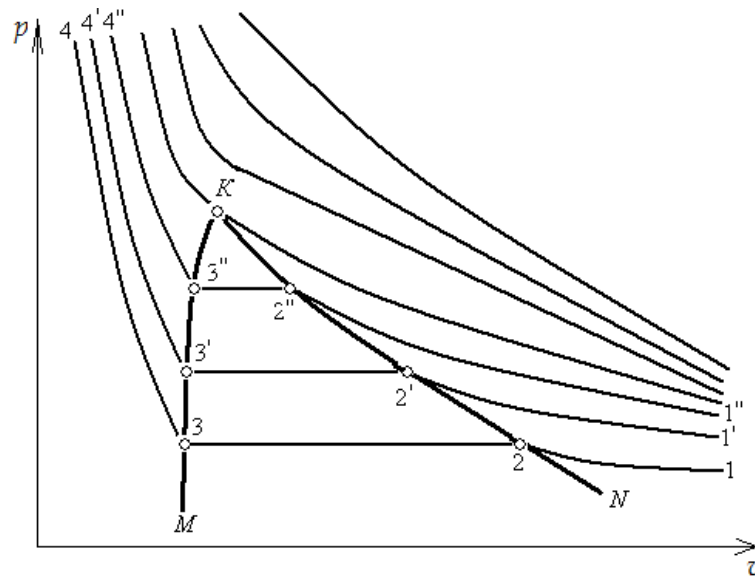


Рис. 5. Изображение в осях  $v p$  процессов, протекающих при постоянных температурах

При еще более высокой начальной температуре  $t_1''$  получим изотерму  $1'' - 2'' - 3'' - 4''$ , у которой горизонтальный участок  $2'' - 3''$  будет еще короче.

Наконец, если провести изотерму для пара, имеющего начальную температуру  $t_1''' = t_k = 374^\circ\text{C}$ , то эта изотерма не пересечет кривых  $MK$  и  $NK$ , а только коснется их в критической точке  $K$ . Изотермы с температурами больше  $374^\circ\text{C}$  будут проходить выше критической точки, имея над ней некоторый перегиб, который будет тем меньше, чем дальше от нее расположена изотерма и чем, следовательно, выше температура перегретого пара. При очень высоких температурах этот перегиб совсем исчезнет и изотерма примет вид, свойственный изотермам газов.

Важно отметить, что поскольку изотермы для температур выше критической не пересекают кривых  $MK$  и  $NK$ , то, следовательно, они лежат в области перегретых паров. Поэтому, *если пар имеет температуру выше критической, то сколько бы его ни сжимать при постоянной температуре, он никогда не перейдет в жидкость*. Это положение было впервые установлено Д.И. Менделеевым в 1861 г. и может быть сформулировано следующим образом: *критической температурой  $t_k$  называется такая температура, выше которой пар не может быть переведен при помощи изотермического сжатия в жидкость*.



Чем температура перегретого пара выше критической, тем он по своим свойствам больше приближается к идеальным газам. Вообще же перегретый пар можно рассматривать как несовершенный газ, т.е. не вполне подчиняющийся уравнению  $p\nu = RT$ .

Все реальные газы являются парами с очень низкими критическими температурами. В табл. 1 приведены значения критических температур и давлений для некоторых газов и водяного пара.

Таблица 1

Критические температуры и давления газов и водяного пара

Название газа	$t_k, ^\circ\text{C}$	$p_k, \text{ата}$
Водород $\text{H}_2$	-239,71	12,80
Азот $\text{N}_2$	-146,83	33,50
Воздух	-140,50	38,40
Окись углерода $\text{CO}$	-139,40	35,50
Кислород $\text{O}_2$	-118,62	50,80
Углекислота $\text{CO}_2$	+31,10	75,29
Аммиак $\text{NH}_3$	+130,70	114,00
Водяной пар $\text{H}_2\text{O}$	+374,15	225,65

## УДЕЛЬНЫЕ ОБЪЕМЫ ЖИДКОСТИ И ПАРА, ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ

### УДЕЛЬНЫЕ ОБЪЕМЫ ЖИДКОСТИ И ПАРА

Удельный объем жидкости зависит от температуры и давления. Однако последняя зависимость настолько незначительна, что практически ею пренебрегают.

Зависимость же удельного объема воды от температуры более заметна. Так, например, если при  $0^\circ\text{C}$  и любом давлении удельный объем жидкой кипящей воды  $\nu'_0 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$ , то при температуре  $100^\circ\text{C}$  (и давлении  $\sim 1 \text{ ата}$ )  $\nu' = 0,001043 \text{ м}^3/\text{кг}$ , а при температуре  $200^\circ\text{C}$  (и давлении  $\sim 16 \text{ ата}$ )  $\nu' = 0,001156 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Из этих данных следует, что при невысоких давлениях (точнее температурах) и этой зависимостью также можно пренебрегать, полагая, следовательно, что  $\nu' = \nu'_0 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Удельный объем влажного пара  $\nu_x$  находится в пределах между  $\nu'$  и  $\nu''$  (рис. б). Величина его зависит от степени сухости пара  $x$ . Если в  $1 \text{ кг}$  влажного пара содержится  $x \text{ кг}$  сухого пара и  $(1 - x) \text{ кг}$  воды, то эти  $x \text{ кг}$  сухого пара будут занимать объем  $x \nu'' \text{ м}^3/\text{кг}$ , а  $(1 - x) \text{ кг}$

ВОДЫ  $(1-x)v'v'$  м<sup>3</sup>/кг.

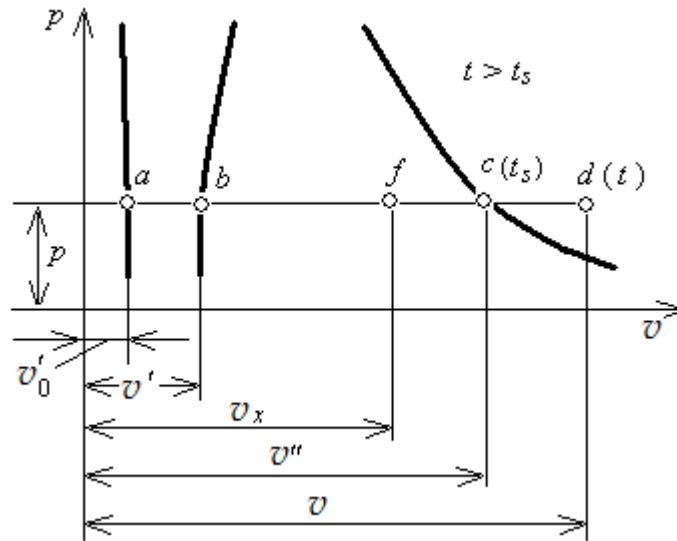


Рис. 6. Изображение удельных объемов воды в осях  $vp$  при различных ее состояниях

Следовательно,

$$v_x = x v'' + (1-x) v' \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Так как влажный пар, применяемый в теплотехнике, имеет обычно большую степень сухости (порядка 0,9 и больше), то объемом воды, содержащейся в нем, можно пренебрегать, считая, что

$$v_x \approx x v'' \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Неточность, допускаемая при этом, получается незначительной.

При небольшой степени сухости пара и высоком давлении пользоваться упрощенным уравнением (5) нельзя, так как ошибка при этом может оказаться уже значительной. Практически это уравнение применяют к парам, имеющим степень сухости  $x$  не меньше 0,7.

Для нахождения удельного объема перегретого пара было предложено в разное время несколько уравнений, дающих приближенные результаты. Наиболее точным из них является уравнение проф. М.П. Вукаловича и проф. И.И. Новикова, однако оно очень сложно. Поэтому удельные объемы перегретого пара обычно находят по специальным таблицам.

## ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ

Процесс получения перегретого пара при постоянном давлении можно разделить, как уже говорилось, на три стадии:

- 1) подогрев воды от 0 °С до температуры насыщения  $t_s$ ;
- 2) превращение всего количества воды, подогретой до температуры насыщения  $t_s$  в сухой пар (стадия парообразования);
- 3) перегрев сухого пара от температуры  $t_s$  до любой температуры  $t$  (выше  $t_s$ ).

*Теплота, которую нужно сообщить 1 кг воды, взятой при 0 °С, чтобы довести ее при постоянном давлении до температуры насыщения, называется теплотой жидкости  $\lambda'$  (первая стадия).*

*Теплота, которую нужно сообщить при постоянном давлении 1 кг воды, доведенной уже до температуры насыщения, чтобы превратить ее в сухой пар, называется теплотой парообразования  $r$  (вторая стадия).* Как известно, при подводе или отводе этой теплоты температура воды не изменяется. Теплота парообразования складывается из внутренней теплоты парообразования  $\rho$  и внешней теплоты парообразования  $\phi$  (греческая буква «пси»). Внутренняя теплота парообразования  $\rho$  есть та часть теплоты  $r$ , которая расходуется на преодоление молекулярных сил в жидкости, т.е. на увеличение ее внутренней энергии. Внешняя теплота парообразования  $\phi$  есть та часть теплоты  $r$ , которая затрачивается на работу преодоления внешних сил, действующих на жидкость. В результате совершения этой работы объем воды увеличивается от  $v'$  до  $v''$ . Так как рассматриваемый процесс парообразования происходит при постоянном давлении  $p$ , то эта работа равна  $p(v'' - v')$  кГМ/КГ, а соответствующее ей количество теплоты  $\phi$  может быть выражено уравнением

$$\phi = A p(v'' - v') \text{ ккал/кг.}$$

Таким образом,  $r = \rho + \phi$  Подставляя в это уравнение значение для  $\phi$ , можем написать

$$r = \rho + A p(v'' - v') \text{ ккал/кг.}$$

Теплота парообразования уменьшается с увеличением давления и при критическом давлении  $p_k$  она равна нулю.

Большую часть теплоты  $r$  составляет внутренняя теплота парообразования  $\rho$ . Поэтому при изучении свойств водяных паров нельзя пренебрегать молекулярными

силами, как это обычно делается при изучении газов (в последних, как известно, молекулярные силы настолько малы, что ими можно пренебрегать, полагая  $\rho = 0$ ).

Теплота жидкости и теплота парообразования в сумме составляют *полную теплоту сухого насыщенного пара*  $\lambda''$ .

*Количество теплоты, которое нужно сообщить 1 кг сухого насыщенного пара, чтобы превратить его при постоянном давлении в перегретый пар, называется теплотой перегрева*  $q_{\text{пер}}$  (третья стадия). Это количество теплоты может подсчитываться по уравнению

$$q_{\text{пер}} = c_{pm} (t - t_s) \text{ ккал/кг,}$$

где:

$t$  – температура перегретого пара;

$t_s$  – температура насыщения;

$c_{pm}$  – средняя весовая изобарная теплоемкость перегретого пара в пределах этих температур.

Теплоемкость перегретого водяного пара, в отличие от теплоемкости идеальных газов, зависит не только от температуры, но также и от давления пара. Значения этой теплоемкости приводятся в специальных таблицах.

Таким образом, *полной теплотой перегретого пара называется такое количество теплоты, которое нужно сообщить при постоянном давлении 1 кг воды, взятой при 0 °С, чтобы превратить ее в перегретый пар.*

## ЭНТАЛЬПИЯ И ЭНТРОПИЯ ЖИДКОСТИ И ПАРА

### ЭНТАЛЬПИЯ ЖИДКОСТИ И ПАРА

Напишем уравнение первого закона термодинамики для 1 кг тела в общем виде:

$$q = (u_2 - u_1) + Al \text{ ккал/кг.}$$

Подведенное к телу количество теплоты затрачивается на изменение внутренней энергии и на совершение работы.  $A$  – коэффициент.

Для изобарного процесса можно записать  $l = p(v_2 - v_1)$  (рис. 7).

Допустим, что 1 кг газа, имеющего удельный объем  $v_1$ , заключен в цилиндр с поршнем, нагруженным грузом.

Если этот газ подогреть, не изменяя давления, то объем его, очевидно, увеличится и в какой-нибудь момент станет равным  $v_2$ . При расширении газ произведет внешнюю

работу, которая выразится в поднятии поршня. Как известно, работа равна произведению силы на путь, т.е.

$$l = Q \cdot S,$$

где:

$l$  – работа 1 кг газа при поднятии поршня с постоянным грузом;

$Q$  – общее давление на поршень;

$S$  – расстояние, на которое передвинулся поршень при совершении газом работы  $l$ .

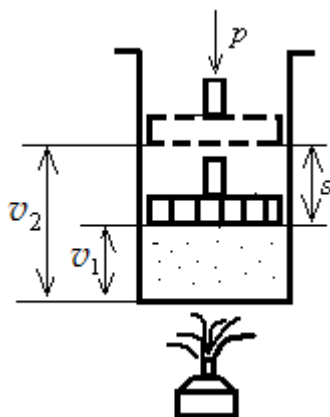


Рис. 7. К объяснению значения совершаемой работы

Если обозначим давление газа, приходящегося на 1 м<sup>2</sup> площади поршня, через  $p$ , а площадь поршня через  $F$  м<sup>2</sup>, то общее давление  $Q$  на поршень будет равно  $pF$ . При этом  $l = p \cdot F \cdot S$  кгм/кг.

Но  $F \cdot S$  – объем цилиндра, имеющего площадь основания  $F$  и высоту  $S$ . Обозначим этот объем через  $v$  (удельный объем газа).

$$\text{Тогда } l = p \cdot F \cdot S = p \cdot v$$

Как видно из рис.7,  $v = v_2 - v_1$ , а поэтому

$$l = p(v_2 - v_1) \text{ кгм/кг.}$$

Тогда уравнение 6 можно записать

$$q = (u_2 - u_1) + A p(v_2 - v_1) \text{ кДж/кг.}$$

Перегруппировывая члены в правой части уравнения, получим

$$q = (u_2 + A p v_2) - (u_1 + A p v_1) \text{ кДж/кг.}$$

Правая часть этого уравнения является разностью двух выражений, представляющих собой одну и ту же величину вида  $u + A p v$ . Эта величина называется **э н т а л п и е й** (теплосодержанием) и обозначается через  $h$ . Итак,

$$h = u + A p v. \tag{8}$$

Как видим, энтальпия определяется тремя величинами:  $u$ ,  $p$  и  $v$ , являющимися

параметрами состояния рабочего тела. Следовательно, энтальпия тоже является параметром состояния и должна измеряться так же, как измеряются  $u$  и  $A p v$ , т.е. в килокалориях или килоджоулях. Все величины, входящие в уравнение (8), должны относиться к одному состоянию тела. Например, если состояние его определяется точкой 1, то  $h_1 = u_1 + A p v_1$  кДж/кг.

В дальнейшем мы увидим, что энтальпия позволяет значительно упростить и сокращать расчеты, связанные с теплотой, вследствие чего этот параметр широко применяется в теплотехнических расчетах, в особенности в расчетах, относящихся к парам.

Если в уравнении (7) для изобарного процесса подставить величину  $h$ , то оно приобретает очень простой вид:

$$q = h_2 - h_1 \text{ кДж/кг}$$

Значения  $i$  берутся из специальных таблиц или диаграмм, о которых будет сказано ниже.

Посмотрим, как вычисляют энтальпию для воды и пара (рис. 8).

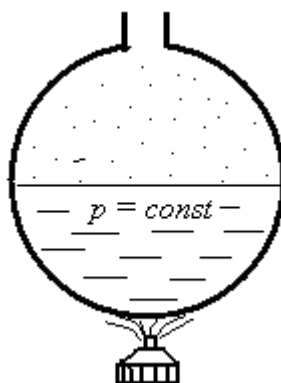


Рис. 8. К объяснению определения энтальпии воды и пара

При нагревании воды от  $0^\circ\text{C}$  до температуры насыщения  $t_s$  вода приобретает энтальпию  $i'$ , называемой энтальпией кипящей жидкости. После чего начинается парообразование и получается влажный насыщенный пар, энтальпию которого можно определить по формуле

$$h_x = h' + xr \text{ кДж/кг}$$

При этом температура насыщения в сосуде остается постоянной, соответствующей давлению в сосуде. Парообразование происходит за счет величины  $r$ , называемой скрытой теплотой парообразования (см. ранее). Когда вся вода испарится, получается сухой насыщенный пар, степень сухости которого  $x$  равна 1. Энтальпия сухого насыщенного пара определится как:

$$h'' = h' + r \text{ кДж/кг.}$$

Нагревая далее сухой насыщенный пар и, повышая его температуру, получаем перегретый пар, энтальпию которого можно определить по формуле

$$h = h'' + c_{pm}(t - t_s) \text{ кДж/кг.}$$

где  $t$  – температура перегретого пара.

## ЭНТРОПИЯ ЖИДКОСТИ И ПАРА

Как известно, из всей подведенной в круговом процессе теплоты  $Q_1$  в полезную работу переводится только  $(Q_1 - Q_2)$  ккал, а  $Q_2$  ккал передается в теплоприемник. Теплота  $Q_2$  является прямой. Хотя и необходимой, потерей, которую следует стремиться уменьшить.

Выясним, от каких факторов она зависит. Допустим, что совершается равновесный цикл Карно (рис. 9).

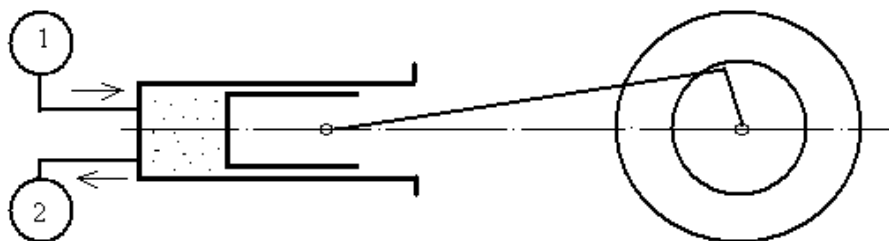


Рис. 9. Система тел, участвующих в совершении термодинамических циклов

$$\text{Для этого цикла } \eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \text{ или } \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Отсюда имеем

$$Q_2 = \frac{Q_1}{T_1} T_2.$$

Как видим, величина  $Q_2$  зависит от двух множителей: отношения  $\frac{Q_1}{T_1}$  и температуры  $T_2$ . Если температуру считать величиной постоянной, то потеря теплоты  $Q$ , зависит практически только от величины отношения  $\frac{Q_1}{T_1}$ . Чем больше это отношение, тем больше потеря  $Q_2$ .

Учитывая большую роль отношения  $\frac{Q}{T}$ , в термодинамику введена особая величина, зависящая от этого отношения и названная **э н т р о п и е й**.

Если равновесный процесс подвода или отвода теплоты совершается при постоянной температуре, как в цикле Карно, то изменение энтропии в таких процессах для

1 кг тела будет

$$s_2 - s_1 = \frac{q}{T} = 2,3 c_{pt} \lg \frac{T_2}{T_1} \text{ кДж/кг·град}, \quad (10)$$

где:

$q$  – участвующая в процессе теплота;

$T$  – температура, при которой совершается процесс.

В приведенной формуле  $s_1$  принимают равной нулю при  $T_1 = 273$  °С, теплоемкость воды принимается равной 4,19 кДж/кг·град.

*Под энтропией жидкости (воды) подразумевают увеличение энтропии 1 кг воды, имеющей температуру 0 °С, в процессе нагревания ее при постоянном давлении до кипения.*

*Энтропия сухого насыщенного пара  $s''$  представляет собой увеличение энтропии 1 кг воды, взятой при 0 °С, в процессе превращения ее при постоянном давлении в сухой насыщенный пар.*

Процесс получения пара из кипящей воды происходит при постоянной температуре; поэтому изменение энтропии в этом процессе может быть найдено по уравнению

$$s_2 - s_1 = \frac{q}{T}.$$

В данном случае  $s_2 = s''$  (энтропия сухого пара),  $s_1 = s'$  (энтропия жидкости);  $q = r$  – (теплота парообразования) и  $T = T_s$ .

Таким образом

$$s'' - s' = \frac{r}{T_s},$$

откуда

$$s'' = s' + \frac{r}{T_s}$$

или

$$s'' = 2,3 \lg \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s}.$$

Понятно, что энтропия влажного пара  $s_x$ , для которого  $q = xr$ , будет равна:

$$s_x = s' + \frac{xr}{T_s},$$

или



$$s_x = 2,3 \lg \frac{T_s}{273} + \frac{xr}{T_s}.$$

Энтропия перегретого пара  $s$  представляет собой увеличение энтропии 1 кг воды, взятой при 0 °С, в процессе превращения ее при постоянном давлении в перегретый пар.

В процессе перегрева при постоянном давлении температура пара повышается, поэтому изменение энтропии в процессе перегрева нужно подсчитать по уравнению

$$s - s'' = 2,3 c_{pm} \lg \frac{T}{T_s},$$

где:

$c_{pm}$  – средняя изобарная теплоемкость перегретого пара,

$T$  – абсолютная температура перегретого пара.

Из этого уравнения получаем

$$s = s'' + 2,3 c_{pm} \lg \frac{T}{T_s}$$

или окончательно

$$s = 2,3 \lg \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s} + 2,3 c_{pm} \lg \frac{T}{T_s}.$$

