

ВОДЯНОЙ ПАР И ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

- Основные понятия и определения
- p - v , T - s h - s (i - s) диаграммы водяного пара
- Влажных воздух

Литература

- Joseph M Powers. LECTURE NOTES ON THERMODYNAMICS. Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana 46556-5637, USA, updated 01 July 2014
- *Thermodynamics, heat transfer and fluid flow (Volume 1-3). U.S. Department of Energy FSC-6910- 1992.*
- 2. Yunus A. Çengel. *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer, 2/e. University of Nevada, Reno ISBN: 0073380172, 2008*
- Теплотехника: Учеб.для вузов/В.Н.Луканин. М.Г.Шатров, Г.М.Камфер и др.; Под ред.В.Н.Луканина –2–е изд., перераб. – М.:Высшая школа, 2000. – 671 с.:ил.

Фазовые переходы (водяной пар)

Примеры фазовых переходов – это переход воды в пар при кипении и пара в воду при конденсации.

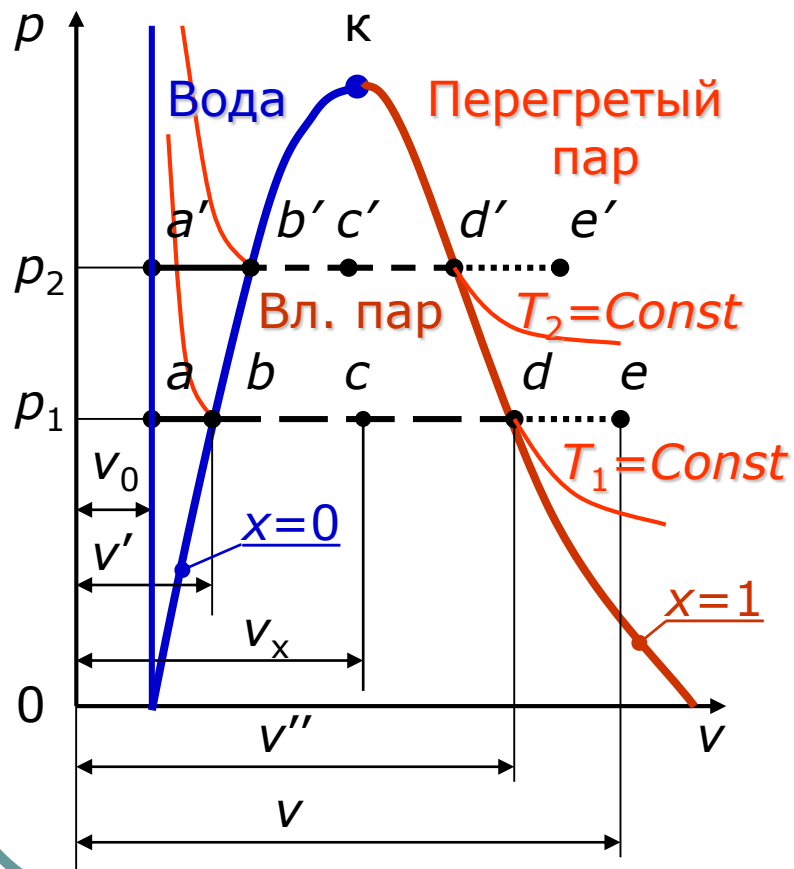
Водяной пар является рабочим телом паротурбинных установок (ПТУ).

Водяной пар – это реальный газ, состояние которого можно описать уравнением состояния Вукаловича-Новикова.

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \left(1 - \frac{C}{vT^{\frac{3+2m}{2}}}\right)$$

Для удобства, состояния пара были просчитаны в большом диапазоне параметров, а результаты представлены в виде таблиц термодинамических свойств воды и пара и в форме pv -, Ts -, hs -диаграмм.

p v -диаграмма водяного пара



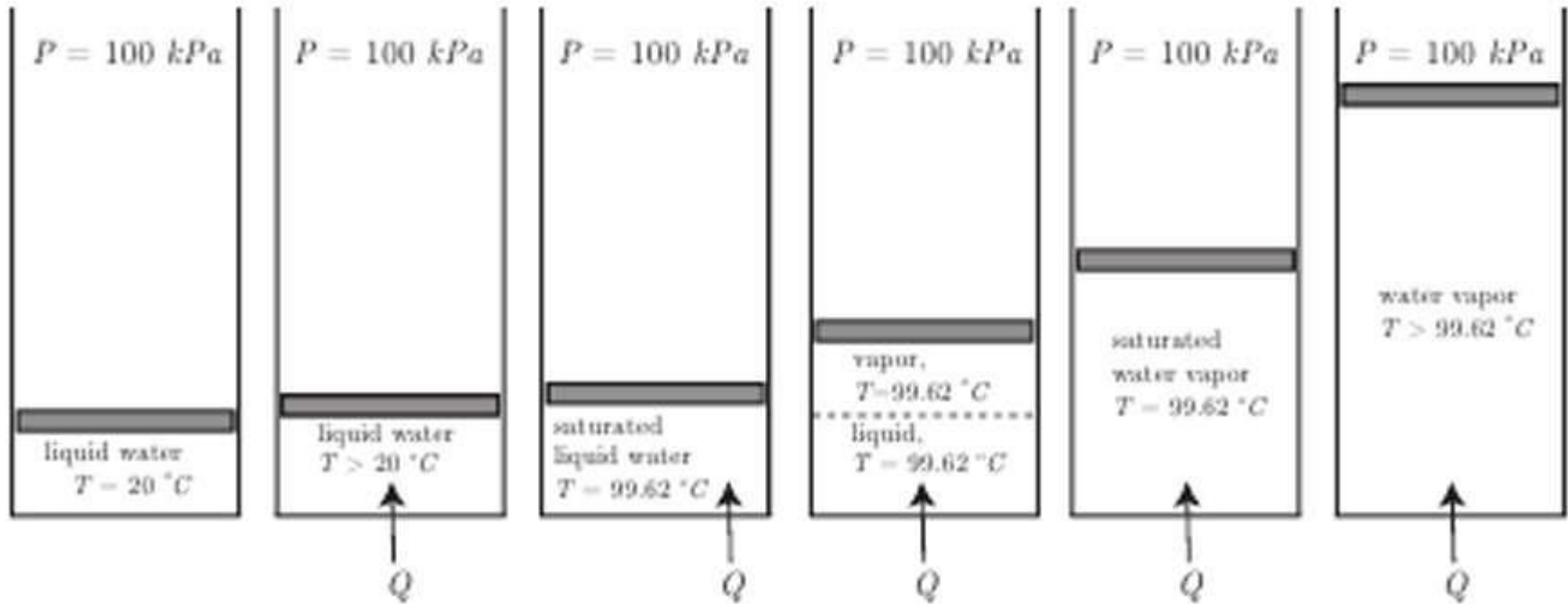
aa' – вода нулевой температуры;

$bb'k$ – нижняя (левая) пограничная кривая ($x=0$);

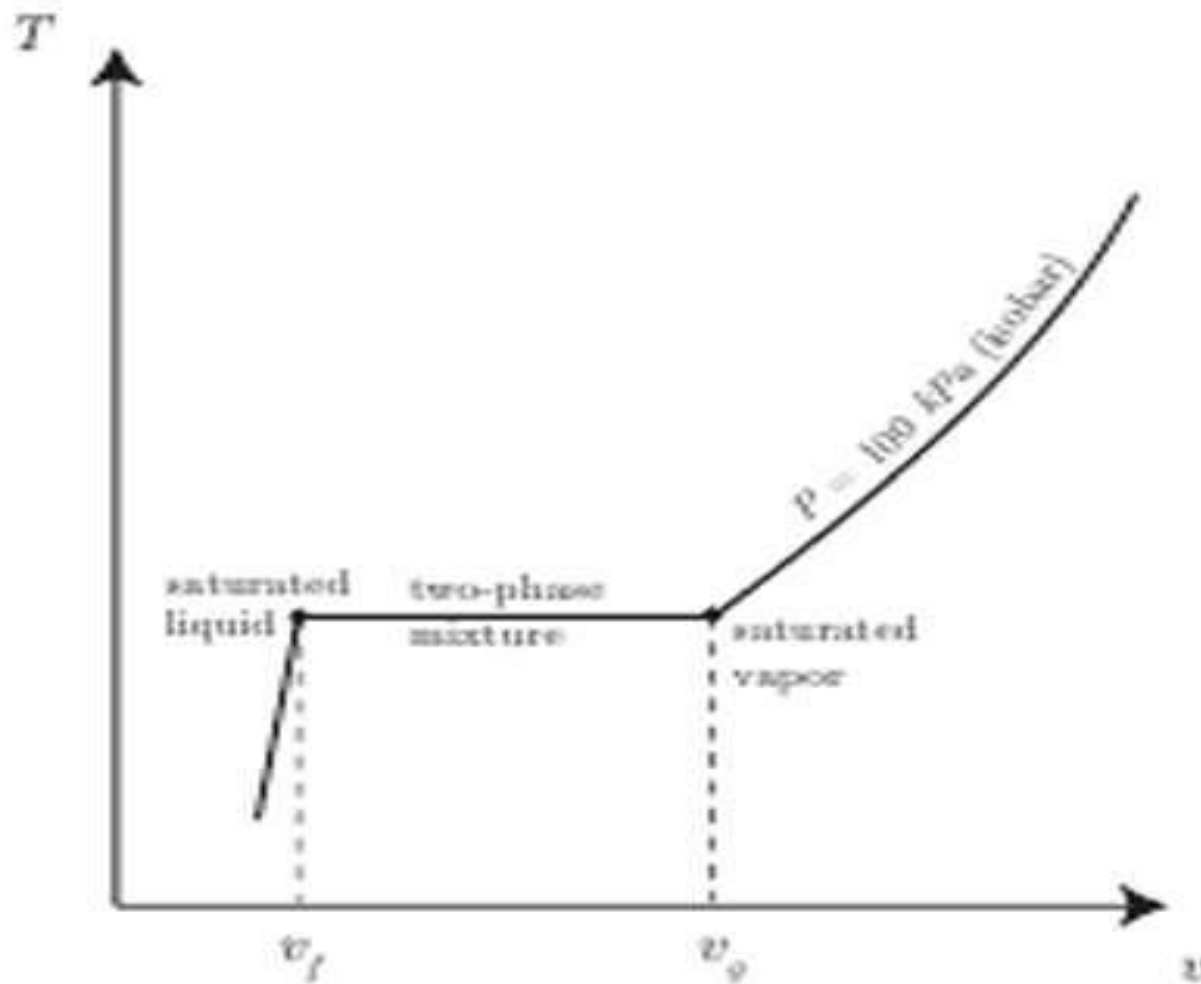
$dd'k$ – верхняя (правая) пограничная кривая ($x=1$);

k – критическая точка
(для воды: $p_{кр} \approx 22,1$ МПа;
 $t_{кр} \approx 374^\circ\text{C}$).

Эскиз эксперимента, в котором тепло добавляют изобарически к воде в закрытом устройстве поршень-цилиндр



Изобарное в T - v плоскости для нашего мысленного эксперимента, в котором тепло добавляют изобарически к воде в устройстве поршень-цилиндр.



К p - v -диаграмме

Слева от пограничной кривой – **вода**;

между пограничными кривыми – **влажный пар**;

правее верхней пограничной кривой – **перегретый пар**.

На верхней пограничной кривой – **сухой, насыщенный пар**.

Точка $a(v_0)$ – вода нулевой температуры;

процесс ab – изобарный нагрев воды от 0°C до температуры кипения (насыщения) t_n ;

Процессы и состояния воды и пара

На верхней пограничной кривой – **сухой, насыщенный пар**.

Точка a (v_0) – вода нулевой температуры;

процесс ab – изобарный нагрев воды от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры насыщения t_n (кипения);

точка b (v' ; $x=0$) – вода на линии насыщения (закипающая);

процесс bd – изобарно-изотермическое парообразование (кипение воды) при $t_n = \text{Const}$;

точка d (v'' ; $x=1$) – сухой, насыщенный пар;

точка c – влажный, насыщенный пар (x – степень сухости пара: массовая доля пара во влажном паре);

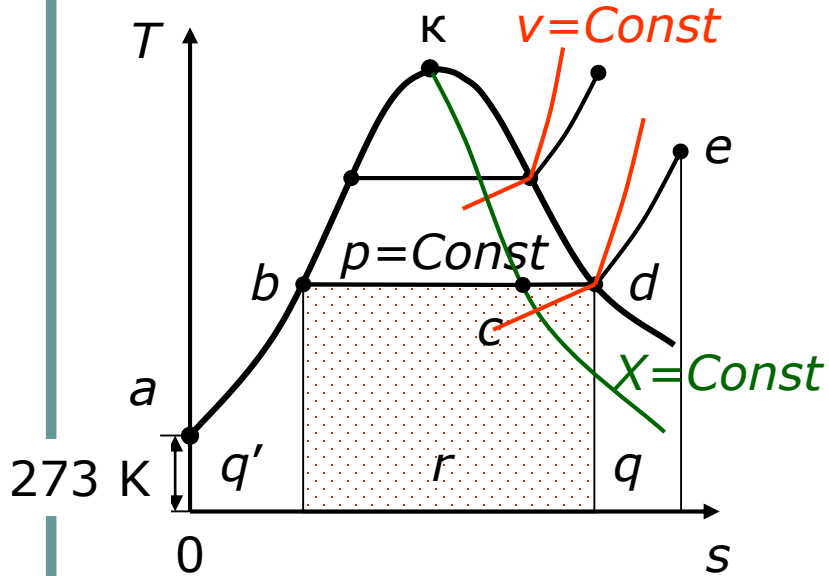
процесс de – изобарный перегрев пара;

точка e (v) – перегретый пар.

Начало отсчета внутренней энергии $u_0=0$; энтальпии $h_0=0$ и энтропии $s_0=0$ примем при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (273 K) – точка a .

Процесс $abcde$ при $p=\text{Const}$ тот же, что был описан в p - v -диаграмме.

Ts -диаграмма водяного пара



В тепловой Ts -диаграмме
площади под процессами:

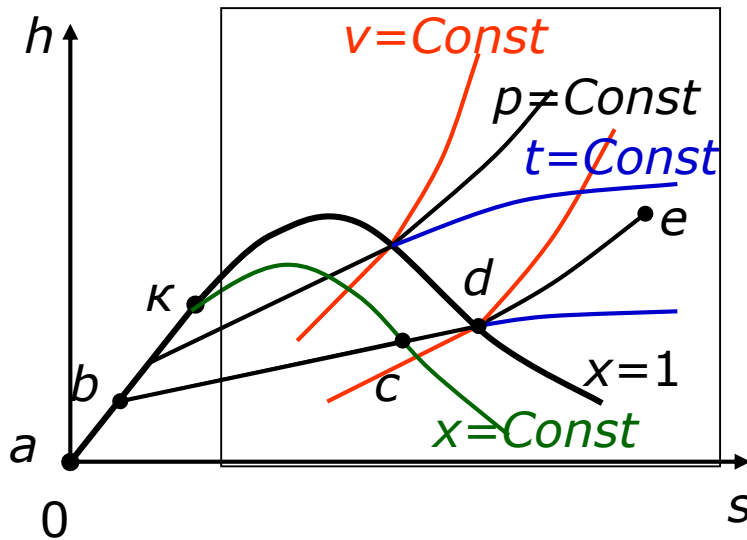
ab – теплота нагрева воды
от $0\text{ }^\circ\text{C}$ до температуры
насыщения $q' = h' - h_0 = h'$;

bd – скрытая теплота
парообразования $r = h'' - h'$;

de – теплота перегрева пара $q = h - h''$;

тогда $q' + r + q = h$ – энтальпия перегретого пара в точке e .

hs -диаграмма водяного пара



При температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $h_0=0$,
 $s_0=0$.

Поэтому точка a для воды
нулевой температуры совпадает
с началом координат.

Процесс $abcde$ при $p=Const$ тот
же, что на pv - и Ts -диаграммах.

В области влажного пара изотерма совпадает с изобарой bd .

Расчеты процессов водяного пара

В практических расчетах обычно используются области перегретого пара и влажного с высокими степенями сухости.

Поэтому изображается в большем масштабе выделенная рамкой часть диаграммы.

Более точные расчеты процессов водяного пара выполняется по таблицам.

Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара

Бывают таблицы термодинамических свойств воды на линии насыщения и сухого, насыщенного пара

$$(t_n, v', v'', h', h'', r, s', s'') = f(p_n)$$

$$(p_n, v', v'', h', h'', r, s', s'') = f(t_n)$$

где p_n, t_n – давление и температура насыщения;
 v, h, s – удельный объем, энтальпия и энтропия;

индексы $', ''$ относятся к воде на линии насыщения и сухому, насыщенному пару.

Таблицы термодинамических свойств перегретого пара
 $(v, h, s) = f(p, t).$

Внутренняя энергия

В таблицах и диаграммах нет внутренней энергии воды и пара.

Она находится через энтальпию, Дж/кг:

$$u' = h' - pv';$$

$$u_x = h_x - pv_x;$$

$$u'' = h'' - pv'';$$

$$u = h - pv,$$

где давление подставляется в Па.

Влажный пар

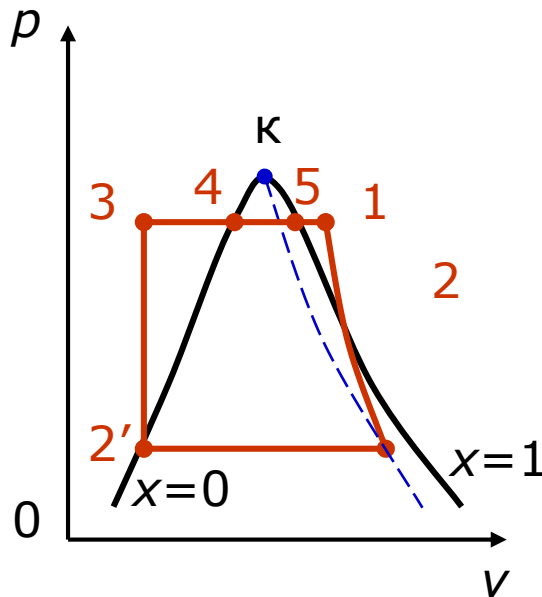
Параметры состояния влажного пара находятся по смесевым формулам:

$$v_x = v'(1-x) + v''x;$$

$$h_x = h'(1-x) + h''x;$$

$$s_x = s'(1-x) + s''x.$$

Цикл Ренкина паротурбинной установки (ПТУ) в p - v -диаграмме



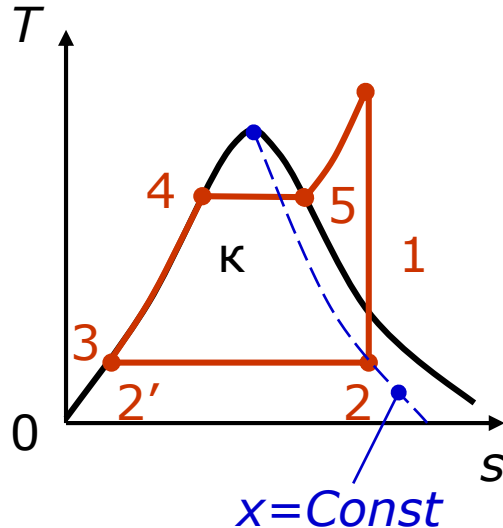
1-2 адиабатное расширение пара в турбине;

2-2' изобарно-изотермическая конденсация пара в конденсаторе;

2'-3 адиабатное сжатие воды в питательном насосе;

3-4 изобарный нагрев воды в водяном экономайзере;

Цикл Ренкина паротурбинной установки в Ts-диаграмме



4-5 изобарно-изотермическое
парообразование;

5-1 изобарный перегрев пара
в пароперегревателе.

Термический КПД цикла Ренкина:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(h_1 - h_3) - (h_2 - h_{2'})}{h_1 - h_3}. \quad (1)$$

Приближенный КПД цикла Ренкина

Если в выражении (1) перегруппировать члены, то:

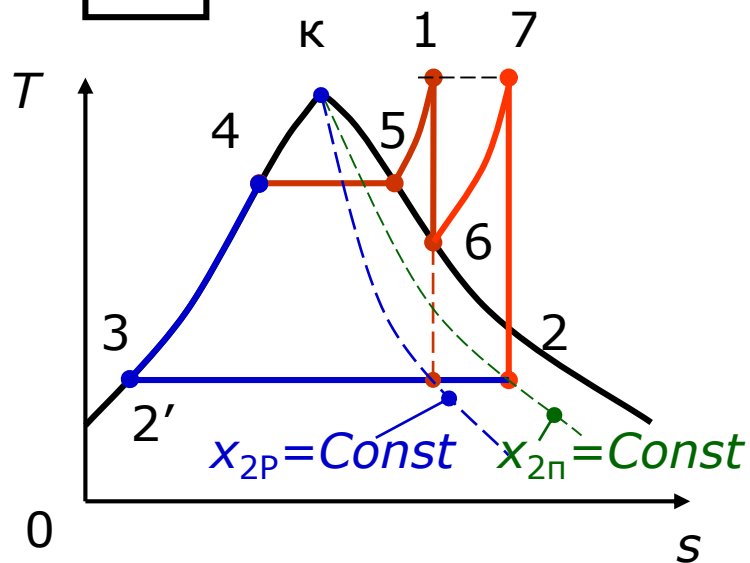
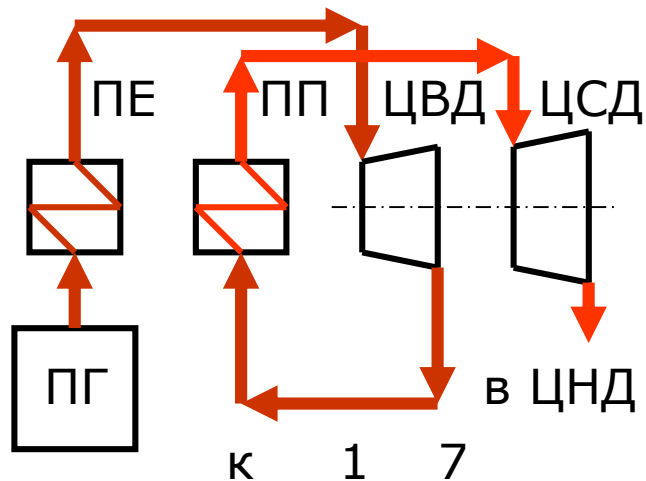
$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_{2'})}{h_1 - h_3} = \frac{\ell_m - \ell_n}{q_1}.$$

Здесь l_T – положительная работа пара в турбине; l_n – затрата работы на сжатие воды в насосе; q_1 – теплота, подведенная к рабочему телу в парогенераторе.

В современных ПТУ $l_T \approx 1200-1600$ кДж/кг, $l_n \approx 20-40$ кДж/кг и для приближенных расчетов работой сжатия воды можно пренебречь, то есть считать, что $h_{2'} \approx h_3$, тогда:

$$\eta_t \approx \frac{\ell_m}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}}. \quad (2)$$

Цикл ПТУ с промперегревом



После расширения пара в ЦВД до линии $x=1$ он поступает в промежуточный пароперегреватель ПП, перегревается снова до температуры свежего пара.

На цикле 6-7 промперегрев; 1-6 адиабатное расширение пара в ЦВД, 7-2 – то же в ЦСД и ЦНД.

Благодаря промперегреву $x_{2п} > x_{2p}$, поэтому $\eta_{тп} > \eta_{tp}$.

Контрольные вопросы

1. Что называется кипением, парообразованием и испарением?
2. Какие процессы называются сублимацией и десублимацией?
3. Какой пар называется влажным насыщенным, сухим насыщенным перегретым?
4. Что такое степень сухости и степень влажности?
5. Изобразить p, v -диаграмму водяного пара.
6. Какие точки располагаются на пограничных кривых жидкости и пара?
7. Что относится к параметрам критической точки?
8. T, s -диаграмма водяного пара.
9. i, s -диаграмма водяного пара.