

В этих таблицах параметры кипящей жидкости – удельный объем, энтальпия, энтропия – обозначены, соответственно, v', h', s' , а параметры сухого насыщенного пара – v'', h'', s'' . Параметры влажного насыщенного пара обычно обозначают v_x, h_x и s_x и определяют по следующим формулам как для смеси кипящей воды и сухого пара:

$$v_x = v''x + v'(1-x), \text{ м}^3/\text{кг} \quad (1)$$

$$h_x = h''x + h'(1-x), \text{ кДж/кг} \quad (2)$$

$$s_x = s''x + s'(1-x), \text{ кДж/кг}\cdot\text{К} \quad (3)$$

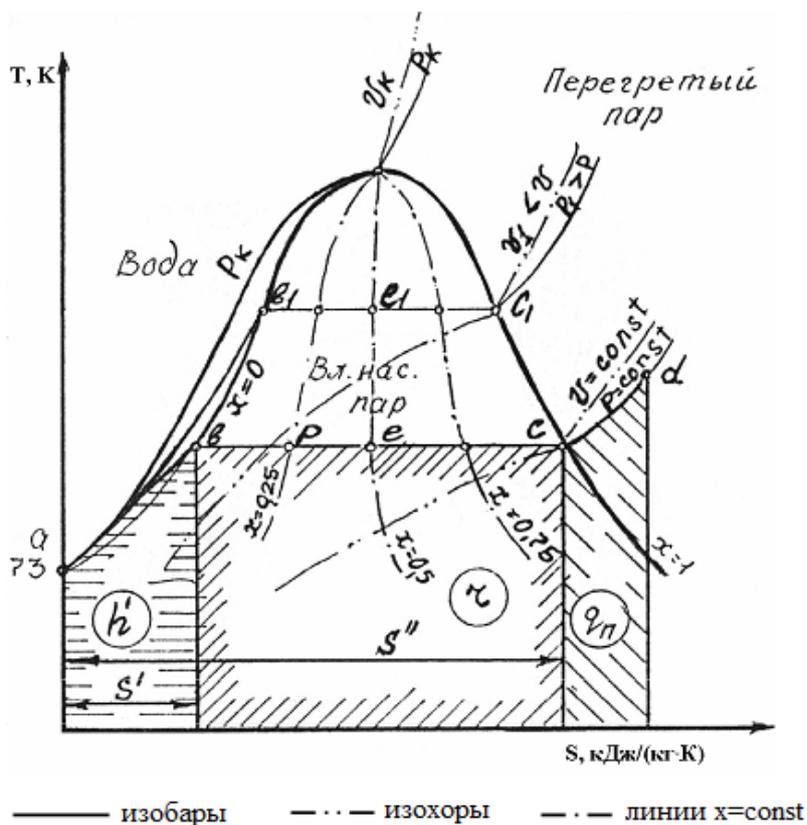


Рис. 2. T-s-диаграмма водяного пара

Параметры перегретого пара обозначают без каких-либо штрихов и индексов, т. е. v, h и s .

Поскольку водяной пар получают в изобарном процессе, то количество теплоты, подводимой к рабочему телу, можно подсчитать как разность энтальпий в конце и начале процесса. Это очень удобно, т.к. позволяет обойтись без теплоемкости, которая в данном случае (реальный газ) зависит не только от температуры, но и от давления.

Под теплотой парообразования r понимают количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кипящей жидкости при постоянном давлении (следовательно, и при постоянной температуре) в сухой насыщенный пар.

Теплота парообразования, учитывая сказанное, равна:

$$r = h'' - h' \quad (4)$$

Внутренняя энергия пара находится через его энтальпию из выражения:

$$u = h - p \cdot v \quad (5)$$

На диаграммах $p-v, T-s$ и $h-s$ водяного пара показывают нижнюю пограничную кривую ($x = 0$) или линию кипящей жидкости и верхнюю пограничную кривую ($x = 1$) или линию сухого насыщенного пара. Пограничные линии делят диаграммы на области капельной жидкости (воды), влажного насыщенного пара и перегретого пара.

Пограничные кривые соединяются в критической точке K , обозначающей критическое состояние воды, когда нет различия между кипящей жидкостью и сухим паром. Параметры критического состояния:

$$P_K = 221,5 \text{ бар}; \quad t_K = 374,12 \text{ }^\circ\text{C}; \quad v_K = 0,003147 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$s_K = 4,4237 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}; \quad h_K = 2095,2 \text{ кДж/кг}.$$

Существует также понятие тройной точки состояния воды, которая соответствует случаю, когда одновременно в равновесном состоянии находятся пар, жидкость и лед:

$$p_0 = 611 \text{ Па}; \quad T_0 = 273,16 \text{ К}; \quad v_0 = 0,001 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$s_0 = 0; \quad h_0 = 0.$$

4. Описание опытной установки и внутрикотловых процессов.

Опытная установка представляет собой простейшую стеклянную модель однобарабанного котла (Рис. 3). Левая подъемная труба 2 имеет электрообогрев 1, мощность которого регулируется посредством реостата. Водяной пар из барабана 3 котла отводится в пароводяной теплообменник 5 и в нем конденсируется. Конденсат стекает в подставленную емкость. Мощность электрического тока, подводимого к спирали, фиксируется ваттметром.

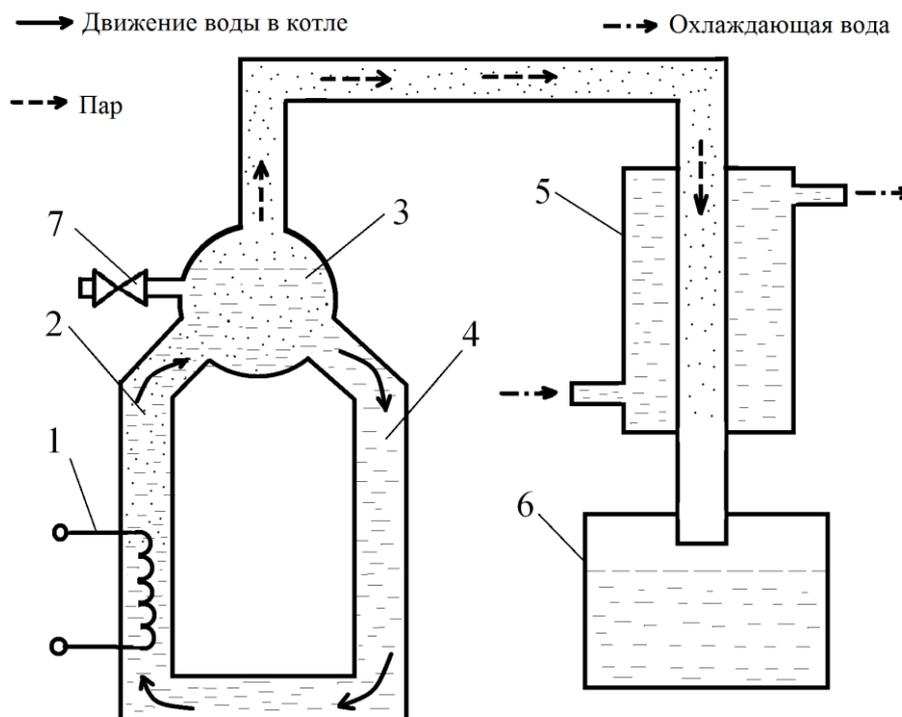


Рис. 3. Схема установки:

- 1 – электронагреватель; 2 – подъемная труба;
 3 – пароводяной барабан; 4 – опускная труба; 5 – конденсатор;
 6 – емкость для конденсата; 7 – вентиль подвода питательной воды

В действительных котлах обычно осуществляется естественная циркуляция – движение рабочей среды, по замкнутому контуру, состоящему из обогреваемых и необогреваемых труб и коллекторов. Это движение возникает вследствие разности плотностей пароводяной смеси в подъемной ветви контура и воды в опускной. При естественной циркуляции количество жидкости, проходящей через экранные трубы в единицу времени, многократно превышает количество образующегося в них пара, что обеспечивает интенсивное охлаждение стенок труб и поддержание их при температуре, близкой к температуре кипящей воды. Режим циркуляции характеризуется рядом величин. Это скорость циркуляции, подсчитываемая обычно как скорость воды на входе в подъемную трубу и кратность циркуляции K .

Кратностью циркуляции называют отношение количества воды и пара $m_{ВП}$, проходящих через любое сечение данного контура в единицу времени, к количеству выделившегося в контуре пара $m_{П}$ за то же время:

$$K = \frac{m_{ВП}}{m_{П}} \quad (6)$$

Обычно скорость циркуляции находится в пределах 0,5...1,5 м/с. В контурах, включающих

экраны, кратность циркуляции составляет от 4 до 20; в контурах, состоящих из барабанов, соединенных пучками кипятильных труб от 10 до 100.

5. Проведение работы

Студенты приступают к работе после ознакомления с устройством установки. Пуск установки производится в следующем порядке:

- 1) открытие вентиля на трубопроводе охлаждающей воды через конденсатор;
- 2) проверка уровня воды в барабане и включение нагревательной спирали;
- 3) при закипании воды в подъемной трубе с помощью реостата добиваются равномерного кипения воды, которое должно начинаться несколько ниже середины по высоте трубки.
- 4) дожидаются установившегося режима, о чем свидетельствует равномерное поступление капель конденсата из конденсатора через равные промежутки времени
- 5) сливают конденсат из измерительной емкости и, засекая время, начинают наблюдение.
- 6) в течение всего опыта с интервалом в 2 мин. записывают показания барометра.
- 7) по окончании опыта определяют массу конденсата $m_{\text{конд}}$ в измерительной емкости.

6. Обработка результатов

1) Определить кратность циркуляции пароводяного контура, т. е. отношение расхода воды $m_{\text{вод}}$, проходящей через контур, к его паропроизводительности $m_{\text{п}}$:

$$K = \frac{m_{\text{вод}}}{m_{\text{п}}} \quad (7)$$

где $m_{\text{вод}}$ – расход воды, кг/с;

$m_{\text{п}}$ – паропроизводительность, кг/с:

$$m_{\text{п}} = \frac{m_{\text{конд}}}{\tau} \quad (8)$$

где $m_{\text{конд}}$ – масса конденсата, кг;

τ – время замера, с.

2) Вычислить степень сухости пара:

$$X = \frac{1}{K} \quad (9)$$

3) Определить полный движущийся напор циркуляционного контура $P_{\text{дв}}$:

$$P_{\text{дв}} = 9,8(\rho' - \rho_X)(H - H_{\text{Г.З.}}) \text{ Н/м}^2 \quad (10)$$

где ρ' – плотность воды, принимают $\rho' = 1000 \text{ кг/м}^3$;

ρ_X – плотность пароводяной смеси, кг/м^3 .

$$\rho_X = \frac{1}{v_X} = \frac{1}{v_X'' + v'(1-X)} \text{ кг/м}^3 \quad (11)$$

где $H_{\text{Г.З.}}$ – высота, на которой начинается кипение воды в подъемной трубе, м;

H – высота верха подъемной трубы, м;

v' – удельный объем насыщенной воды, $\text{м}^3/\text{кг}$;

v'' – удельный объем насыщенного пара, $\text{м}^3/\text{кг}$.

4) По таблицам водяного пара определить температуру пара T в контуре, энтальпии кипящей жидкости h' и пара h'' , энтропии кипящей жидкости s' и пара s'' при данном атмосферном давлении.

5) Определяем теплоту испарения r по формуле 4.

7. Оформление отчёта

Отчет должен включать схему установки, данные измерений, расчеты и рисунки графиков процессов парообразования.

Таблица 1

Измеряемые и расчетные данные

Параметр	Обозначение	№ опыта		
		1	2	3
Масса конденсата, кг	$m_{\text{конд}}$			
Расход воды, кг/с	$m_{\text{вод}}$			
Паропроизводительность, кг/с	$m_{\text{п}}$			
Кратность циркуляции	K			
Время замера, с	τ			
Температура пара, К	T			
Полный движущийся напор циркуляционного контура, Н/м ²	$P_{\text{дв}}$			
Энтальпия кипящей жидкости, кДж/кг	h'			
Энтальпия пара, кДж/кг	h''			
Энтропия кипящей жидкости, кДж/кг·К	s'			
Энтропия пара, кДж/кг·К	s''			
Теплота испарения, кДж/кг	r			

8. Контрольные вопросы

- 1) Что такое влажный насыщенный, сухой насыщенный и перегретый пар.
- 2) Что такое кратность циркуляции пароводяного контура.
- 3) Проанализировать процессы парообразования на p - v -диаграмме водяного пара