

## 1.10 Пары. Водяной пар

В зависимости от состояния пар может быть сухим, влажным и перегретым. **Сухой пар**, находящийся в равновесии с жидкостью, - это насыщенный пар. **Влажный пар** - это механическая смесь сухого пара и кипящей жидкости. **Перегретый пар** является ненасыщенным паром. Для аналитического решения задач на пары используются таблицы водяного пара (Приложение Д) и приводимые ниже формулы.

**Сухой пар.** Основными параметрами состояния сухого пара являются:  $P$ , Па - абсолютное давление;  $v''$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем;  $t''$ , °С - температура насыщения.

Состояние сухого пара полностью характеризуется или давлением или температурой насыщения, а все остальные параметры и термодинамические величины для него могут быть найдены по паровым таблицам – приложение Д. В таблицах Д.1 и Д.2 для 1 кг сухого пара содержатся величины следующих данных:

- $P$ , МПа - абсолютное давление;
- $t_n$ , °С или  $T_n$ , К - температура насыщения;
- $v'$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем кипящей жидкости;
- $v''$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем сухого пара;
- $\rho''$ , кг/м<sup>3</sup> - плотность сухого пара;
- $h'$ , кДж/кг - энтальпия кипящей жидкости;
- $h''$ , кДж/кг — энтальпия сухого пара;
- $r$ , кДж/кг — теплота парообразования;
- $s'$ , кДж/(кг·К) - энтропия кипящей жидкости;
- $s''$ , кДж/(кг·К) - энтропия сухого пара.

Энтальпия и энтропия сухого пара кипящей жидкости связаны между собой следующими зависимостями:

$$h'' = h' + r; \quad s'' = s' + \frac{r}{T_H}. \quad (143)$$

**Влажный пар.** В 1 кг влажного пара содержится  $x$  кг сухого пара (степень сухости влажного пара) и  $(1-x)$  кг кипящей жидкости (степень влажности). Состояние влажного пара принято обычно характеризовать одной из следующих пар параметров:  $P, x$ ;  $P, (1-x)$ ;  $t'', x$ ;  $t'', (1-x)$ .

Удельный объем влажного пара

$$v_x = x v'' + (1-x) v' = v' + x (v'' - v'), \quad (144)$$

при  $x > 0,5$  и небольших давлениях с достаточной степенью точности

$$v_x = x v''. \quad (145)$$

**Энтальпия влажного пара**

$$h_x = h' + x (h'' - h') = h' + x r. \quad (146)$$

**Внутренняя энергия влажного пара**

$$u_x = h_x - P v_x. \quad (147)$$

**Энтропия влажного пара**

$$s_x = s' + x (s'' - s') = s' + \frac{x r}{T_H}. \quad (148)$$

**Перегретый пар.** Основными параметрами состояния перегретого пара являются:  $P, \text{Па}$  - абсолютное давление;  $v, \text{м}^3/\text{кг}$  - удельный объем;  $t, ^\circ\text{C}$  или  $T, \text{К}$  - температура перегрева.

Состояние перегретого пара характеризуется двумя параметрами:  $P$  и  $t$  – приложение Е. В таблицах для 1 кг перегретого пара содержатся величины следующих данных:

$P, \text{Па}$  - абсолютное давление;

$t$ , °C - температура перегретого пара;  
 $v$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем перегретого пара;  
 $h$ , кДж/кг - энтальпия перегретого пара;  
 $s$ , кДж/(кг·K) - энтропия перегретого пара.

Тепло, идущее на перегрев пара, при  $P=\text{const}$ , кДж/кг,

$$q_{\Pi} = h - h'' = \bar{C}_p (t - t''), \quad (149)$$

где  $\bar{C}_p$  - средняя массовая теплоемкость перегретого пара для интервала температур насыщения и перегрева, кДж/(кг·K).

Энтальпия перегретого пара, кДж/кг,

$$h = h'' + q_{\Pi} = h'' + \bar{C}_p (t - t''). \quad (150)$$

**Внутренняя энергия перегретого пара, кДж/кг,**

$$u = h - P v. \quad (151)$$

Энтропия перегретого пара, кДж/(кг·K),

$$s = s'' + \left( \frac{C_p}{T} \right)_{\text{ср}} (t - t''), \quad (152)$$

где  $\left( \frac{C_p}{T} \right)_{\text{ср}}$  - средняя величина отношения истинной теплоемкости при  $P=\text{const}$  к абсолютной температуре для интервала температур насыщения и перегрева.

### **Основные паровые процессы и их исследование по таблицам водяного пара**

Изохорный процесс ( $v=\text{const}$ ). Тепло, участвующее в процессе, идет исключительно на изменение внутренней энергии пара, так как работа процесса равна нулю:

$$q = u_2 - u_1. \quad (153)$$

Для определения конечных параметров пара по начальным используется уравнение процесса –  $v_2 = v_1$ .

Изобарный процесс ( $P=\text{const}$ ). Тепло в процессе расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы, уравнение может быть представлено в виде

$$q = h_2 - h_1. \quad (154)$$

Изотермический процесс ( $T=\text{const}$ ). Тепло в процессе расходуется на изменение внутренней энергии и совершение работы.

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1) \quad (155)$$

происходит за счет изменения ее потенциальной части, причем при росте объема пара внутренняя энергия увеличивается и наоборот.

Тепло, участвующее в процессе,

$$q = T (s_2 - s_1). \quad (156)$$

**Работа процесса**

$$l = q - \Delta u. \quad (157)$$

Адиабатный процесс ( $dq=0$ ). Из уравнения первого закона термодинамики следует, что работа для адиабатного процесса

$$l = u_1 - u_2. \quad (158)$$

Для нахождения конечных параметров процесса по начальным используется уравнение адиабаты –  $s_2 = s_1$ .

Процесс при постоянной степени сухости ( $x=\text{const}$ ). Возможно лишь приближенное решение процесса. Участвующее в процессе тепло

$$q = \frac{T_1 + T_2}{2} (s_2 - s_1). \quad (159)$$

Работу процесса находят из уравнения первого закона термодинамики.

При аналитическом решении процессов с парами начальное и конечное значения внутренней энергии, энтальпии и энтропии определяются по приведенным формулам в зависимости от вида пара в начале и конце процесса.

**Исследование паровых процессов по  $h$ - $s$ -диаграмме водяного пара** – приложение Г. Решение с помощью диаграммы более наглядно и значительно сокращает время, необходимое для расчета.

По  $h$ - $s$ -диаграмме определяют состояние для перегретого, сухого насыщенного и влажного водяного пара. По любой точке диаграммы можно найти следующие величины:

$v$ , м<sup>3</sup>/кг - удельный объем;

$t$ , °С - температура;

$P$ , Па - давление абсолютное;

$h$ , кДж/кг - энтальпия;

$s$ , кДж/(кг·К) - энтропия.

Значение внутренней энергии (кДж/кг) подсчитывается по формуле

$$u = h - P v . \quad (160)$$

Рассмотрим основные задачи, решаемые по  $h$ - $s$ -диаграмме.

**Изохорный процесс** ( $v=\text{const}$ ). На рис. 9 изображен изохорный процес на  $h$ - $s$ -диаграмме. Количество тепла, участвующего в процессе, определяется по формуле (153), которая одновременно служит для нахождения изменения внутренней энергии. Работа изохорного процесса, как и для газов, равняется нулю.

**Изобарный процесс** ( $P = \text{const}$ ). На рис. 10 представлен изобарный процесс на  $h$ - $s$ -диаграмме. Количество участвующего в процессе тепла находится по разности энтальпий (154).

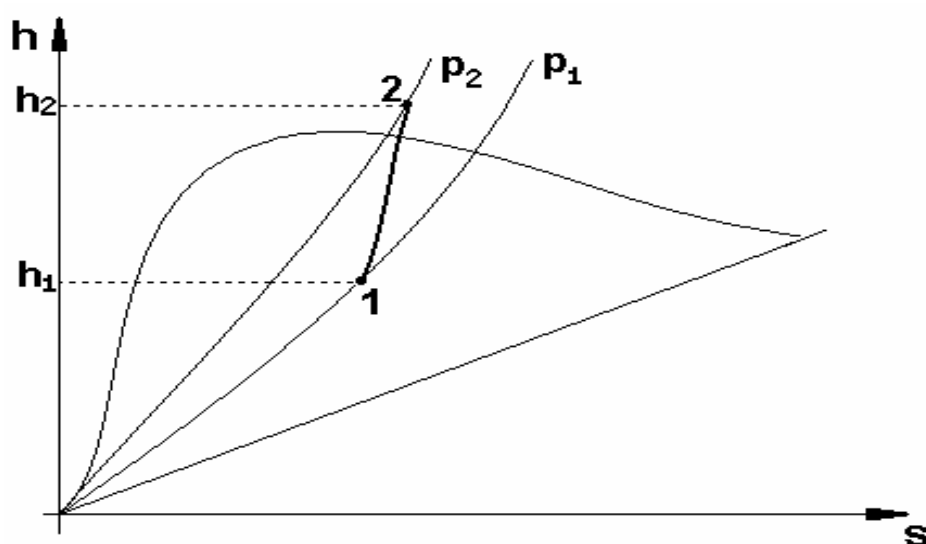


Рисунок 9 – Изображение изохорного процесса на  $h$ - $s$ -диаграмме

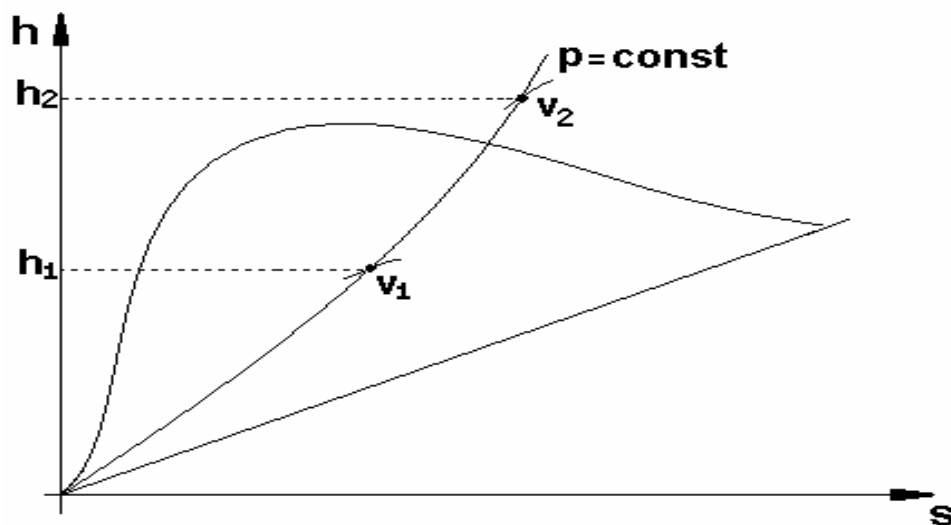


Рисунок 10 – Изображение изобарного процесса на hs-диаграмме

Изменение внутренней энергии находят по формуле (155).  
Работу изобарного процесса можно определить или по формуле

$$l = P(v_2 - v_1), \quad (161)$$

или по уравнению первого закона термодинамики (50).

**Изотермический процесс** ( $T = \text{const}$ ). На рис. 11 изображен изотермический процесс на hs-диаграмме.

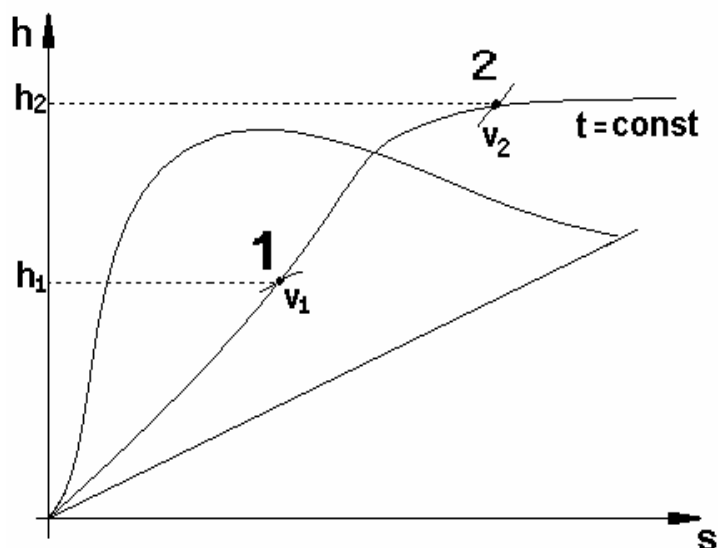


Рисунок 11 – Изображение изотермического процесса на  $hs$ -диаграмме

Тепло, изменение внутренней энергии (потенциальной ее части) и работу процесса находят по формулам (155) – (157).

**Адиабатный процесс** ( $dq=0$ ). На рис. 12 представлен адиабатный процесс, протекающий без участия тепла, т. е. и без изменения энтропии.

Изменение внутренней энергии для адиабатного процесса определяют, как и для прочих процессов, по выражению (155). Работа процесса равна изменению внутренней энергии.



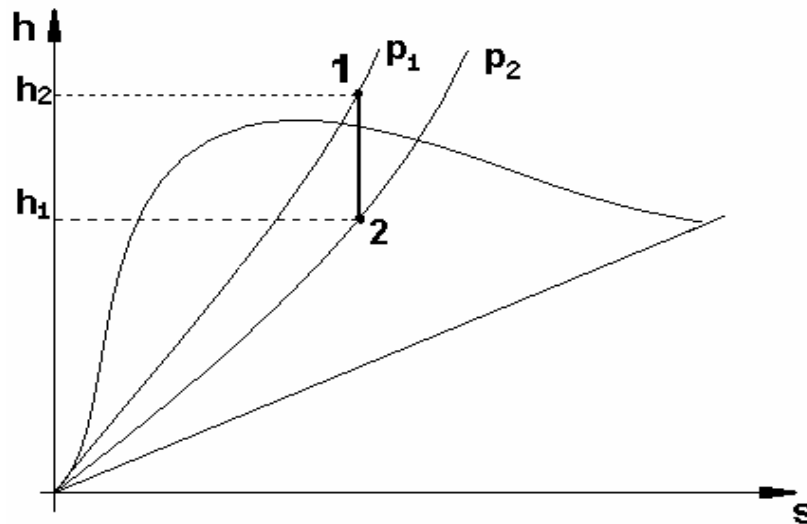


Рисунок 12 – Изображение адиабатного процесса на hs-диаграмме

**Процесс при постоянной степени сухости ( $x=\text{const}$ ).** Если в первом приближении линию  $x=\text{const}$  в Ts-диаграмме принять за прямую линию, то тепло процесса, определяемое площадью под линией, можно найти по формуле

$$q = \frac{T_1 + T_2}{2} \Delta s . \quad (162)$$

Применительно к hs-диаграмме (рис. 13) эта формула примет вид

$$q = \frac{t_1 + 273 + t_2 + 273}{2} (s_2 - s_1) . \quad (163)$$

Изменение внутренней энергии в процессе находят обычным способом (155). Работа процесса определяется по уравнению (157).

**Теоретический паросиловой цикл** (цикл Ренкина). Для определения основных величин цикла – термического КПД, работы 1 кг пара, удельных расходов пара и тепла - достаточно на диаграмме изобразить линию расширения пара в паровом двигателе 1-2 (рис. 14).

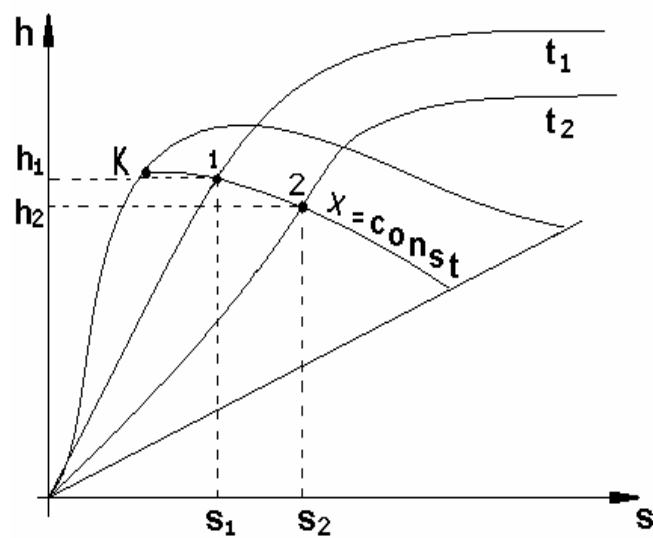


Рисунок 13 – Изображение процесса при постоянной степени сухости на  $hs$ -диаграмме

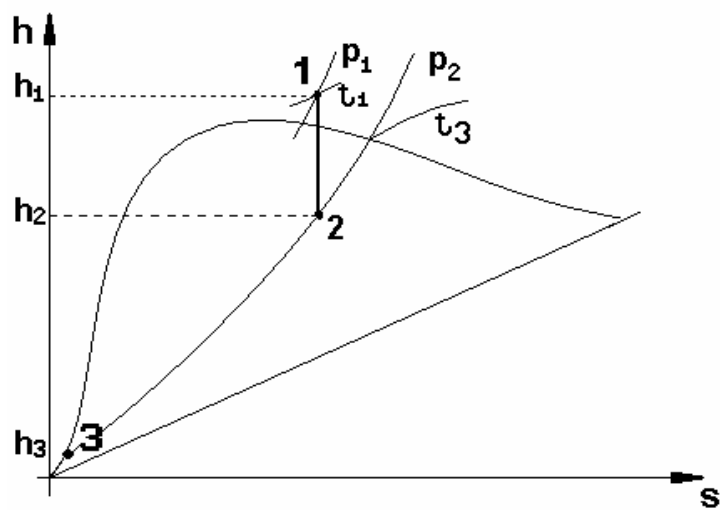


Рисунок 14 – Изображение процесса расширения пара в паровом двигателе на  $hs$ -диаграмме

### Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \cong \frac{h_1 - h_2}{h_1 - t_3}, \quad (164)$$

поскольку энтальпия конденсата (точка 3) численно равна температуре насыщения в той же точке. Работа 1 кг пара

$$l_u = h_2 - h_1. \quad (165)$$

Удельный расход пара на 1 кВт·ч

$$G = \frac{3600}{l_u} = \frac{3600}{h_1 - h_2}; \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad (166)$$

Удельный расход тепла на 1 кВт·ч

$$q = G (h_1 - h_3) \cong G (h_1 - t_3); \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}, \quad (167)$$

или

$$q = \frac{3600}{\eta_t}; \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}. \quad (168)$$

В формулах (166) – (168) величина 3600 кДж/(кВт·ч) является тепловым эквивалентом.

**Дросселирование.** Термодинамическая характеристика процесса дросселирования  $h = \text{const}$ . Если состояние пара до дросселирования определяется точкой 1 (рис. 15) и давление  $P_2$  после дросселирования задано, то конечное состояние определится точкой 2, лежащей на пересечении горизонтальной линии, проведенной из точки 1, с изобарой  $P_2$ .

При этом по расположению точки 2 видно, что в результате дросселирования пар, будучи вначале влажным, стал перегретым, что удельный объем его возрос, что температура снизилась, а энтропия возросла.

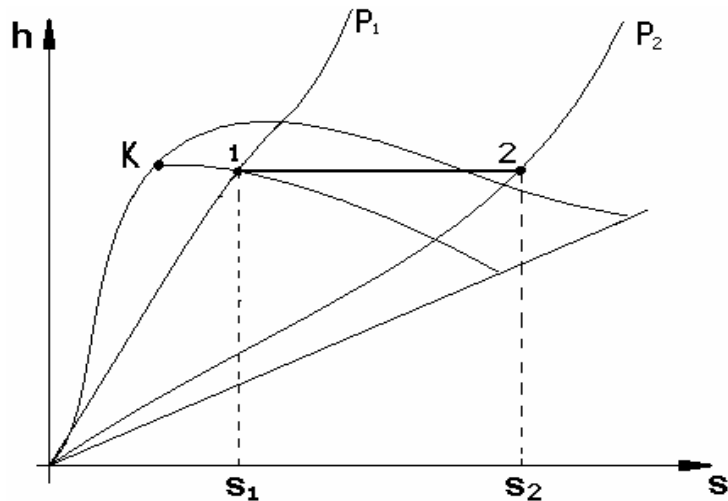


Рисунок 15 – Изображение процесса дросселирования пара на hs-диаграмме

Эффект изменения температуры при дросселировании называется дроссель-эффектом (эффектом Джоуля - Томсона), который принято различать по величине и знаку.

Под дифференциальным дроссель-эффектом понимают величину

$$\epsilon = \left( \frac{dT}{dP} \right)_h, \quad (169)$$

т. е. изменение температуры при дросселировании на  $dP$ , причем поскольку всегда  $dp < 0$ , то

при  $dT < 0$   $\epsilon > 0$  (положительный дроссель-эффект),

при  $dT > 0$   $\epsilon < 0$  (отрицательный дроссель-эффект),

при  $dT = 0$   $\epsilon = 0$  (нулевой дроссель-эффект).

Интегральный дроссель-эффект есть изменение температуры при дросселировании на конечное количество единиц давления:

$$\Delta T = \int_{p_1}^{p_2} \varepsilon dP . \quad (170)$$

Его знак совпадает со знаком дифференциального дроссель-эффекта. Поскольку дросселирование происходит без теплообмена с внешней средой (адиабатически необратимо), то отмеченное возрастание энтропии указывает на необратимость процесса дросселирования.

### Примеры решения задач

64 В трубу парового котла поступает 1000 кг/ч воды при температуре насыщения. Найти плотность выходящей из трубы пароводяной смеси, если давление в котле  $P_{абс}=40$  ат, теплоглощение трубы 40000 ккал/ч; изменением давления по высоте трубы можно пренебречь.

Решение:

Определяем по табл. Д.2 приложения Д теплоту парообразования  $r$ , удельный объем кипящей воды  $v'$  и сухого пара  $v''$  при давлении 40 ат (3,92 МПа).

Количество получающегося пара в трубе

$$G_{п} = \frac{Q}{r} = \frac{40000 \cdot 4,186}{1713,2,6} = 97,7 \text{ кг / ч} .$$

Степень сухости смеси в выходном сечении трубы

$$x = \frac{G_{п}}{G_{вод}} = \frac{97,7}{1000} = 0,0977 .$$

Удельный объем смеси по уравнению (144)

$$v_x = 0,0977 \cdot 0,05078 + (1 - 0,0977) \cdot 0,0012493 = 0,00608 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Следовательно, плотность смеси

$$\rho_x = \frac{1}{0,00608} = 164 \text{ кг/м}^3.$$

65 На получение пара давлением  $P=75$  ат затрачено тепла 480 ккал/кг. Определить состояние пара и его плотность, если пар получался из воды с температурой  $150^\circ\text{C}$ .

Решение:

Энтальпия воды при температуре  $150^\circ\text{C}$  (по табл. Д.1 приложения Д) составляет 632,2 кДж/кг.

Энтальпия пара

$$h = h' + q = 632,2 + 480 \cdot 4,186 = 2641,5 \text{ кДж/кг}.$$

Характеристики водяного пара при давлении 75 ат (7,35 МПа) следующие (табл. Д.2 приложения Д):

$$h' = 1231 \text{ кДж/кг}; h'' = 2758,6 \text{ кДж/кг}; r = 1492 \text{ кДж/кг}; \rho'' = 38,6 \text{ кг/м}^3.$$

Сравнивая энтальпию полученного пара с энтальпией сухого пара, устанавливаем, что пар влажный.

Степень сухости пара определяем исходя из уравнения (146):

$$x = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{2641,5 - 1231}{1492} = 0,94.$$

Плотность полученного пара

$$\rho_x = \frac{\rho''}{x} = \frac{38,6}{0,94} = 41,06 \text{ кг/м}^3.$$

66 В резервуаре объемом  $0,75 \text{ м}^3$  находится сухой насыщенный пар давлением 1 МПа. Пар подогревается при

неизменном объеме, и к концу нагревания его давление повышается до 1,4 МПа.

Определить количество затраченного на нагревание тепла.

Решение:

Сухой насыщенный пар при  $P=1$  МПа имеет удельный объем  $v''=0,1945$  м<sup>3</sup>/кг и энтальпию  $h''=2777,8$  кДж/кг. Следовательно, его внутренняя энергия

$$u'' = h'' - P_1 v'' = 2777,8 \cdot 10^3 - 10^6 \cdot 0,1945 = 2583,3 \text{ кДж/кг}.$$

К концу нагревания пар будет перегрет, причем его энтальпия будет равна (интерполяция по таблицам перегретого пара для  $P=1,4$  МПа,  $v=0,1945$  м<sup>3</sup>/кг – приложение Е): 3197,3 кДж/кг.

Внутренняя энергия перегретого пара

$$u = h - P_2 v = 3197,3 \cdot 10^3 - 1,4 \cdot 10^6 \cdot 0,1945 = 2906,3 \text{ кДж/кг}.$$

Масса пара в сосуде

$$m = \frac{V}{v''} = \frac{0,75}{0,1945} = 3,85 \text{ кг}.$$

На нагревание было затрачено тепло

$$Q = m (u - u'') = 3,85 \cdot (2906,3 - 2583,3) = 1244 \text{ кДж}.$$

67 Найти количество получающегося сухого насыщенного пара в сепараторе непрерывной продувки парового котла производительностью 200 т/ч, если процент непрерывной продувки равен 2,5%, давление в котле  $P_1=3$  МПа, а котловая вода перед входом в сепаратор дросселируется до  $P_2=0,3$  МПа. КПД сепаратора принять равным 98%.

Решение:

Энтальпия котловой воды при давлении 3 МПа составляет 1009,4 кДж/кг (табл. Д.2). При давлении 0,3 МПа энтальпия воды –

561,7 кДж/кг; энтальпия сухого насыщенного пара - 2725,5 кДж/кг; теплота парообразования – 2163,8 кДж/кг.

Количество выделяемого сепаратором пара

$$G = \frac{0,025 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot (10009,4 - 561,7) \cdot 0,98}{2163,8} = 1043 \text{ кг/ч}.$$

68 Какое количество воды можно нагреть от 10 до 20 °С водой, выходящей из сепаратора непрерывной продувки (см. задачу 67), если вода в теплообменнике непрерывной продувки должна быть охлаждена до 50 °С? Потеря тепла теплообменником в окружающую среду 5%.

Решение:

Энтальпия воды при 50 °С (табл. Д.1) 209,3 кДж/кг.

Количество подогреваемой воды

$$G_{\text{вод}} = \frac{(561,75 - 209,3) \cdot 0,95 \cdot (0,025 \cdot 200 \cdot 10^3 - 1043)}{20 - 10} = 31400 \text{ кг/ч}.$$

69 В установке для подогрева сетевой воды (системы теплофикации) имеются пиковые и основные подогреватели. Первые обогреваются паром с давлением 5 ат и температурой 250 °С, а вторые - паром с  $P_2=1,2$  ат температурой 130 °С. Конденсат пиковых подогревателей направляется в основные, где происходит частичное использование его энтальпии.

Определить часовые расходы пара на пиковые и основные подогреватели, если:

- количество воды, которую следует подогреть,  $G_w=30$  т/ч;
- вода в установке подогревается с  $t_1=60^\circ$  до  $t_2=110^\circ\text{C}$ ;



- разность между температурой воды, выходящей из основных подогревателей, и температурой насыщения обогревающего их пара составляет 8°C;
- КПД подогревателей  $\eta=98\%$ .

Решение:

Температура насыщения пара при  $P_2=1,2$  ат =0,12 МПа (табл. Д.2) составляет  $t''=104,25^\circ\text{C}$ , следовательно, при входе в пиковые подогреватели сетевая вода будет иметь температуру

$$t = 104,25 - 8 = 96,25^\circ\text{C}.$$

Энтальпия пара при  $250^\circ\text{C}$  составляет  $h_5=2801$  кДж/кг (табл. Д.1). Энтальпия кипящей воды при  $P_1=5$  ат = 0,49 МПа (табл. Д.2) составляет  $h'_5=640,1$  кДж/кг.

Расход пара на пиковые подогреватели

$$G_5 = \frac{G_w \cdot 10^3 \cdot (t_2 - t)}{\eta (h_5 - h'_5)} = \frac{30 \cdot 10^3 \cdot (110 - 96,25)}{0,98 \cdot (2801 - 640,1)} = 775 \text{ кг / ч }.$$

Энтальпия пара при  $130^\circ\text{C}$  –  $h_{1,2}=2720,6$  кДж/кг. Энтальпия кипящей воды при  $P_2=1,2$  ат =0,12 МПа –  $h'_{1,2}=439,34$  кДж/кг.

Суммарный теплосъем с основных подогревателей

$$q_{\text{оп}} = G_w \cdot 10^3 \cdot C_w (t - t_1) = 30 \cdot 10^3 \cdot 4,186 \cdot (96,25 - 60) = 4,55 \cdot 10^6 \text{ кДж / ч },$$

из которых на конденсат пиковых подогревателей приходится:

$$q' = \eta G_5 (h'_5 - h'_{1,2}) = 0,98 \cdot 775 \cdot (640,1 - 439,34) = 151887 \text{ кДж / ч}$$

и на пар при давлении 0,12 МПа -

$$q_{\text{оп}} - q' = 4,55 \cdot 10^6 - 151887 = 4,4 \cdot 10^6 \text{ кДж / ч }.$$

Часовой расход пара на основные подогреватели

$$G_{1,2} = \frac{4,4 \cdot 10^6}{0,98 \cdot (2720,6 - 439,34)} = 1955 \text{ кг / ч }.$$

70 Найти с помощью  $h_s$ -диаграммы теплоту парообразования для давления 5 бар.

Решение:

На  $h_s$ -диаграмме находим изобару  $P=5$  бар (приложение Г).

На изобаре при любой степени сухости берется точка 1 и рассматривается изобарный процесс 1-2 (точка 2 – сухой насыщенный пар), для которого подведенное тепло

$$q = h_2'' - h_1 = r (1 - x) .$$

Например, точка 1:  $P_1=5$  бар;  $x=0,8$ ;  $h_1=2340$  кДж/кг. Точка 2:  $P_2=5$  бар;  $h_2=2750$  кДж/кг. Теплота парообразования для давления 5 бар будет соответственно равна

$$r = \frac{h_2'' - h_1}{1 - x} = \frac{2750 - 2340}{1 - 0,8} = 2050 \text{ кДж / кг} .$$

71 В сосуде неизменной емкости находится 1 кг пара с давлением 30 бар и температурой 600°C. От пара отводится 400 кДж тепла. До каких значений упадут давление и температура пара внутри сосуда?

Решение:

Наносим на  $h_s$ -диаграмме исходную точку 1 ( $P_1=30$  бар;  $t_1=600^\circ\text{C}$ ) и находим: значение энтальпии –  $h_1=3690$  кДж/кг и удельного объема –  $v_1=0,133$  м<sup>3</sup>/кг. Внутренняя энергия для нее будет:

$$u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 880 \cdot 10^3 - 30 \cdot 10^5 \cdot 0,133 = 3290 \text{ кДж / кг} .$$

В изохорном процессе теплообмен связан лишь с изменением внутренней энергии. Следовательно,

$$u_2 = u_1 - q = 3290 - 400 = 2890 \text{ кДж / кг} .$$

Давление в точке 2 находим интерполяцией. Для этого на изохоре  $v=0,133$  м<sup>3</sup>/кг берем две точки с давлениями (произвольными):

$P_3=20$  бар и  $P_4=24$  бар, определяем по диаграмме их энтальпию и подсчитываем для них внутреннюю энергию:

для  $P_3=20$  бар -

$$u_3 = 3080 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^5 \cdot 0,133 = 2820 \text{ кДж/кг};$$

для  $P_4=24$  бар -

$$u_4 = 3310 \cdot 10^3 - 24 \cdot 10^5 \cdot 0,133 = 3000 \text{ кДж/кг}.$$

Давление в конце процесса находят интерполяцией:

$$P_2 = 20 + \frac{(24 - 20)(2890 - 2820)}{3000 - 2820} = 23,5 \text{ бар}.$$

Находим на диаграмме точку 2 и определяем ее температуру  $t_2=350^\circ\text{C}$ .

72 Сухой насыщенный пар при постоянном давлении 10 бар сначала перегревается до  $600^\circ\text{C}$ , а затем при неизменном объеме вновь охлаждается до сухого насыщенного состояния. Найти изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии в рассматриваемом сложном процессе по величине и знаку.

Решение:

Наносим на  $h$ - $s$ -диаграмме точки 1, 2 и 3 и определяем их характеристики:

$$P_1=10 \text{ бар}; x=1; h_1=2770 \text{ кДж/кг}; s_1=6,68 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}; v_1=0,22 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$t_2=600^\circ\text{C}; h_2=3700 \text{ кДж/кг}; s_2=8,06 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}; v_2=0,4 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_3=0,4 \text{ м}^3/\text{кг}; P_3=4 \text{ бар}; x=1; h_3=2750 \text{ кДж/кг}; s_3=6,88 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Находим изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии в рассматриваемом сложном процессе:

$$\Delta h = h_3 - h_1 = 2750 - 2770 = -20 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta u = u_3 - u_1 = (2750 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^5 \cdot 0,4) - (2770 \cdot 10^3 - 10^6 \cdot 0,22) = -21,8 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta s = s_3 - s_1 = 6,88 - 6,68 = 0,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) .$$

73 Процесс протекает при неизменной 90%-ной сухости от давления  $P_1 = 20$  бар до давления  $P_2 = 1$  бар. Найти участвующее в процессе тепло, изменение внутренней энергии и работу пара по величине и знаку.

Решение:

Наносим на  $h$ - $s$ -диаграмме (приложение Г) точки 1 и 2 и определяем их характеристики:

$$P_1 = 20 \text{ бар}; x = 0,9;$$

$$t_1 = 212^\circ\text{C}; h_1 = 2620 \text{ кДж/кг}; s_1 = 5,97 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); v_1 = 0,11 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$P_2 = 1 \text{ бар}; x = 0,9;$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}; h_2 = 2450 \text{ кДж/кг}; s_2 = 6,76 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); v_2 = 1,5 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Найдем подведенное тепло по уравнению (162):

$$q \cong \frac{T_1 + T_2}{2} \Delta s = \frac{485 + 373}{2} (6,76 - 5,97) = 339 \text{ кДж/кг},$$

затем изменение внутренней энергии в процессе

$$\Delta u = (2450 \cdot 10^3 - 10^5 \cdot 1,5) - (2620 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^5 \cdot 0,11) = -137,5 \text{ кДж/кг}.$$

Работу процесса находят из уравнения первого закона термодинамики:

$$l = q - \Delta u = 339 - (-137,5) = 485,5 \text{ кДж/кг}.$$

74 Перегретый пар давлением  $P_1 = 100$  бар и температурой  $350^\circ\text{C}$  дросселируется до  $P_2 = 10$  бар. Определить средний дифференциальный дроссель-эффект по величине и знаку.

Решение:

Для нахождения состояния пара после дросселирования из точки 1 ( $P_1 = 100$  бар;  $t_1 = 350^\circ\text{C}$ ) проводим линию  $h = \text{const}$  до

пересечения с заданным конечным давлением  $P_2=10$  бар. По  $h_s$ -диаграмме находим  $t_2=243^\circ\text{C}$ . Следовательно, средний дифференциальный дроссель-эффект

$$\varepsilon = \frac{t_2 - t_1}{P_2 - P_1} = \frac{243 - 350}{10 - 100} = 1,185 .$$

Поскольку при дросселировании всегда  $\Delta P < 0$ , а в данном случае и  $\Delta t < 0$ , то знак дроссель-эффекта положительный ( $\varepsilon > 0$ ).

75 Для подачи потребителю пара в сухом насыщенном состоянии давлением 6 бар используется пар, вырабатываемый котлами при  $P_2=40$  бар и  $350^\circ\text{C}$ . После дросселирования пар пропускается через поверхностный пароохладитель, где происходит его охлаждение при неизменном давлении. Сколько тепла за 1 ч отводится от пара в охладителе, если расход его составляет 5000 кг/ч?

Решение:

Наносим на  $h_s$ -диаграмме (приложение Г) начальное состояние пара, вырабатываемого котлами, – точка 1, после дросселирования – точка 2 и направляемого потребителю – точка 3. Определим значение энтальпии до и после пароохладителя:

$$h_1=3090 \text{ кДж/кг}; h_2=2760 \text{ кДж/кг}.$$

Поскольку охлаждение пара в поверхностном охладителе происходит при  $P=\text{const}$ , то отведенное тепло

$$Q = G (h_3 - h_2) = 5000 \cdot (2760 - 3090) = -1650000 \text{ кДж/ч} = 458 \text{ кДж/с} .$$

76 В идеальном паросиловом цикле Ренкина пар перед турбиной имеет давление 50 бар и температуру  $400^\circ\text{C}$ . Определить работу 1 кг пара, расходы пара и тепла на киловатт-час и термический

КПД, если вакуум в конденсаторе турбины 95%, а барометрическое давление 700 мм рт. ст.

Решение:

Абсолютное давление в конденсаторе

$$P_2 = \frac{P_{\text{бар}}(1 - 0,95)}{735,6} = \frac{700 \cdot (1 - 0,95)}{735,6} = 0,04665 \text{ бар}.$$

Для нахождения указанных в задаче величин достаточно на диаграмме (приложение Г) провести линию 1-2 адиабатного расширения пара в турбине. Характеристики точек:

$$h_1 = 3200 \text{ кДж/кг}; h_2 = 2020 \text{ кДж/кг}; t_2 = 32^\circ\text{C}.$$

Работа 1 кг пара

$$l_u = h_1 - h_2 = 3200 - 2020 = 1180 \text{ кДж/кг}.$$

Удельный расход пара на киловатт-час

$$G = \frac{3600}{l_u} = \frac{3600}{1180} = 3,05 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - t_2} = \frac{3200 - 2020}{3200 - 32} = 0,384.$$

Удельный расход тепла на киловатт-час

$$q = \frac{3600}{\eta_t} = \frac{3600}{0,384} = 9375 \frac{\text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

Задачи

224 Найти температуру насыщенного пара при давлении 85,4 ат.

Ответ:  $t'' = 298,34^\circ\text{C}$ .

225 Температура насыщенного пара при некотором давлении равна 305,5°C. Каково давление этого пара?

Ответ:  $P=92,9$  бар.

226 По данным испытаний турбины разрежение в ее конденсаторе составляет 94% при барометрическом давлении 730 мм рт. ст. и 0°C. Каково абсолютное давление в конденсаторе?

Ответ:  $P=0,0587$  бар.

227 Абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины 0,04 ат. Каково при этом значение вакуума в процентах, если барометрическое давление 720 мм рт. ст. при температуре 25°C?

Ответ: вакуум 96%.

228 Как велика ошибка при определении удельного объема влажного пара с давлением 20 ат и влажностью 20% по приближенной формуле (145)?

Ответ: ошибка 0,288%.

229 Какова будет ошибка при определении удельного объема пара предыдущей задачи, если влажность пара увеличится до 60%.

Ответ: ошибка 1,705%.

230 Пользуясь паровыми таблицами, найти удельный объем, энтальпию, внутреннюю энергию и энтропию влажного пара при давлении 5 ат и влажности 15%.

Ответ:  $v_x = 0,324 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $h_x=2430 \text{ кДж/кг}$ ;

$u_x=2270 \text{ кДж/кг}$ ;  $s_x=6,1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

231 В сосуде шарообразной формы находится в верхней половине сухой насыщенный пар, в нижней - вода в состоянии насыщения. Во сколько раз вес воды больше веса пара, если внутренний диаметр сосуда 1 м и давление внутри него 20 ат?

Ответ: в 86,5 раз.

232 Пар в некотором состоянии имеет давление 30 ат и плотность  $14,71 \text{ кг/м}^3$ . Определить состояние пара и его удельный объем, энтальпию и энтропию.

Ответ: пар сухой;  $v''=0,06798 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$h''=2800 \text{ кДж/кг}$ ;  $s''=6,2 \text{ кДж/(кг·К)}$ .

233 Пар в некотором состоянии при температуре  $245^\circ\text{C}$  имеет энтальпию  $630 \text{ ккал/кг}$ . Определить состояние пара, его плотность и внутреннюю энергию.

Ответ: пар влажный;  $\rho_x=20,2 \text{ кг/м}^3$ ;

$u_x=2460 \text{ кДж/кг}$ .

234 Пар при давлении 66 ат имеет удельный объем  $0,04675 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Найти температуру, энтальпию и энтропию пара.

Ответ: пар влажный;  $h=3260 \text{ кДж/кг}$ ;

$s=6,64 \text{ кДж/(кг·К)}$ .

235 Стальной цилиндрический резервуар диаметром 600 мм и длиной 2500 мм заполнен сухим насыщенным паром с  $P_1=20 \text{ ат}$ . К резервуару подводится некоторое количество тепла, в результате чего давление пара увеличивается до  $P_2=35 \text{ ат}$ . Определить конечную температуру пара и количество подведенного тепла.

Ответ:  $t_2 = 503,3^\circ\text{C}$ ;  $Q=3565 \text{ кДж}$ .

236 Найти тепло, идущее на перегрев сухого насыщенного пара давлением 80 бар до  $500^\circ\text{C}$ , с помощью паровых таблиц, а также используя данные о теплоемкостях пара. На сколько процентов энтальпия перегретого пара больше энтальпии сухого пара?

Ответ:  $q= 614 \text{ кДж/кг}$ ; на 23,3%.

237 Определить тепло, идущее на перегрев пара в пароперегревателе котла, если до поступления в него пар имеет давление 60 бар и влажность 0,5%, а конечная температура пара



500°C. Найти также работу пара, связанную с увеличением его объема в процессе перегрева, протекающем при  $P = \text{const}$ .

Ответ:  $q = 647,5$  кДж/кг;  $l = 146000$  кДж/кг.

238 Определить часовое количество тепла, затрачиваемого на перегрев пара до 480°C в котлоагрегате, если давление пара 45 бар, а производительность агрегата 60 т/ч. На сколько процентов пойдет больше тепла на перегрев того же количества пара, если благодаря несовершенной системе сепарации в перегреватель будет поступать пар с 2%-ной влажностью?

Ответ:  $Q = 35,85 \cdot 10^6$  кДж/ч; перерасход тепла на 5,63%.

239 В промежуточный перегреватель поступает сухой насыщенный пар из турбины с  $P_1 = 12$  бар в количестве 60 т/ч и перегревается до 400°C. Определить часовое количество тепла, затрачиваемое на перегрев пара.

Ответ:  $Q = 28,7 \cdot 10^6$  кДж/ч.

240 На сколько градусов снизится перегрев пара, если при одном и том же подводе тепла  $21 \cdot 10^6$  кДж/ч и производительности перегревателя 30 т/ч в него будет вместо сухого насыщенного пара поступать влажный пар с 1,5%-ной влажностью? Давление пара  $P = 60$  бар.

Ответ: на 10,7°C.

241 В цилиндре, закрытом поршнем, находится перегретый пар с начальным давлением  $P_1 = 23$  бар и температурой 300°C, причем поршень отстоит от дна цилиндра на 1000 мм. Под действием груза, лежащего на поршне, пар сжимается и поршень проходит путь, равный 400 мм. Определить работу, затраченную на сжатие, и количество отведенного тепла.

Ответ:  $L = 64000$  кДж;  $Q = 4365$  кДж.

242 Начальное давление пара 12 бар, влажность 20%. Пар в результате подогрева превращается в перегретый с температурой 250 °С первый раз при  $v = \text{const}$ , а второй раз при  $P = \text{const}$ . Какая теплота больше и во сколько раз? Каков должен быть по величине и знаку теплообмен с внешней средой, чтобы из конечного состояния, полученного в процессе  $v = \text{const}$ , достигнуть конечное состояние в процессе  $P = \text{const}$  при условии  $t = \text{const}$ .

Ответ: при  $P = \text{const}$  больше в 1,18 раз, теплообмен положительный,  $q = 104,6$  кДж/кг.

243 Сухой насыщенный пар с  $P_1 = 40$  бар расширяется при  $t = \text{const}$  до  $P_2 = 10$  бар. Какова совершенная паром работа?

Ответ:  $l = 338$  кДж/кг.

244 1 кг влажного пара с давлением 30 бар и 10%-ной влажностью расширяется при неизменной температуре до  $P_2 = 2$  бар. Определить работу процесса.

Ответ:  $l = 777$  кДж/кг.

245 Каково значение удельного объема в конце изотермического процесса расширения сухого насыщенного пара с  $P_1 = 25$  бар, если за время процесса к пару подводится 629 кДж/кг тепла? Как велика ошибка в определении конечного удельного объема, если пар принять за идеальный газ?

Ответ:  $v_2 = 0,96275$  м<sup>3</sup>/кг; ошибка 49,8%.

246 В начальном состоянии перегретый пар имеет давление 60 бар и температуру 400 °С. Какова будет влажность этого пара в конце обратимого адиабатного расширения, если конечное давление 3 бар?

Ответ: влажность  $(1-x) = 8,3\%$ .

247 Влажный пар с  $P_1=5$  бар и 10%-ной влажностью сжимается по адиабате до  $P_2=50$  бар. Каковы состояние и основные параметры пара в конце сжатия?

Ответ: пар перегрет;  $t_2= 322,6^\circ\text{C}$ ;

$$s_2=6,35 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K}); v_2=0,04954 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

248 Влажный пар с  $P_1=5$  бар и 80%-ной влажностью сжимается адиабатно в идеальном паровом компрессоре до  $P_2=250$  бар. Каковы состояние пара на выходе из компрессора и работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг пара?

Ответ: в конце сжатия – некипящая вода с

$$t_2=261,54^\circ\text{C}; l=82150 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

249 Идет обратимый адиабатный процесс в области перегретого пара от начального давления  $P_1=20$  бар при  $t_1=500^\circ\text{C}$  до конечного давления  $P_2_{\text{абс}}=3$  бар. Найти показатель адиабаты указанного процесса, считая его неизменным по всей длине процесса.

Ответ:  $k=1,29$ .

250 Процесс происходит при неизменной 20%-ной влажности от начального давления 1 бар до конечного 20 бар. Найти по величине и знаку тепло, изменение внутренней энергии и работу процесса.

Ответ:  $q = - 250,1 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;  $\Delta u = 173,5 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;

$$l = - 424000 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

251 Влажный пар с  $P_1=30$  бар и  $x_1=0,85$  дросселируется до 5 бар, после чего направляется на производство. Найти состояние, удельный объем, степень сухости и температуру пара после дросселирования.

Ответ: пар влажный;  $v_2=0,344 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $x_2=0,9$ ;  
 $t=151,11^\circ\text{C}$ .

252 Влажный пар с  $P_1=50$  бар и  $x=0,98$  дросселируется до давления 1 бар. Найти состояние пара после дросселирования и интегральный дроссель-эффект по величине и знаку.

Ответ: пар перегрет; интегральный дроссель-эффект положителен,  $\Delta t = -118,1^\circ\text{C}$ .

253 Перегретый пар с  $P_1=100$  бар и  $t_1=350^\circ\text{C}$  дросселируется до  $P_2=10$  бар. Найти конечную температуру и изменение внутренней энергии и энтропии пара в результате дросселирования.

Ответ:  $t_2=242,7^\circ\text{C}$ ;  $\Delta u = -3.36$  кДж/кг;  
 $\Delta s=0,942$  кДж/(кг·K).

254 Влажный пар с  $P_1=30$  бар и 5%-ной влажностью дросселируется до  $P_2=1$  бар. Определить состояние пара после дросселирования, интегральный и средний дифференциальный дроссель-эффекты по величине и знаку и увеличение энтропии пара.

Ответ: пар перегрет; интегральный дроссель-эффект положительный:  $\Delta t = -114,86^\circ\text{C}$ ;  
 $\epsilon=3,95 > 0$ ;  $\Delta s=1,71$  кДж/(кг·K).

255 Идеальный одноступенчатый компрессор сжимает перегретый пар с  $P_1=2$  бар,  $t_1=150^\circ\text{C}$  до  $P_2=30$  бар. Определить работу, затраченную на компрессор, если сжатие производится по адиабате и сжимается 5 кг пара.

Ответ:  $L = 362000$  кДж.

256 Барабан котла имеет внутренний диаметр 1500 мм и длину 10 м. Какова аккумулирующая способность котла, если при неизменном давлении и прекращении питания уровень воды в нем может быть понижен на 200 мм (100 мм вверх и 100 мм вниз от центра барабана)? Давление в котле 60 бар, температура питательной воды

150°C. Каково увеличение часовой производительности котла, если указанное понижение уровня происходит в течение 1 мин?

Ответ:  $\Delta G = 36300$  кг/ч.

257 Для влажного пара с давлением 20 бар и 20%-ной влажностью найти удельный объем, температуру, энтропию, энтальпию и внутреннюю энергию.

Ответ:  $v = 0,081$  м<sup>3</sup>/кг;  $t = 213^\circ\text{C}$ ;  $h = 2420$  кДж/кг;  
 $s = 5,575$  кДж/(кг·К);  $u = 2265$  кДж/кг.

258 Сравнить значения энтропии и энтальпии сухого насыщенного пара давлением  $P = 50$  бар по  $h_s$ -диаграмме и по паровым таблицам.

Ответ: по диаграмме -  $h'' = 2800$  кДж/кг;  $s'' = 5,97$  кДж/(кг·К);  
по таблицам -  $h'' = 2795$  кДж/кг;  $s'' = 5,980$  кДж/(кг·К).

259 Для перегретого пара давлением 50 бар и температурой перегрева 400°C найти удельный объем, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию пара.

Ответ:  $v = 0,059$  м<sup>3</sup>/кг;  $u = 2905$  кДж/кг;  
 $h = 3190$  кДж/кг;  $s = 6,65$  кДж/(кг·К).

260 Пар имеет энтропию 7,25 кДж/(кг·К). Найти внутреннюю энергию пара, если его давление 10 бар. Каково состояние пара?

Ответ:  $u = 2855$  кДж/кг; пар перегрет.

261 При давлении 50 бар энтальпия пара равна 3150 кДж/кг. Определить температуру, энтропию и внутреннюю энергию пара.

Ответ:  $t = 380^\circ\text{C}$ ;  $s = 6,556$  кДж/(кг·К);  
 $u = 2865$  кДж/кг.

262 1 кг влажного пара с начальным давлением 10 бар и 80%-ным паросодержанием подсушивается до сухого насыщенного состояния при неизменном давлении и неизменном объеме. В каком

из процессов затрачивается больше тепла на подсушку? Каково давление в конце процесса подсушки при неизменном объеме?

Ответ:  $q_p=402$  кДж/кг;  $q_v=372,5$  кДж/кг;

$P_2=12,4$  бар.

263 Найти затраченное тепло, работу и изменение внутренней энергии в процессе  $P=30$  бар=const, если в начале процесса пар имел влажность 13%, а в конце стал перегретым и его температура повысилась до  $400^\circ\text{C}$ . Какой процент тепла был затрачен на первоначальном участке процесса, в конце которого пар превратился в сухой насыщенный?

Ответ:  $q=660$  кДж/кг;  $l=117,6$  кДж/кг;  $\Delta u=541,5$  кДж/кг;

для превращения пара в сухой насыщенный было затрачено 35,5% тепла.

264 Сколько надо затратить тепла, чтобы сухой насыщенный пар, занимающий объем  $0,05$  м<sup>3</sup>/кг, нагреть при постоянном объеме до  $650^\circ\text{C}$ . Во сколько раз при этом возрастет давление пара?

Ответ:  $q=753$  кДж/кг; в 2,07 раза.

265 Перегретый пар с начальным давлением 1 бар и температурой  $250^\circ\text{C}$  сжимается по изотерме и в конце процесса становится влажным с 15% влаги. Найти отводимое тепло, изменение внутренней энергии и работу, затрачиваемую на сжатие.

Ответ:  $q= - 1282$  кДж/кг;  $\Delta u= - 356$  кДж/кг;

$l= - 926$  кДж/кг.

266 Влажный пар с давлением 20 бар и 20%-ной влажностью расширяется при неизменной температуре до сухого насыщенного состояния. Найти теплообмен с окружающей средой и изменение внутренней энергии по величине и знаку.

Ответ:  $q=383$  кДж/кг;  $\Delta u=342$  кДж/кг.

267 Какова работа процесса, если происходит процесс адиабатного сжатия сухого насыщенного пара давлением 3 бар до конечного давления 50 бар? Определить конечную температуру пара.

Ответ:  $t_2=505^\circ\text{C}$ ;  $l = - 559 \text{ кДж/кг}$ .

268 Процесс протекает по верхней пограничной кривой от  $P_1=20$  бар до  $P_2=1,5$  бар. Определить значение средней теплоемкости процесса по величине и знаку? Изменится ли знак теплоемкости, если процесс будет протекать в противоположном направлении?

Ответ:  $C_p = - 3,73 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ ; от перемены направления знак не меняется.

269 Перегретый пар с  $P_1=20$  бар и  $t_1=400^\circ\text{C}$  сначала расширяется по адиабате до сухого насыщенного состояния, а затем охлаждается до температуры  $115^\circ\text{C}$  при неизменном объеме. Определить для этого процесса теплообмен с внешней средой, работу процесса.

Ответ:  $q = - 267 \text{ кДж/кг}$ ;  $l=418,6 \text{ кДж/кг}$ .

270 При изотермном сжатии 1 кг перегретого пара, имеющего в начале  $P_1=3$  бар и  $t_1=300^\circ\text{C}$ , отводится 419 кДж тепла. Каково давление в конце сжатия и на сколько уменьшилась внутренняя энергия пара? Найти также затраченную работу на сжатие пара.

Ответ:  $P_2= 13,5$  бар;  $\Delta u = - 25,05 \text{ кДж/кг}$ ;

$l = - 396 \text{ кДж/кг}$ .

271 Адиабатное расширение сухого (насыщенного) пара происходит от 10 до 0,5 бар. Найти средний показатель кривой процесса.

Ответ:  $k=1,135$ .

272 Влажный пар с давлением 30 бар и 15%-ной влажностью дросселируется до  $P_2=3$  бар. Найти удельный объем пара после

дросселирования и интегральный дроссель-эффект по величине и знаку.

Ответ:  $v=0,56 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\Delta t=102^\circ\text{C}$ .

273 Котельная производит пар давлением 15 бар. Каков должен быть перегрев пара, если цех предприятия должен получить пар давлением  $P_2 = 2$  бар и температурой  $200^\circ\text{C}$ . Снижение давления с 15 до 2 бар происходит в редукционном клапане.

Ответ:  $t=227^\circ\text{C}$ .

274 Построить график изменения термического КПД теоретического паросилового цикла (цикла Ренкина) для начальных давлений пара  $P=20, 40, 60, 80$  и  $100$  бар и начальной температуры пара  $400^\circ\text{C}$ , если вакуум в конденсаторе во всех случаях равен 96% при барометрическом давлении 735,6 мм рт. ст. Найти влажность пара в конце расширения для всех указанных начальных давлений.

Ответ:  $P_i = 100; 80; 60; 40; 20$  бар;

$\eta_{t1} = 0,41; 0,407; 0,395; 0,381; 0,352$ ;

$(1-x)_i = 29; 26,2; 24; 21,3; 16,8\%$ .

275 Как сказывается на экономичности теоретической паросиловой установки повышение температуры перегрева до 300, 400, 500 и  $600^\circ\text{C}$  при неизменном начальном давлении 30 бар и вакууме в конденсаторе 95% при барометрическом давлении 760 мм рт. ст.

Ответ:  $\eta_{t1} = 0,347; 0,362; 0,374; 0,392$ .

276 Сравнить удельные расходы пара двух турбин одинаковых начальных параметров:  $P_1=130$  бар,  $t_1=565^\circ\text{C}$  при одинаковых давлениях в конденсаторе  $P_2=0,035$  бар, если одна из них имеет промежуточный перегрев при  $P_n=30$  бар до начальной температуры, считая процессы расширения адиабатными.



Ответ:  $G_1=2,36 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}$ ;  $G_2=1,955 \text{ кг/(кВт}\cdot\text{ч)}$ .

277 Параметры перегретого пара турбин  $P_1=29 \text{ бар}$ ,  $t_1=230^\circ\text{C}$  (сухой насыщенный пар). Определить изменение термического КПД, если давление в конденсаторе изменилось от 0,04 до 0,06 бар. Паротурбинная установка работает по циклу Ренкина.

Ответ:  $\eta_t=34,8$  и  $33,7\%$ .