



**Физико-технический  
институт**

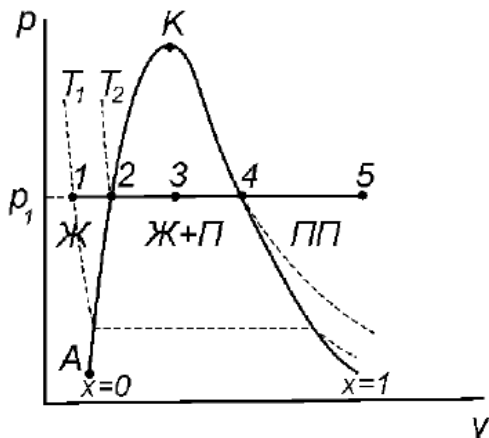
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



## Практическое занятие №6

### Водяной пар и паровые процессы

11 марта  
2016



т. А – тройная точка, в которой одновременно существуют твердая, жидкая и паровая фазы (для воды  $p_A = 610.8$  Па,  $T_A = 273.16$  К,  $v_A = 0.001$  м<sup>3</sup>/кг); т. К – критическая точка, в которой одновременно существуют жидкая и паровая фазы (для воды  $p_K = 221.15$  бар,  $T_K = 647.27$  К,  $v_K = 0.003147$  м<sup>3</sup>/кг);  $x$  – степень сухости пара.



Вода и водяной пар могут находиться в пяти состояниях:

1. Недогретая до температуры кипения вода (область Ж). 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 (область Ж + П). 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 (область ПП). При этом параметры состояния обозначаются как  $p, v, T, h, u, s$ .



В практических расчетах для определения параметров воды и водяного пара пользуются таблицами теплотехнических 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

$$r = h'' - h', \text{ кДж/кг.}$$

Теплота парообразования – количество тепла, которое необходимо подвести к 1 кг кипящей жидкости, чтобы преобразовать ее в сухой насыщенный пар. Эта же теплота выделяется при конденсации 1 кг сухого насыщенного пара.



В таблице III содержатся параметры недогретой до температуры кипения воды и перегретого пара.

Внутренняя энергия рассчитывается по формуле

$$u = h - pv . \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} h &= h''x + h'(1 - x) , \\ v &= v''x + v'(1 - x) , \\ s &= s''x + s'(1 - x) , \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x = M_{\Pi} / M_{МП}$  – степень сухости пара, показывает отношение массы сухого насыщенного пара к массе общей парожидкостной смеси.

При  $x = 0$ ,  $M_{\Pi} = 0$ ,  $M_{МП} = M_{Ж}$  – состояние кипящей жидкости.

При  $x = 1$ ,  $M_{\Pi} = M_{МП}$ ,  $M_{Ж} = 0$  – состояние сухого насыщенного пара.

При  $0 < x < 1$  – состояние мокрого пара.



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 конечной точки.
5. Рассчитывается теплота и работа процесса.
6. Дается иллюстрация процесса в  $pv$ -,  $Ts$ -,  $hs$ -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:

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

Для кипящей воды:

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

Для сухого насыщенного пара:

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

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



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.  $h = f(p, T)$ ,

$$\Delta u \neq 0, \quad \Delta h \neq 0,$$

т.к.  $u = f(v, T)$ ;

- изменение параметров рассчитывается через параметры начальной и конечной точек, а не через теплоемкости

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



Рассмотрим пример расчета изобарного процесса для воды и водяного пара.

Дано:  $p = 490,5$  кПа,  $x_1 = 0$ ,  $t_2 = 180$  °С.

Определить:  $q$ ,  $w$ ,  $l$ .



## Задача №1

Определить массу  $10 \text{ м}^3$  влажного водяного пара при  $P = 30$  бар и  $x = 0,5$  и его энтальпию.

## Задача №2

Состояние водяного пара задано параметрами  $t = 180 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,1939 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Определить давление, энтропию и энтальпию пара. Изобразить состояние пара в  $P$ – $V$  и  $T$ – $S$  координатах.



### Задача №3

Смесь воды и пара заключена в объеме  $V = 30$  л. Известна температура пара  $t = 180$  °С и масса воды  $m = 0,08$  кг. Определить паросодержание  $x$ .

### Задача №4

Определить, какой объем занимает 150 кг влажного водяного пара при давлении  $P = 200$  бар и степени сухости  $x = 0,8$ . На сколько больше объем 150 кг сухого насыщенного пара того же давления?



## Задача №5

Энтальпия водяного пара при давлении  $P = 100$  бар составляет 2500 кДж/кг. Определить состояние пара и изобразить в  $P-V$  и  $T-S$  координатах.

## Задача № 6.

Состояние водяного пара задано следующими параметрами: давление  $P = 8,5$  МН/м<sup>2</sup> и плотность  $\rho = 0,120$  г/см<sup>3</sup>. Определить температуру  $t$  °С, внутреннюю энергию  $U$ , энтальпию  $h$ , энтропию  $S$ , для 1 кг пара и изобразить в  $P-V$  и  $T-S$  координатах.



## Задача №7

В сосуде объемом  $V = 0,035 \text{ м}^3$  содержится  $0,1 \text{ кг}$  водяного пара при давлении  $P = 0,6 \text{ МН/м}^2$ . Определить величину внутренней энергии пара.

## Задача №8

Определить объем влажного пара в резервуаре, если степень сухости пара  $x = 0,65$ , его масса  $m = 160 \text{ кг}$ , а температура  $t = 280 \text{ °C}$ .



## Задача №9

К 1 кг водяного пара при  $P = 10$  бар и  $x = 0,5$  при постоянном давлении подводятся 1600 кДж/кг тепла. Определить конечное состояние, работу, произведенную паром, и изменение внутренней энергии. Изобразить процесс в  $P-V$  и  $T-S$  координатах.

## Задача № 10

К 1 кг пара при давлении 8 бар и степени влажности 70% подводится при постоянном давлении 820 кДж/кг тепла. Определить степень сухости, объем и энтальпию пара в конечном состоянии, изобразить процесс в  $P-V$ ,  $h-S$  и  $T-S$  координатах.





## Задача №11

2 кг пара, занимающего при  $P = 8$  бар объем  $V_1 = 0,15$  м<sup>3</sup>, изотермически расширяются до  $V_2 = 0,35$  м<sup>3</sup>. Определить работу расширения, количество подведенного тепла, степень сухости пара и изобразить процесс в  $P$ – $V$ ,  $h$ – $S$  и  $T$ – $S$  координатах.

## Задача №12

1 кг пара при давлении 6 бар и температуре  $t = 200$  °С сжимается изотермически до конечного объема  $v_2 = 0,11$  м<sup>3</sup>/кг. Определить конечные параметры и количество тепла, участвующего в процессе. Изобразить процесс в  $P$ – $V$ ,  $h$ – $S$  и  $T$ – $S$  координатах.