



**Физико-технический
институт**

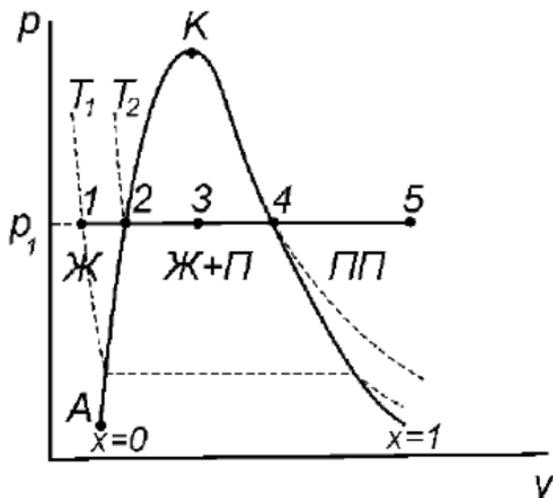
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



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, $v_A = 0.001$ м³/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, $v_K = 0.003147$ м³/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 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	$w = 0$	$l = v(p_1 - p_2)$	$q = u_2 - u_1$
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 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/м² и плотность $\rho = 0,120$ г/см³. 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 $V_1 = 0,15$ м³, изотермически расширяются до $V_2 = 0,35$ м³. 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 $v_2 = 0,11$ м³/кг. Определить конечные параметры и количество тепла, участвующего в процессе. Изобразить процесс в P – V , h – S и T – S координатах.