

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3.

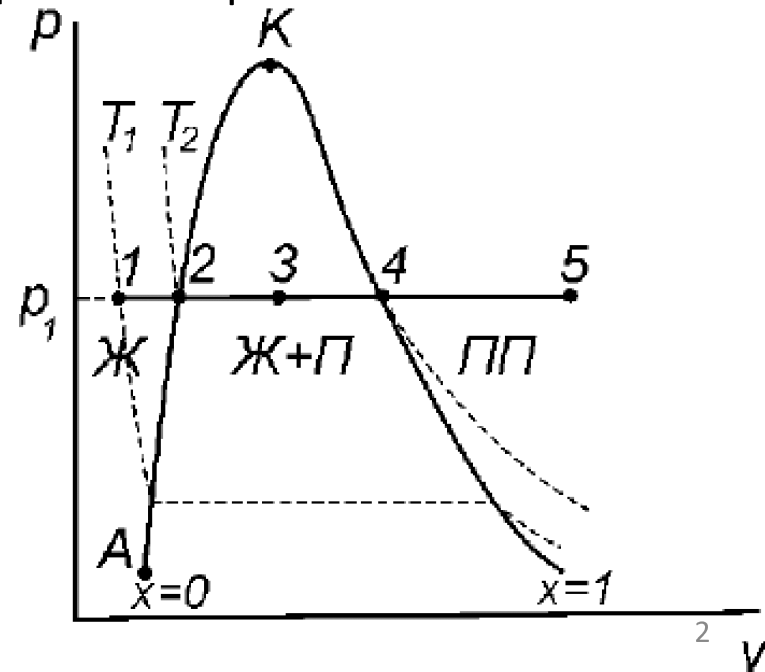
Задание для студентов

1. Прочитать теоретический материал по теме «Водяной пар» (см. глава IX из «Сборника задач по технической термодинамике» О.М. Рабинович).
2. Ответить письменно на контрольные вопросы.
3. Разобрать примеры задач с решением.
4. Решить самостоятельно задачи соответствующие своему варианту.

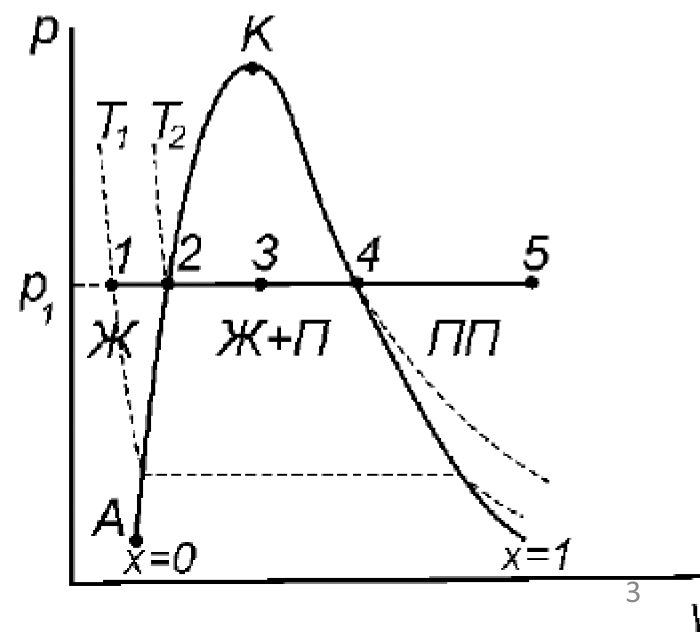
Водяной пар и паровые процессы

Контрольные вопросы:

- Чем отличается испарение от кипения?
- Увеличится или уменьшится удельный объем сухого насыщенного пара при повышении его давления?
- Что такое теплота парообразования?
- Что такое степень сухости?
- Как определить параметры кипящей воды?
- Как определить параметры сухого насыщенного пара?
- Как определить теплоту перегрева пара?
- т. А – тройная точка, в которой одновременно существуют твердая, жидкая и паровая фазы (для воды $p_A = 610.8 \text{ Па}$, $T_A = 273.16 \text{ К}$, $v_A = 0.001 \text{ м}^3/\text{кг}$); т. К – критическая точка, в которой одновременно существуют жидкая и паровая фазы (для воды $p_K = 221.15 \text{ бар}$, $T_K = 647.27 \text{ К}$, $v_K = 0.003147 \text{ м}^3/\text{кг}$); 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, i, u, s .
- **2. Кипящая вода (кривая $x=0$).** При этом параметры состояния обозначаются как p, v', Ts, i', u', s'' .
- **3. Мокрый пар (область Ж + П).** При этом параметры состояния обозначаются как p, v, Ts, i, u, s .
- **4. Сухой насыщенный пар (кривая $x = 1$).** При этом параметры состояния обозначаются как $p, v'', Ts, i'', u'', s''$.
- **5. Перегретый пар (область ПП).** При этом параметры состояния обозначаются как p, v, T, i, u, s .



- В практических расчетах для определения параметров воды и водяного пара пользуются таблицами теплофизических 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 содержатся параметры насыщения (кипящей воды и сухого пара), а также значения теплоты парообразования

$$r = i'' - i', \text{кДж/кг.}$$

- **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 содержатся параметры недогретой до температуры кипения воды и перегретого пара.
- Внутренняя энергия рассчитывается по формуле

$$u = i - pv . (1)$$

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

$$i = i''x + h'(1-x) ,$$

$$v = v''x + v'(1-x) ,$$

$$s = s''x + s'(1-x) ,$$

- 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:

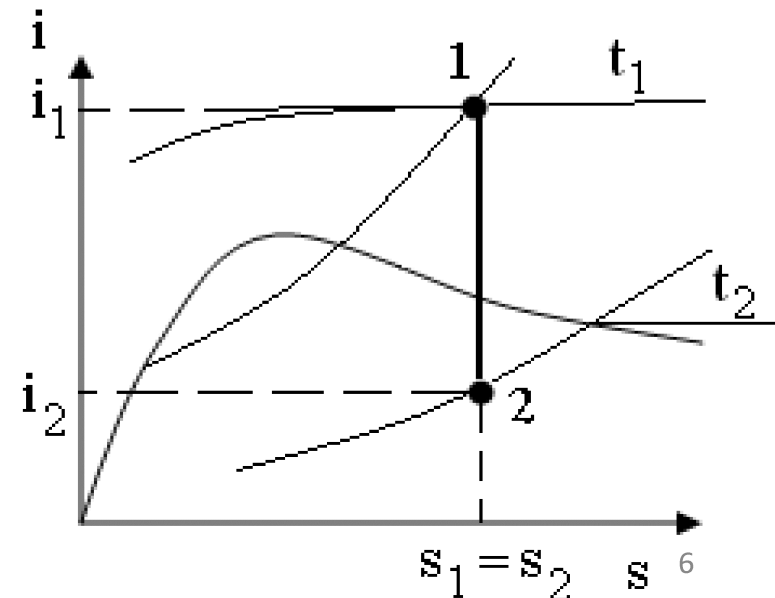
- 1. Определяется состояние (одно из пяти) воды или водяного пара в начальной точке путем сравнения исходных данных с табличными.
- 2. Определяются параметры в начальной точке.
- 3. Определяется состояние в конечной точке.
- 4. Определяются параметры конечной точки.
- 5. Рассчитывается теплота и работа процесса.
- 6. Дается иллюстрация процесса в pv -, Ts -, is -диаграммах.

ВОДЯНОЙ ПАР

Примеры задач с решениями.

- **Задача 1.** Состояние водяного пара задано параметрами: $P_1 = 2$ МПа, $t_1 = 550$ °С. Определить, пользуясь $i - s$ диаграммой начальное состояние пара и его параметры (i , s , v , P , t), а также параметры и состояние пара, если происходит его адиабатное расширение до давления $P_2 = 0,02$ МПа. Определить также работу, совершенную паром при адиабатном расширении.

- **Решение.** Пользуясь $i - s$ диаграммой определим начальное состояние пара. На пересечении изобары
- $P_1 = 2$ МПа и изотермы $t_1 = 550$ °С
- обозначим точку 1, определяющую
- начальное состояние и параметры
- водяного пара. В точке 1 пар перегретый.
- 550 °С, $i_1 = 3600$ кДж/кг, $S_1 = 6,7$ кДж/кг·К,
- $v = 0,19$ м³/кг.



- Для определения параметров пара после адиабатного расширения нанесем на диаграмму адиабату 1-2 ($s_1 = s_2 = 6,7$ кДж/кг·К) и обозначим точку 2, определяющую состояние и параметры пара. В точке 2 пар влажный. Параметры пара: $P_2 = 0,02$ МПа, $i_2 = 2500$ кДж/кг, $s_1 = s_2 = 6,7$ кДж/кг·К, $v_2 = 7,5$ м³/кг. Температуру пара можно определить из таблицы водяного пара или по диаграмме на пересечении изобары с верхней пограничной кривой. Таким образом, $t_2 = 60^\circ\text{C}$. Степень сухости $x = 0,95$.
- Работу, совершенную в адиабатном процессе определим по формуле:

$$l_{1-2} = (i_1 - P_1 v_1) - (i_2 - P_2 v_2),$$
- тогда $l_{1-2} = (3600 - 2000 \cdot 0,19) - (2500 - 20 \cdot 7,5) = 870$ кДж/кг.
- **Ответ:** Точка 1 – пар перегретый, $P_1 = 2$ МПа, $t_1 = 550^\circ\text{C}$, $i_1 = 3600$ кДж/кг, $s_1 = 6,7$ кДж/кг·К, $v = 0,19$ м³/кг; точка 2 – пар влажный, $P_2 = 0,02$ МПа, $t_2 = 60^\circ\text{C}$, $i_1 = 3600$ кДж/кг, $s_2 = s_1 = 6,7$ кДж/кг·К, $v_2 = 7,5$ м³/кг. $l_{1-2} = 870$ кДж/кг.

Задача 2 .

- Известны параметры рабочего тела p_1 и v_1 . С помощью таблиц термодинамических свойств установить его состояние (перегретый, сухой насыщенный или влажный пар). Определить температуру, энтальпию, энтропию, внутреннюю энергию и степень сухости пара (если пар влажный). Определить, какое количество теплоты необходимо подвести к пару в состоянии 1, чтобы его температуру повысить до $t_2 = t_1 + 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении $p_1 = \text{const}$. Изобразить процесс в координатах p - v и T - s (без масштаба). Дано: рабочее тело – водяной пар; $p_1 = 0,500\text{ МПа}$; $v_1 = 0,200\text{ м}^3/\text{кг}$.
- **Решение.** По таблице термодинамических свойств водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям) определяем удельные объемы сухого насыщенного пара и насыщенной жидкости, соответствующие давлению $p_1 = 0,500\text{ МПа}$. Имеем: $t_n = 151,84\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v' = 0,0010927\text{ м}^3/\text{кг}$; $v'' = 0,3747\text{ м}^3/\text{кг}$. Удельный объем пара $v = 0,200\text{ м}^3/\text{кг}$ находится между v' и v'' , т. е. рабочее вещество находится в состоянии влажного насыщенного пара.

- Для влажного пара $v_x = v' + x(v'' - v')$ и степень сухости будет равна

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{0,200 - 0,0010927}{0,3747 - 0,0010927} = 0,533.$$

- Температура влажного пара $t_1 = t_n = 151,84^\circ\text{C}$. Рассчитываем параметры i_x , s_x , u_x по формулам, взятым из таблицы:

$$h_x = 640,1 + 2109 \cdot 0,533 = 640,1 + 1125,0 = 1765 \text{ кДж/кг};$$

$$s_x = 1,860 + \frac{0,533 \cdot 2109}{151,84 + 273,15} = 1,860 + 2,645 = 4,505 \text{ кДж/(кг·K)};$$

$$\begin{aligned} u_x &= h_x - p_1 v_1 = 1765 \cdot 10^3 - 0,50 \cdot 10^6 \cdot 0,20 = 1,765 \cdot 10^6 - 0,1 \cdot 10^6 = \\ &= 1,665 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} = 1665 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

- Значения параметров r , i' , s' водяного пара взяты из этой же термодинамической таблицы: $s' = 1,860 \text{ кДж/(кг·K)}$, $i' = 640,1 \text{ кДж/кг}$; $r = i'' - i' = 2109 \text{ кДж/кг}$.
- В изобарном процессе подвода теплоты (рисунок) температура пара достигла $t_2 = 151,84 + 20,00 = 171,84^\circ\text{C}$.

- Давление пара постоянно, а температура превысила температуру насыщения t_n . Пар стал перегретым. Энтальпию перегретого пара можно определить по таблицам термодинамических свойств воды и перегретого водяного пара. Определив $i_2 = 2791,5$ кДж/кг, рассчитываем количество теплоты $q = i_2 - i_1 = 1026,5$ кДж/кг.

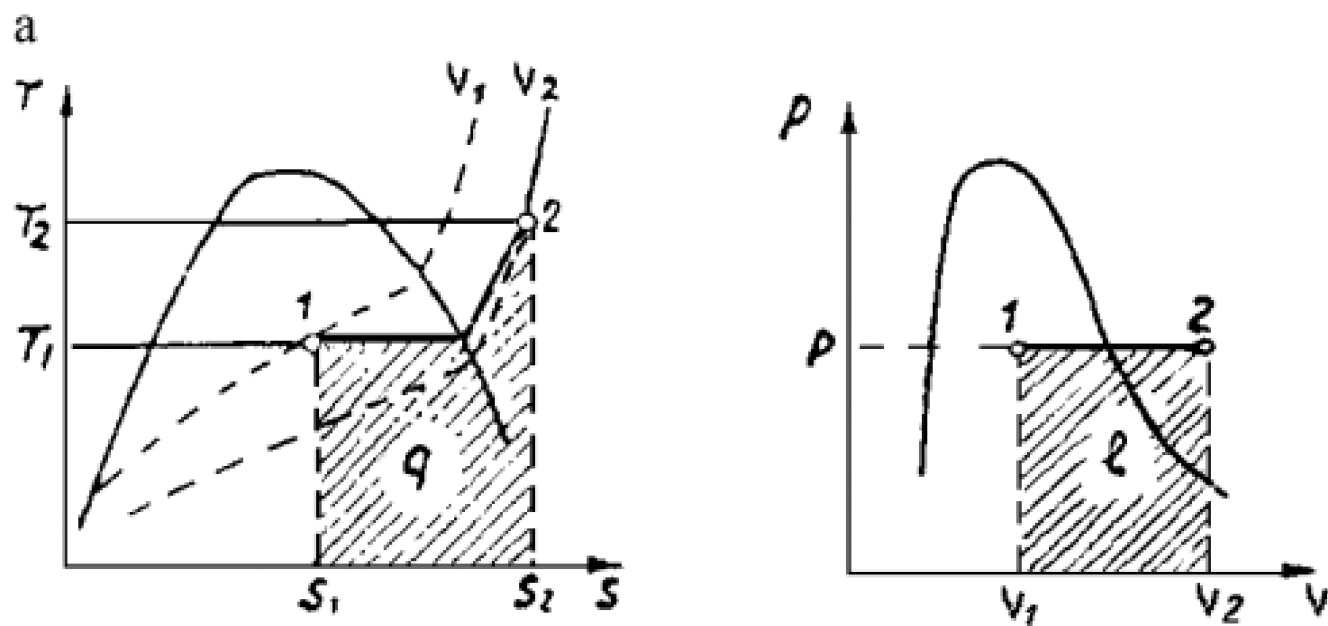


Рисунок. Изображение изобарного процесса подвода теплоты: а – в диаграмме $T-s$; б – в диаграмме $p-v$

Задачи для самостоятельного решения

№ варианта	№ задач для самостоятельного решения из главы IX
1	311, 323, 337, 346, 356
2	312, 324, 338, 347, 358
3	313, 325, 339, 348, 359
4	314, 326, 340, 349, 360
5	316, 332, 341, 352, 363
6	318, 333, 342, 353, 365
7	321, 334, 343, 354, 367
8	322, 335, 344, 355, 368

Свободные задачи: 370, 371, 373, 376, 377, 380, 381, 383, 384, 385, 386, 387, 388