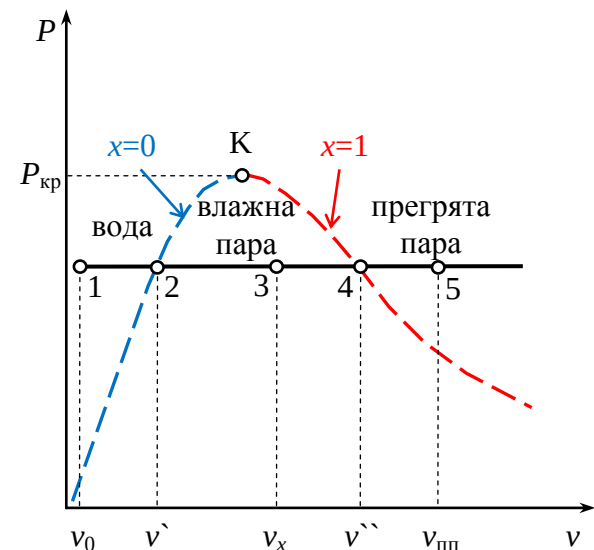


Водна пара

Работна и топлинна диаграма

Реалните кръгови процеси с достатъчно висок КПД могат да се осъществяват в двуфазна система, тъй като в процеса на кипене може да се поддържа постоянна температура. При температури, които ние можем да постигнем със сравнително малък разход на енергия, най-подходящото работно тяло се оказва водата, която има и допълнителното предимство, че е в достатъчно голямо количество и позволява многократно използване. Затова ще се спрем по-подробно на процесите, които се извършват при кипенето на вода.

Ще разгледаме етапите на загряване на водата в работна ($P-V$) и топлинна ($T-S$) диаграми. При пресмятане на параметрите на водата и водната пара в реалните топлинни машини се използват специфичните стойности на параметрите (за 1 kg), тъй като по този начин те са приложими за произволни конструкции на машините и произволни количества вода т.е. ние ще представяме процесите в $P-v$ и $T-s$ диаграми.

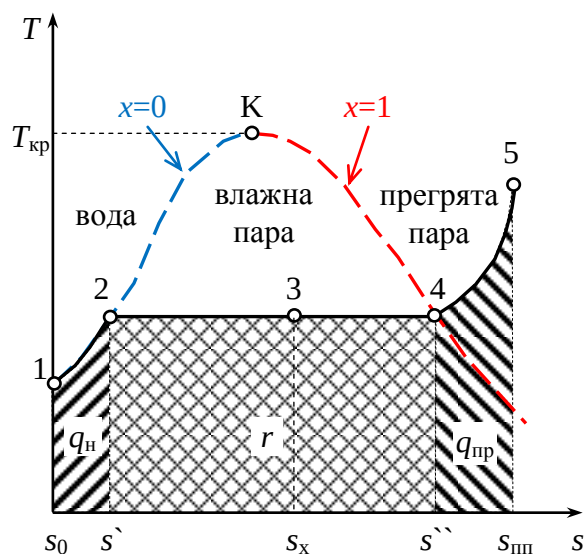


фиг. 1

на водата ще бъде изобарен и на работната диаграма ще се представя с права линия (фиг. 1), а на топлинната – с две експоненти и права линия между тях (фиг. 2), тъй като изобарите в $T-S$ диаграма са експоненти (17 въпрос), а в двуфазната област и температурата е постоянна. От топлинната диаграма (фиг. 2) можем също да определим и специфичните топлини, които се предават на системата (17 въпрос) в различните етапи на загряване.

При загряването на водата може да се отделят пет етапа: **1** – водата е с начална температура t_0 и специфичен обем v_0 и в резултат на загряването, температурата и специфичният обем се повишават до достигане на температурата на кипене при даденото налягане. Обикновено за t_0 се взема тройната точка на водата и тогава специфичният ѝ обем малко се увеличава до 4°C . Предадената топлина q_n се изразходва за загряване на водата до степен на насищане (специфична топлина на насищане); **2** – водата започва да кипи при достигнатата температура, която не се променя до пълното изпаряване на водата (в състояние **4**). Специфичният обем $v' > v_0$; **3** – част от кипящата вода се е изпарила, т.е. в обема има едновременно две фази – смес от кипяща вода и наситена пара. Такава система се нарича влажна пара. Специфичният обем на влажната пара $v_x > v'$. Подаването на топлина към двуфазната система не променя температурата ѝ, а плътността т.е. цялата внесена топлина r (това е специфичната топлина на изпарение на водата) се изразходва за парообразуване, което става все по-интензивно; **4** – цялата вода се е изпарила, достигнали сме пак до еднофазна система от суха наситена пара. Специфичният обем на сухата наситена пара $v'' > v_x$; **5** – парата започва да увеличава и

За да можем да осъществим двуфазно състояние, трябва температурата, при която водата кипи, да е по-ниска от критичната температура на водата и по-висока температурата на тройната точка, тъй като кривата на изпарение се простира между тези две точки (22 въпрос). Камбановидната крива, която ограничава двуфазните състояния, преминава през двата края на хоризонталните участъци (22 въпрос), следователно можем да я разделим условно на две части: лявата част, която завършва в критичната точка, свързва състояния при различни температури и налягания, за които имаме вода при температура на кипене, преди да е започнало парообразуване т.е. за нея паросъдържанието $x=0$; дясната част на кривата, която започва в критичната точка, съответства на всички състояния на суха наситена пара т.е. $x=1$. Тъй като процесите в реалните топлинни машини се извършват при постоянно налягане, процесът на загряване



фиг. 2

температурата си заедно със специфичния си обем. Това е състояние на прегрята пара. Топлината на прегряване $q_{пр}$ зависи от температурата и налягането на прегрята пара, до които искаме да достигнем.

Характеристики на водата и парата

За практически пресмятания е важно да се знаят характеристиките на водата и парата в началното състояние (тройната точка) както и връзката на параметрите през различните етапи на загряване с тях. Важно е да се знаят и параметрите на критичната точка **К**.

Тройната точка на водата има координати $T_{тр}=273,16\text{ К (0,01}^{\circ}\text{C)}$ и абсолютно налягане $P_{кр}=610,527\text{ Па (4,579 mm Hg)}$, което е около **0,6%** от атмосферното. Тъй като всички процеси в топлинните машини протичат при много по високо налягане $\sim\text{МПа}$, обикновено се приема, че налягането в тройната точка е нула. Много малки стойности при тази температура имат също така специфичната ентропия s_0 , специфичната енталпия h_0 и специфичната вътрешна енергия u_0 , поради което техните стойности също се приемат за нула.

Параметрите в критичната точка са: $P_{кр}=22,115\text{ МПа}$; $T_{кр}=647,27\text{ К (374,12}^{\circ}\text{C)}$; $v_{кр}=0,003147\text{ m}^3/\text{kg}$; $h_{кр}=2095,2\text{ kJ/kg}$; $s_{кр}=4,4237\text{ kJ/(kg.K)}$.

Параметрите в което и да е състояние могат да бъдат пресметнати от началните параметри и първия принцип на термодинамиката (7 въпрос), като се имат предвид определенията за съответните величини. Напр. за енталпията в състояние на насищане h' ще получим

$dq = dh$, за изобарен процес (16 въпрос)

$$q_h = h' - h_0 = h',$$

за сухата наситена пара

$$r = h'' - h'$$

$$h'' = h' + r = q_h + r$$

и т.н. Топлините на насищане, изпарение и прегряване се определят експериментално за съответните температури и налягания. По подобен начин можем да определим и вътрешните енергии и ентропиите в различните състояния

$$dq = dh = du + PdV$$

$$du = dh - PdV$$

$$u' - u_0 = h' - h_0 - P_h (v' - v_0)$$

$$u' = h' - P_h (v' - v_0) \approx h' = q_h$$

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{dh}{T} = c_p \frac{dT}{T}$$

$$s' - s_0 = c_{p,b} \int_{T_0}^{T_h} \frac{dT}{T} = c_{p,b} \ln \frac{T_h}{T_0}.$$

$$s' = c_{p,b} \ln \frac{T_h}{273,16}$$

При не много големи налягания промяната на специфичния обем на водата при загряване до насищане е пренебрежимо малка ($v' \approx v_0$), а специфичния ѝ топлинен капацитет при постоянно налягане $c_{p,b} \approx \text{const}$. Работните температура и налягане (при насищане) обикновено се отбелязват с P_h и T_h .

$$r = u'' - u' + P_h (v'' - v')$$

$$u'' = u' + r - P_h (v'' - v') = h' - P_h v'' = q_h + r - P_h v''$$

$$s'' - s' = \frac{r}{T_h}$$

$$s'' = s' + \frac{r}{T_h},$$

тъй като в този процес температурата е постоянна и дори не е необходимо да интегрираме.

Параметрите на водата и сухата наситена пара (лявата и дясната гранична линия) могат да се определят ако знаем един от двата основни параметъра на насищане, P_h или T_h , тъй като те са свързани. За да определим параметрите на прегрята пара са ни необходими и двата параметъра на парата $P_{пр}$ и $T_{пр}$, както и средната стойност на специфичния ѝ топлинен капацитет при постоянно налягане $c_{p,пр}$:

$$q_{np} = c_{p,nn} (T_{nn} - T_n)$$

$$h_{nn} = h'' + q_{np}$$

$$u_{nn} = h_{nn} - P_{nn} v_{nn} \quad .$$

$$s_{nn} = s'' + \int_{T_n}^{T_{nn}} \frac{dh}{T}$$

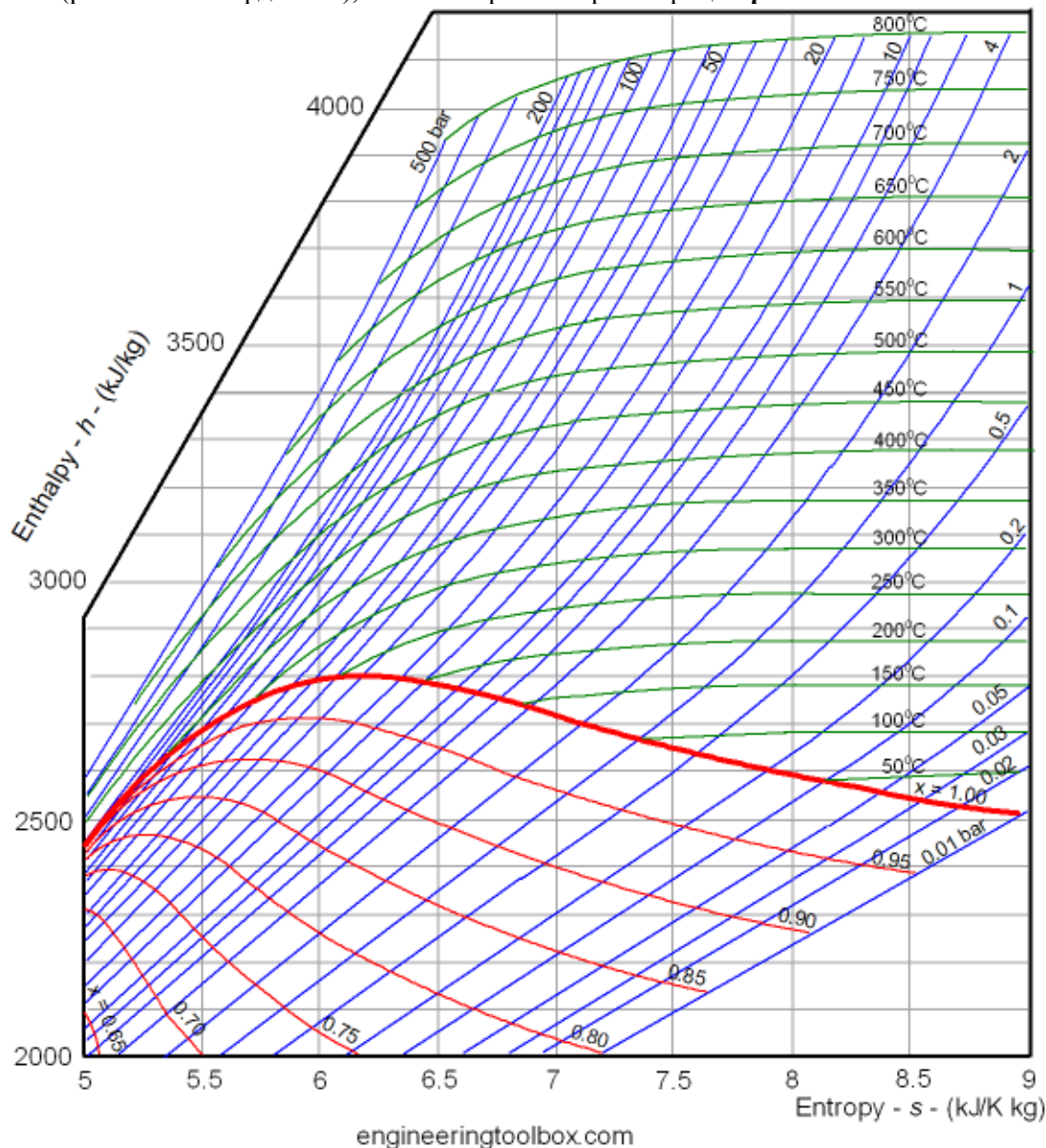
За областта на мократа пара не са достатъчни дори и двата параметъра P_n или T_n , а трябва да известен поне още един – напр. паросъдържанието x . Тогава параметрите на влажната пара са

$$h_x = h'' + x r$$

$$u_x = h_x - P_n v_x \quad .$$

$$s_x = s'' + x \frac{r}{T_n}$$

Всички параметри на водата и парата обикновено се отчитат по т.нар. парни таблици, които са получени на базата на голям брой обработени опитни данни (<http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-tables.asp>). Много често се работи и с т.нар. Молиерови диаграми – това всъщност са $h-s$ диаграми (фиг. 3), получени пак на базата на много експериментални данни. Предимството им е, че докато от топлинната диаграма можем да получим съответните топлини като площ под крива, от $h-s$ диаграмата ги определяме като дължини на отсечки (разлика от координати), тъй като при изобарния процес $q = \Delta h$.



фиг. 3