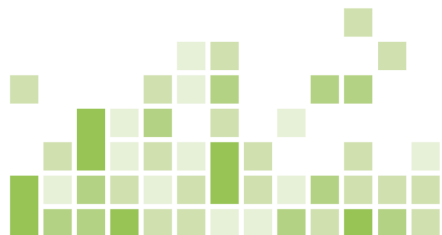




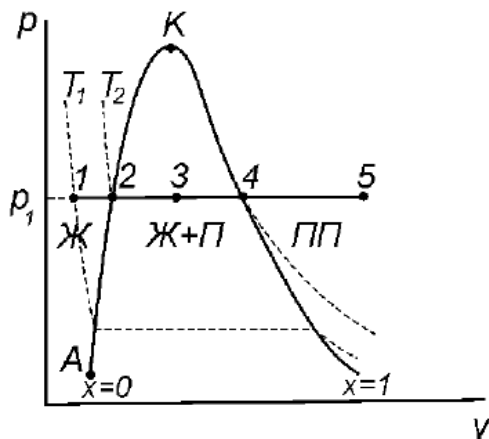
**Физико-технический  
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



## Лекция 6. Водяной пар и паровые процессы

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

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

При  $x = 1$ ,  $M_{\text{П}} = M_{\text{МП}}$ ,  $M_{\text{Ж}} = 0$  – 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

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



Дано:  $p = 490.5$  кПа,  $x_1 = 0$ ,  $t_2 = 180$  °С.

Определить:  $q$ ,  $w$ ,  $l$ .

Расчет процесса с помощью таблиц [5].

1. В начальном состоянии рабочее тело – кипящая вода, т.к.  $x_1 = 0$ . Из табл. II (состояния насыщения по давлениям) термодинамических свойств воды и водяного пара при  $p = 490.5$  кПа определяются параметры:

$$h_1 = h' = 636.8 \text{ кДж/кг}, \quad v_1 = v' = 0.001092 \text{ м}^3/\text{кг}.$$



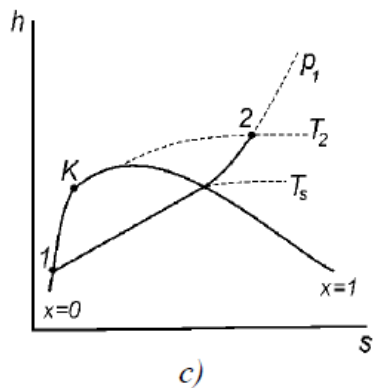
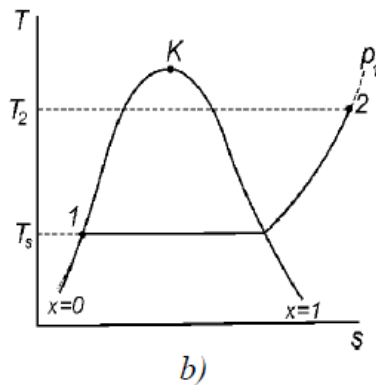
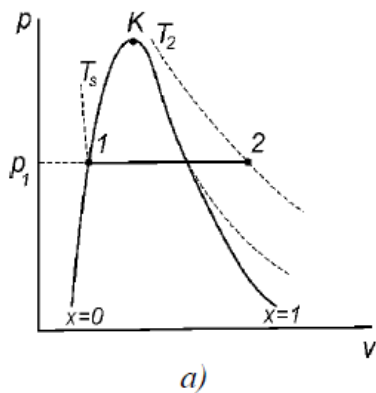
2. В конечном состоянии известны давление  $p$  и температура  $t_2$ . Сравнивается  $t_2$  с температурой насыщения  $t_s = 151.11$  °С при давлении 490.5 кПа, поскольку  $t > t_s$ , то конечное состояние – перегретый пар. Из табл. III (вода и перегретый пар) при  $p = 490.5$  кПа и  $t_2 = 180$  °С определяются:  $h_2 = 2812.4$  кДж/кг,  $v_2 = 0.4129$  м<sup>3</sup>/кг.

3. Рассчитывается теплота и работа изобарного процесса:

$$q = h_2 - h_1 = 2175.6 \text{ кДж/кг,}$$

$$w = p(v_2 - v_1) = 201.9 \text{ кДж/кг, } l = 0.$$

4. Изображается изобарный процесс по исходным данным в координатах  $p, v$ ,  $T, s$  и  $h, s$  (рис. 4.2).





Дано:  $p_1 = 1962$  кПа,  $v = 0.12$  м<sup>3</sup>/кг,  $p_2 = 294$  кПа

Определить:  $q$ ,  $w$ ,  $l$ .

Расчет процесса с помощью таблиц.

1. При  $p_1 = 1962$  кПа из табл. II (состояния насыщения по давлениям) находятся:  $v' = 0.001175$  м<sup>3</sup>/кг и  $v'' = 0.1015$  м<sup>3</sup>/кг.

Поскольку  $v > v''$ , то начальное состояние – перегретый пар.

Из табл. III (вода и перегретый пар) при  $p_1 = 1962$  кПа и  $v = 0.12$  м<sup>3</sup>/кг определяются параметры:  $t_1 = 270$  °С (543 К),

$h_1 = 2950.2$  кДж/кг,  $s_1 = 6.6418$  кДж/(кг·К). Внутренняя энергия

равна  $u_1 = h_1 - p_1 v = 2714.8$  кДж/кг.



2. Из табл. II при  $p_2 = 294$  кПа находятся  $v' = 0.001073$  м<sup>3</sup>/кг и  $v'' = 0.6169$  м<sup>3</sup>/кг. Поскольку  $v' < v < v''$ , то конечное состояние – мокрый пар. Рассчитывается степень сухости

$$x_2 = \frac{v - v'}{v'' - v'} = 0.193.$$

Энтальпия и внутренняя энергия в т. 2 при  $h' = 558.5$  кДж/кг,  $h'' = 2724.5$  кДж/кг равна



$$h_2 = h''x_2 + h'(1 - x_2) = 976.5 \text{ кДж/кг},$$

$$u_2 = h_2 - p_2v = 941.2 \text{ кДж/кг}.$$

3. Рассчитывается теплота и работа изохорного процесса:

$$q = u_2 - u_1 = -1773.6 \text{ кДж/кг},$$

$$l = v(p_2 - p_1) = 200 \text{ кДж/кг}, \quad w = 0.$$

4. Изображается изохорный процесс по исходным данным в координатах  $p, v$ ,  $T, s$  и  $h, s$  (рис. 4.3).

