

5.3 Термодинамические свойства воды и водяного пара

Вода и водяной пар являются основным рабочим веществом теплоэнергетических установок и поэтому следует более подробно рассмотреть их свойства.

Укажем вначале параметры характерных состояний воды

В тройной точке: температура $t_T = 0,01^\circ\text{C} = 273,16\text{ К}$; давление $p_T = 0,6117\text{ кПа}$; удельный объем воды $v_T' = 0,001000211\text{ м}^3/\text{кг}$.

При составлении уравнений состояния и таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара состояние жидкости в тройной точке принято за начало отсчета значений внутренней энергии и энтропии. Поэтому $u_T' = 0$, $s_T' = 0$ и значение энтальпии жидкости

$$h_T' = u_T' + p_T v_T' = 0 + 0,6117 \cdot 0,001000211 = 6,117 \cdot 10^{-4}\text{ кДж/кг} \approx 0$$

В критической точке: температура $t_k = 373,946^\circ\text{C} = 647,096\text{ К}$ (МТШ -90); давление $p_k = 22,064\text{ МПа}$, удельный объем $v_k = 0,003106\text{ м}^3/\text{кг}$.

В области жидкого состояния воде присущи некоторые особенности изменения термодинамических свойств, отличающие ее от других жидкостей. При атмосферном давлении при нагревании воды от 0°C происходит не уменьшение, а увеличение ее плотности (уменьшение объема) вплоть до максимума плотности при температуре $3,98^\circ\text{C}$. С ростом давления максимум плотности смещается в область более низких температур (рис. 5.12) и при давлении 32 МПа он приходится на линию затвердевания воды. Следовательно, при больших давлениях аномалии в изменении плотности воды при нагревании не наблюдается. Аномалия имеется и в изменении изобарной теплоемкости. При атмосферном давлении при нагревании вплоть до температуры 34°C теплоемкость не увеличивается, а уменьшается. Аномалии присутствуют и в изменении других физических свойств (скорости звука, вязкости, теплопроводности и др.).

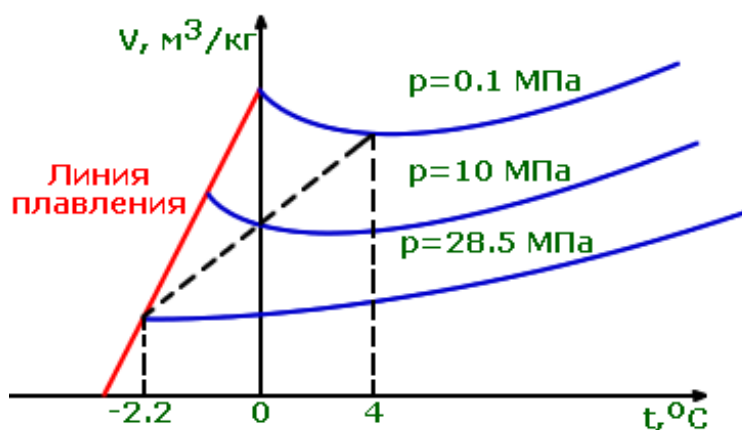


Рис. 5.12

В твердом состоянии вода имеет 7 кристаллических модификаций, из которых только одна – лед I – обладает аномальными свойствами как описано в разделе 5.2. У этого льда с ростом

давления температура плавления изменяется от 0 до -22°C , где при давлении 210 МПа происходит его полиморфный переход в нормальный лед III. Таким образом, минимальная температура, при которой может существовать стабильная жидкая вода, равна -22°C .

Термодинамические свойства воды и водяного пара достаточно хорошо изучены и аналитически представлены Международным уравнением IAPWS –95 [6], действующем в области давлений 0 –1000 МПа от температуры плавления до 1000°C . Независимыми переменными в нем являются температура и удельный объем, что приводит к необходимости большого числа итерационных вычислений при практических расчетах. Поэтому для инженерных расчетов применяется Международная система уравнений для промышленных расчетов IF –97 [7,8]. Она содержит 5 уравнений, в совокупности описывающих свойства воды и водяного пара в области давлений 0 –100 МПа при температурах от 0 до 800°C (при $p < 10$ МПа до 2000°C), причем основная область, где работают энергетические установки, представлена в удобных для практических расчетов переменных. На базе этих уравнений созданы таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара и программный модуль для их вычисления [9].

Как было выяснено в разделе 5.1, в двухфазном состоянии вещество обладает одной термодинамической степенью свободы. Поэтому в таблицах термодинамических свойств данные о свойствах воды и водяного пара в состоянии насыщения (т.е. на левой и правой пограничных кривых) приводятся в зависимости от одного параметра, причем для удобства использования даны как в зависимости от температуры, так и давления, в двух отдельных таблицах. Однофазные состояния вещества имеют две термодинамические степени свободы и таблица свойств воды и перегретого пара построена в зависимости от температуры и давления. Для определения же свойств *влажного насыщенного пара* (смеси кипящей воды и сухого насыщенного пара) приходится прибегать к дополнительным вычислениям.

Для задания состояния влажного пара дополнительно используется показатель содержания сухого насыщенного пара в смеси –*степень сухости* x

$$x = m'' / (m'' + m'), \quad (5.12)$$

значения которой могут, очевидно, изменяться от 0 (кипящая жидкость) до 1 (сухой насыщенный пар).

С помощью ее все свойства влажного пара рассчитываются по правилу аддитивности

$$v_x = (1 - x)v' + xv'', \quad (5.13)$$

$$h_x = (1 - x)h' + xh'', \quad (5.14)$$

$$s_x = (1 - x)s' + xs'', \quad (5.15)$$

причем значения свойств кипящей воды (') и сухого пара (") берутся из таблиц свойств воды и водяного пара в состоянии насыщения. Заметим, что в практических расчетах степень сухости

редко находится по ее определению (5.12), а гораздо чаще вычисляется по одному из свойств влажного пара

$$x = (v_x - v') / (v'' - v') = (h_x - h') / (h'' - h') = (s_x - s') / (s'' - s') \quad (5.16)$$

Величина $y = 1 - x$ называется *влажностью пара*.

При анализе процессов и циклов водяного пара широко применяются энтропийные диаграммы T, s и h, s . В T, s -диаграмме (рис.5.13) изобары докритического давления в двухфазной области имеют горизонтальный участок, так как процесс парообразования происходит при постоянном давлении и неизменной температуре, а критическая изобара имеет точку перегиба в критической точке. В области жидкости изменение энтропии с давлением, равно согласно (4.19) $(\partial s / \partial p)_T = -(\partial v / \partial T)_p$, очень мало, так как термическое расширение воды невелико, и изобары в этой диаграмме очень близки к левой пограничной кривой. Поэтому диаграмму T, s часто изображают так, как показано на рис. (5.14), считая, что докритические изобары совпадают с левой пограничной кривой. В области влажного пара можно нанести линии постоянной степени сухости, поделив каждую изобару на пропорциональные части (рис.5.14.).

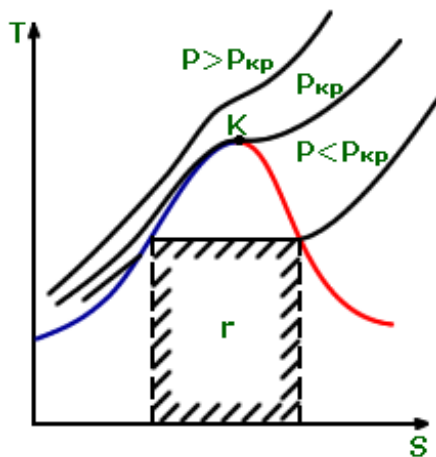


Рис. 5.13

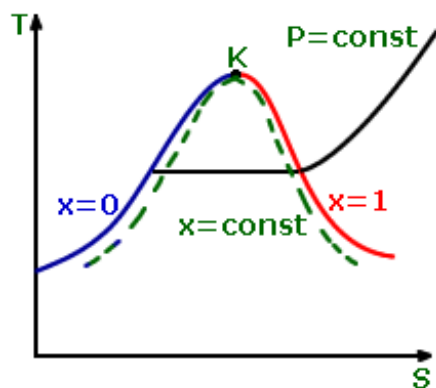


Рис. 5.14

Диаграмма h,s часто применяется как расчетная в прикидочных расчетах. На рис. 5.15 представлена область перегретого пара и часть области влажного пара, примыкающая к правой (верхней) пограничной кривой, так как диаграмма удобна для расчета турбин и другого оборудования, работающего именно в этих областях. Критическая точка и область малых значений энтропии на диаграмме отсутствуют. В области влажного пара изобары представляют собой прямые линии, так как наклон их определяется выражением $(\partial h/\partial s)_p = T$, а в этой области на изобаре $T = \text{const}$. С ростом давления температура насыщения возрастает и изобары составляют пучок расходящихся линий. При переходе в перегретый пар температура плавно изменяется и изобара имеет вид плавной кривой, пересекающей пограничную кривую без излома. Изотермы, в области влажного пара совпадающие с изобарами, по выходе в перегретый пар имеют излом и по мере увеличения энтропии приближаются к горизонтальным линиям, что отражает факт однозначной зависимости энтальпии от температуры для идеального газа. В области влажного пара нанесены линии постоянной степени сухости пара, что позволяет при расчетах избежать необходимости вычисления ее по соотношениям (5.16). Наконец, в диаграмме имеются и изохоры в виде линий, с изломом пересекающих верхнюю пограничную кривую.

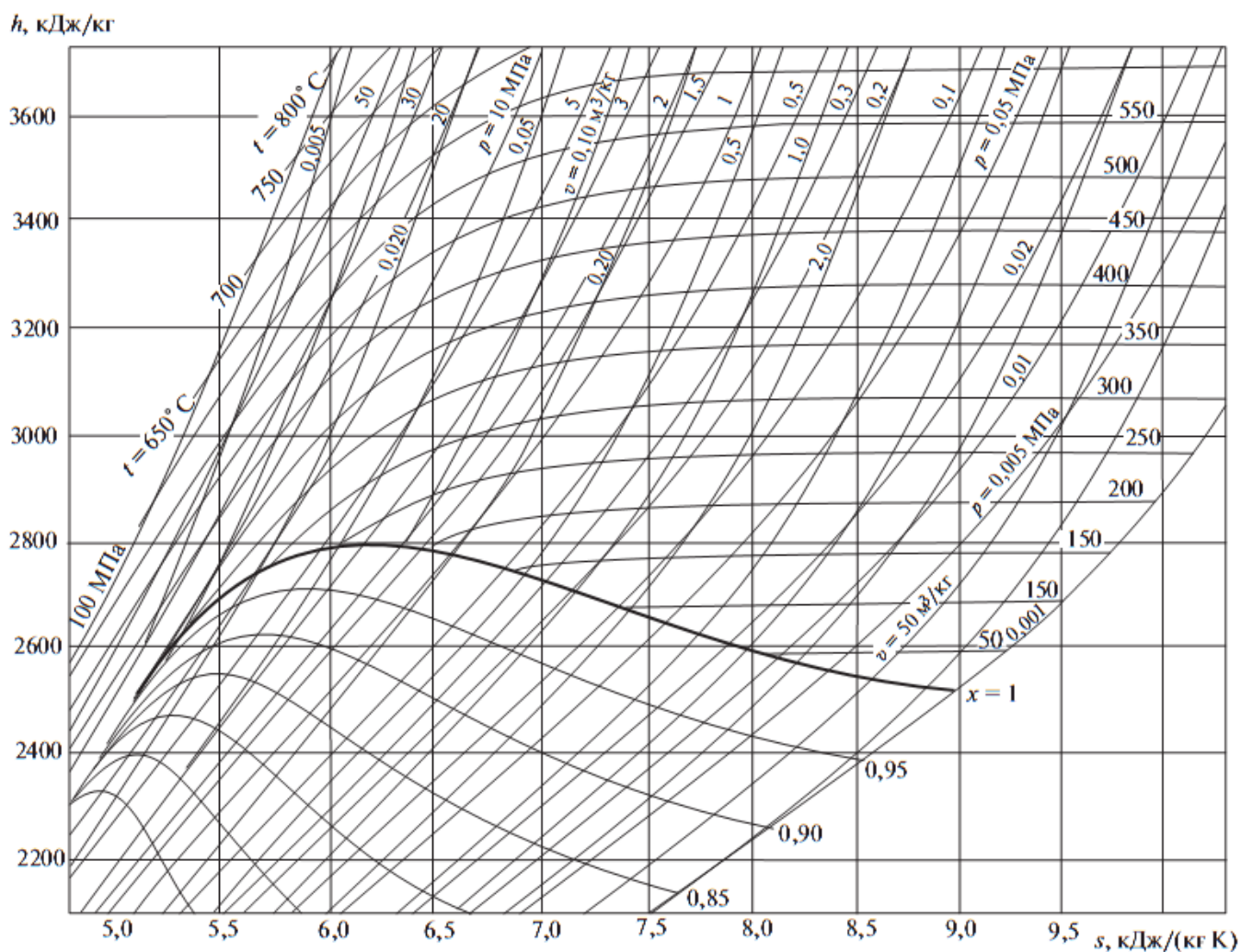


Рис. 5.15

Таким образом, с помощью h,s –диаграммы, изданной в достаточно большом масштабе, можно определить все термодинамические свойства пара в области параметров, в которой расчет процессов производится наиболее часто. Но область жидкости и очень влажного пара на ней отсутствует.