

ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Институт педагогики и психологии

Кафедра технологического образования

Модуль: « машиноведение»

техническая термодинамика

Пояснительная записка к курсовой работе

Петрозаводск

2015

Введение

Теплотехника -- общетехническая дисциплина, изучающая методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принцип действия и конструктивные особенности тепло- и парогенераторов тепловых машин, агрегатов и устройств. В развитии теплотехники и её теоретических основ большая заслуга принадлежит российским учёным. Д. И. Менделеев провёл фундаментальные работы по общей теории теплоёмкостей и установил существование для каждого вещества критической температуры. М. В. Ломоносов создал основы молекулярно-кинетической теории вещества и установил взаимосвязь между тепловой и механической энергией. Теплотехника, отрасль науки и техники, охватывающая методы получения и использования тепловой энергии.

### 1. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Условие задачи: Разрежение в газоходе парового котла измеряется тягомером с наклонной трубкой. Угол наклона трубки  $\beta = 30^\circ$ . Длина столба воды, отсчитанная по шкале, 160 мм. Определить абсолютное давление

Газов, если показание ртутного барометра приведенное к 0° С составляет, 740 мм.

Так как трубка тягомера находится под наклоном в 30° и показание его

160мм.то,пользуясь свойствами прямоугольных треугольников можно определить реальную высоту водяного столба.(см.рис 1)

Рисунок 1- схема решения.

Р<sub>вак</sub> лежит против угла  $\alpha=30^\circ$  и поэтому  $R_{вак} = 160/2=80$ мм вод.ст.

Далее переводим единицы из мм.вод.ст. в Па  $R_{вак}=80 \cdot 9,81=784,8$  Па

Далее переводим в мм.рт.ст. $R_{вак}=784,8/133,3=5,88$ мм.рт.ст.

Определяем абсолютное давление

$R_{абс}=R_{атм}-R_{вак}=740-5,88=734,1$ мм.рт.ст.

Ответ: Абсолютное давление газов =734,1мм.рт.ст.

### 2. ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Условие задачи: В воздухонагреватель парового котла вентилятором подается 130000м<sup>3</sup>/ч воздуха при температуре 30°С .Определить объем воздуха на выходе воздухонагревателя ,если нагрел его до 400°С При постоянном давлении.

Для решения данной задачи необходимо воспользоваться законом Гей-Люссака  $V_1/V_2 = T_1/T_2$  Где:

$V_1$ -объем воздуха на входе в котел =130000м<sup>3</sup>

$V_2$  - объем воздуха на выходе из котла.

$T_1$ - температура воздуха на входе в котел  $t=300\text{C}$ ,  $T=t+273=3030\text{ K}$ .

$T_2$  - температура нагрева воздуха в котле  $T=4000\text{ C}$ ,  $T=t+273=6730\text{ K}$ .

Соответственно объемный расход воздуха на выходе

$$V_2 = V_1 * T_2 / T_1 = 130000 * 673 / 303 = 288745 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

Ответ: Объем воздуха на входе воздухонагревателя =288745м<sup>3</sup> /ч

Условие задачи: Масса пустого баллона емкостью 50 л. Равна 80 кг. Определить массу баллона после заполнения его кислородом при температуре  $t=20^\circ\text{C}$ . До давления 100 бар.

Для решения мне понадобилась формула

$$m = PV / (RT)$$

Следует перевести единицы измерения:

R-постоянная для кислорода =259,8

T-перевод в Кельвины=20+273,15=293,15

P-100бар=10 Мпа \*10<sup>i</sup>

V=50л=0,05

$$m = 10 * 10^6 * 0,05 / (259,8 * 293,15) = 0,5 / 76160,37 = 6,57$$

Прибавим к первоначальной массе

$$m = 80 + 6,57 = 86,57 \text{ кг.}$$

Ответ: Масса баллона =86,57кг.

### 3. СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Условие задачи: Определить газовую постоянную ,плотность при нормальных условиях и объемный состав смеси, если её массовый состав следующий:

$\text{H}_2=8,4\%$ ,  $\text{CH}_4=48,7\%$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4=6,9\%$ ,  $\text{CO}=17\%$ ,  $\text{CO}_2=7,6\%$ ,  $\text{O}_2=4,7\%$ ,  $\text{N}_2=6,7\%$

Для начала нужно определить газовую постоянную каждого элемента из приложения А ,где:

$\text{H}_2$ -водород=4124,3

$\text{CH}_4$ -метан=519

$\text{C}_2\text{H}_4$ -этилен =297

$\text{CO}$ - окись углерода =296,8

$\text{CO}_2$ -углекислый газ=189

$\text{O}_2$ -кислород =259,8

$\text{N}_2$ -азот=296,8

Находим газовую постоянную смеси  $R_{см}$ = где;

$g_i$ - массовые доли газов, входящих в смесь

$R_i$ - газовые постоянные газов (приложение А)

$$R_{см} = 8,4/100 * 4124,3 + 48,7/100 * 519 + 6,9/100 * 297 + 17/100 * 296,8 + 7,6/100 * 189 + 4,7/100 * 259,8 + 6,7/100 * 296,8 = 0,084 * 4124,3 + 0,487 * 519 + 0,069 * 297 + 0,17 * 296,8 + 0,076 * 189 + 0,047 * 259,8 + 0,067 * 296,8 = 346,4 + 252,8 + 20,5 + 50,5 + 15 + 12,2 + 19,9 = 717,3 \text{ Дж(кгК)}$$

Далее определяем объемные доли компонентов по формуле:

$$r_i = g_i \cdot R_i / R_{см}$$

$$r_{H_2} = g_{H_2} \cdot R_{H_2} / R_{см} = 0,084 \cdot 4124,3 / 717,3 = 0,48$$

$$r_{CH_4} = g_{CH_4} \cdot R_{CH_4} / R_{см} = 0,487 \cdot 519 / 717,3 = 0,34$$

$$r_{CO} = g_{CO} \cdot R_{CO} / R_{см} = 0,17 \cdot 296,8 / 717,3 = 0,07$$

$$r_{C_2H_4} = g_{C_2H_4} \cdot R_{C_2H_4} / R_{см} = 0,069 \cdot 297 / 717,3 = 0,03$$

$$r_{CO_2} = g_{CO_2} \cdot R_{CO_2} / R_{см} = 0,076 \cdot 189 / 717,3 = 0,02$$

$$r_{O_2} = g_{O_2} \cdot R_{O_2} / R_{см} = 0,047 \cdot 259,8 / 717,3 = 0,017$$

$$r_{N_2} = g_{N_2} \cdot R_{N_2} / R_{см} = 0,067 \cdot 296,8 / 717,3 = 0,028$$

Плотность смеси выражается из формулы  $\rho_{см} =$

Где;  $\rho_i$  - плотности газов входящих в смесь

$$\rho_{H_2} = 0,090 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{CH_4} = 0,72 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{CO} = 1,25 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{C_2H_4} = 1,26 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{CO_2} = 1,977 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{O_2} = 1,429 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{N_2} = 1,25 \text{ кг/м}^3$$

(приложение А)

$$\rho_{см} = \rho_{H_2} \cdot r_{H_2} + \rho_{CH_4} \cdot r_{CH_4} + \rho_{CO} \cdot r_{CO} + \rho_{C_2H_4} \cdot r_{C_2H_4} + \rho_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + \rho_{O_2} \cdot r_{O_2} + \rho_{N_2} \cdot r_{N_2}$$
$$= 0,090 \cdot 1,429 + 0,35 \cdot 0,72 + 0,07 \cdot 1,25 + 0,02 \cdot 1,26 + 0,02 \cdot 1,977 + 0,017 \cdot 1,429 + 0,028 \cdot 1,25 = 0,432 + 0,252 + 0,00875 + 0,00252 + 0,03954 + 0,0242 + 0,035 = 0,5 \text{ кг/м}^3$$

Ответ: Газовая постоянная  $R_{см} = 717,3 \text{ Дж/(кгК)}$ , плотность смеси  $\rho_{см} = 0,5 \text{ кг/м}^3$ ,

объемные доли компонентов  $r_{O_2} = 0,017$ ,  $r_{N_2} = 0,028$ ,

$$r_{H_2} = 0,48$$

#### 4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

Условия задачи:

Определить среднюю массовую теплоемкость при постоянном объеме для азота в пределах 200-800°C, считая зависимость теплоемкости нелинейной,

Известно, что средняя мольная теплоемкость азота при постоянном давлении может быть определена по формуле

$$c_{p,m} = 28,7340 + 0,0023488 \cdot t_{cp}$$

Вычислим среднюю мольную теплоемкость азота при постоянном давлении в пределах 200-800°C

$$c_{p,m} = 28,7340 + 0,0023488(200+800)/2 = 29,9084 \text{ кДж/(кмоль*К)};$$

Переведем среднюю мольную теплоемкость азота при постоянном давлении в среднюю массовую теплоемкость при постоянном давлении по следующей формуле:

$$c_p = c_{p,m} / \mu = 29,9084 / 28 = 1,0681 \text{ кДж/(кг*К)}$$

$$\mu = 28 - \text{молекулярная масса азота, кг/кмоль.}$$

Теперь определим среднюю массовую теплоемкость при постоянном объеме, используя формулу перевода:

$$c_v = c_p - R = 1068,1 \text{ Дж/(кг*К)} - 296,8 \text{ Дж/(кг*К)} = 771,3 \text{ Дж/(кг*К)} = 0,7713 \text{ кДж/(кг*К)}$$

Ответ: средняя массовая теплоемкость при постоянном объеме  $c_v = 0,7713 \text{ кДж/(кг*К)}$ .

## 5. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Условия задачи: В сосуд содержащий 5л. воды при температуре  $t=20^{\circ}\text{C}$  помещен электронагреватель мощностью 800Вт. Определить сколько времени потребуется, что бы нагреть воду до  $100^{\circ}\text{C}$ . Потерями тепла сосуда в окружающую среду пренебречь.

$$5 \text{ л} = 5 \text{ дм}^3$$

Масса воды в сосуде будет равна:

$$m = V \cdot \rho = 0,005 \text{ м}^3 \cdot 1000 \text{ кг/м}^3 = 5 \text{ кг.}$$

Найдем количество теплоты, необходимое для нагревания воды от  $20^{\circ}\text{C}$  ( $293 \text{ K}$ ) до  $100^{\circ}\text{C}$  ( $373 \text{ K}$ ):

$$Q = C_v \cdot m \cdot (t_2 - t_1) = 4200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)} \cdot 5 \cdot (373 - 293) = 1\,680\,000 \text{ Дж} = 1680 \text{ кДж.}$$

Время, затраченное на нагревание воды данным электронагревателем вычислим по следующей формуле:

$$T = Q/N = 1\,680\,000/800 = 2100 \text{ с} = 2100/60 = 35 \text{ мин.}$$

Ответ: 35 минут.

## 6. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Условие задачи: Сосуд объемом 60 л заполнен кислородом при давлении 125 бар.

Определить конечное давление кислорода и количество сообщенного ему тепла, если начальная температура кислорода  $10^{\circ}\text{C}$ , а конечная -  $30^{\circ}\text{C}$ . Теплоемкость кислорода считать постоянной, не зависящей от температуры.

Для решения мне понадобилась формула

$$m = PV/(RT)$$

P - давление, переведем в Па:  $125 \text{ бар} = 125 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;

V - объем кислорода, переведем в м<sup>3</sup>:  $60 \text{ л} = 0,06 \text{ м}^3$ ;

R - газовая постоянная для кислорода по таблице равна  $259,8 \text{ Дж/кг}$ ;

T - температура, перевод в Кельвины:  $10 + 273 = 283 \text{ K}$  (начальная температура),

$30 + 273 = 303 \text{ K}$  (конечная температура).

Масса кислорода равна:

$$m = 10,2 \text{ кг};$$

Так как процесс изохорный, из соотношения  $P_1/T_1 = P_2/T_2$ , находим давление в конечном состоянии:

$$P_2 = P_1 \cdot T_2 / T_1 = 125 \cdot 10^5 \cdot 303 / 283 = 134 \cdot 10^5 \text{ Па} = 134 \text{ бар.}$$

Чтобы определить количество подведенного к кислороду тепла, я воспользовалась формулами:

$$Q = m \cdot C_v (T_2 - T_1),$$

$$C_v = R / (k - 1),$$

где k - показатель адиабаты, для кислорода равен 1,4.

$$C_v = 259,8 / (1,4 - 1) = 649,5 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)};$$

$$Q = 10,2 \cdot 649,5 \cdot (303 - 283) = 132,5 \text{ кДж.}$$

Ответ: конечное давление кислорода  $P_2 = 134 \text{ бар}$ , количество сообщенного тепла  $Q = 132,5 \text{ кДж}$ .

Условие задачи: Воздух при давлении 1 бар и температуре  $27^{\circ}\text{C}$  сжимается в компрессоре до давления 35 бар. Определить величину работы, затраченной на

сжатие 100 кг воздуха, если сжатие производится изотермически.

Из формулы  $m = PV/(RT)$  выразим  $V$ :

$$V = m RT/P$$

$R$  для воздуха равна 287 Дж/кг;

$P$  переведем в Па: 1 бар =  $1 \cdot 10^5$  Па; 35 бар =  $35 \cdot 10^5$  Па;

$T$  переведем Кельвины:  $27 + 273 = 300$  К.

Найдем объем воздуха в начальном состоянии:

$$V = 100 \cdot 287 \cdot 300 / (1 \cdot 10^5) = 86 \text{ м}^3;$$

Работа, затраченная на изотермическое сжатие, находится по уравнению:

$$L = P_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} = 1 \cdot 10^5 \cdot 86 \cdot \ln \frac{35}{1} = -305,76 \cdot 10^5 = -30576 \text{ кДж.}$$

Ответ: работа, затраченная на сжатие 100 кг воздуха,  $L = -30576$  кДж.

### 7. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Условие задачи: 1 кг воздуха сжимается от  $P_1 = 1$  бар и  $t_1 = 15^\circ\text{C}$  до  $P_2 = 5$  бар и  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ . Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

Чтобы найти изменение энтропии при постоянной теплоемкости, можно использовать несколько формул, но исходя из начальных данных мы будем использовать следующую формулу:

$$Ds = s_2 - s_1 = C_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Найдем по формуле  $C_p = R \cdot k / (k - 1)$

$R$  для воздуха равна 287 Дж/кг,

$k$  - показатель адиабаты, для воздуха равен 1,4

$$C_p = 287 \cdot 1,4 / 0,4 = 1004,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

Температуру переводим в Кельвины:  $15 + 273 = 288$  К,  $100 + 273 = 373$  К.

Давление переводим в Паскалы: 1 бар =  $1 \cdot 10^5$  Па, 5 бар =  $5 \cdot 10^5$  Па.

$$Ds = 1004,5 \cdot \ln \frac{373}{288} - 287 \cdot \ln \frac{5}{1} = 261,3 - 459,2 = -197,9 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Ответ: изменение энтропии  $Ds = -197,9$  кДж/(кг\*К).

### 8. КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Условие задачи: Определить для цикла, данного в задаче 187, количество подведенного и отведенного тепла, среднее КПД цикла и мощность при расходе воздуха 30 кг/мин.

Задача 187: Определить параметры точек смешанного термического цикла ДВС (см. рис. 6), если  $P_1 = 0,83$  бар,  $t_1 = 57^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\epsilon = 15$ ; степень повышения давления  $\lambda = 1,6$ ; степень предварительного расширения  $\sigma = 1,4$ ; показатель адиабаты  $k = 1,4$ ; рабочим телом является 1 кг сухого воздуха.

1. Найдем количество подведенного тепла, учитывая, что оно складывается из количества подведенного тепла при изохорном процессе 2-3 и изобарном процессе 3-4:

$$q_1 = q'_{12} + q''_{12} = C_v(T_3 - T_2) + C_p(T_4 - T_3);$$

Найдем  $C_v$  и  $C_p$ :

$$C_v = R / (k - 1) = 287 / (1,4 - 1) = 717,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$C_p = R \cdot k / (k - 1) = 287 \cdot 1,4 / (1,4 - 1) = 1004,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K});$$

Найдем  $T_2$  из адиабатного процесса 1-2:

$$T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{\frac{k-1}{k}} = 2,95;$$

$$T_2 = 2,95 * (57+273) = 974 \text{ К.}$$

Найдем  $T_3$  из изохорного процесса 2-3:

$$P_2/T_2 = P_3/T_3, T_3 = T_2 * P_3 / P_2,$$

где отношение давлений в точках 3 и 2 есть степень повышения давления  $\lambda = 1,6$ .

Следовательно,

$$T_3 = T_2 * \lambda = 974 * 1,6 = 1558 \text{ К.}$$

Найдем  $T_4$  из изобарного процесса 3-4:

$$V_4/T_4 = V_3/T_3;$$

$$T_4 = T_3 * V_4 / V_3,$$

где отношение объемов в точках 4 и 3 есть степень предварительного расширения  $\epsilon = 1,4$ .

Следовательно,

$$T_4 = 1558 * 1,4 = 2181 \text{ К.}$$

Подставляем найденные значения и находим количество подведенного тепла  $q_1$ :

$$q_1 = 717,5 * (1558 - 974) + 1004,5 * (2181 - 1558) = 419020 + 625803 = 1044823 \text{ Дж} = 1045 \text{ кДж.}$$

2. Найдем количество отведенного тепла  $q_2$ , которое отводится во время изохорного процесса 5-1:

$$q_2 = C_v(T_1 - T_5)$$

Найдем  $T_5$  из адиабатного процесса 4-5:

$$= (;$$

$$V_5 = V_1 = = 287 * 330 / (0,83 * 105) = 1,14 \text{ м}^3.$$

Исходя из схемы процесса. Найдем  $V_4$ .

$$V_4 = V_3 * \epsilon;$$

$$V_3 = V_2, V_2 = V_1 / \lambda = 1,14 / 1,6 = 0,076 \text{ м}^3.$$

$$V_4 = 0,076 * 1,4 = 0,1064 \text{ м}^3.$$

Рассчитаем  $T_5$ :

$$T_5 = T_4 * = 2181 * = 845 \text{ К.}$$

Подставляем найденные значения и находим количество отведенного тепла  $q_2$ :

$$q_2 = 717,5 * (303 - 845) = -369512 \text{ Дж} = -369,5 \text{ кДж. (знак минус показывает, что тепло отведенное)}$$

3. Найдем среднее КПД цикла, используя следующую формулу:

$$= 1 - * ;$$

$$= 1 - * = 1 - 0,3385 * = 0,646 = 65\%.$$

4. Найдем мощность при расходе воздуха 30 кг/мин:

$$N = ;$$

Переведем  $Q$  в кг/ч:  $30 * 60 = 1800 \text{ кг/ч}$ ;

Найдем  $L$  (работа цикла):

$$L = q_1 - q_2 = 1045 - 369,5 = 676 \text{ кДж.}$$

$$N = = 338 \text{ кВт.}$$

Ответ: количество подведенного тепла  $q_1 = 1045 \text{ кДж}$ , количество отведенного тепла  $q_2 = 369,5 \text{ кДж}$ , среднее КПД цикла = 65%, мощность  $N = 338 \text{ кВт}$ .

## 9. ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ. ДРОССЕЛИРОВАНИЕ

Условие задачи: Водяной пар давлением 20 бар с температурой 400С при истечении из сопла расширяется по адиабате до давления 2 бар. Определить площадь минимального и выходного сечения сопла, а также скорости истечения в этих соплах, если расход пара 4 кг/с. Процесс расширения пара в сопле принять адиабатным.

1. Найдем площадь минимального сечения сопла по формуле:

$$F_{\min} = G_{\max} \cdot v_{\text{кр}} / \text{щкр};$$

Удельный объем водяного пара в минимальном сечении  $v_{\text{кр}}$  находим из соотношения параметров адиабатного процесса:

= ;

Найдем  $v_1$ , предварительно переведем основные параметры:

R - газовая постоянная для водяного пара 481,6 Дж/кг;

T - переведем в Кельвины: 400+273 = 673К;

P - переведем в Паскалы: 20 бар = 20\*105Па.

$$v_1 = R \cdot T_1 / P_1 = 481,6 \cdot 673 / (20 \cdot 105) = 0,16 \text{ м}^3;$$

Теперь найдем соотношение  $v = P_2 / P_1$ :

$v = 2/20 = 0,1 < 0,546$  ( $v_{\text{кр}}$  для водяного пара = 0,546), следовательно, теоретическая скорость истечения газа будет равна критической  $\text{щкр}$ .

$$v_{\text{кр}} = P_{\text{кр}} / P_1$$

$$P_{\text{кр}} = 0,546 \cdot P_1 = 0,546 \cdot 20 \cdot 105 = 10,92 \text{ бар.}$$

$$v_{\text{кр}} = v_1 \cdot v = 0,16 \cdot v = 0,246 \text{ м}^3;$$

Найдем теоретическую скорость истечения газа из сопла минимального сечения по следующей формуле:

$$\text{щкр} = \dots = 614,9 \text{ м/с.}$$

Найдем площадь минимального сечения сопла

$$F_{\min} = 4 \cdot 0,246 / 615 = 0,0016 \text{ м}^2 = 16 \text{ см}^2;$$

2. Определим площадь выходного сечения по формуле:

$$F_{\max} = G \cdot v_2 / \text{щ};$$

$$v_2 = v_1 \cdot v^2;$$

$$v_2 = 0,16 \cdot v^2 = 0,83 \text{ м}^3;$$

Определим скорость истечения водяного пара из выходного сопла по формуле:

$$\text{щ} = \dots = 1040 \text{ м/с};$$

Найдем  $F_{\max}$ :

$$F_{\max} = 4 \cdot 0,83 / 1040 = 0,0032 \text{ м}^2 = 32 \text{ см}^2.$$

Ответ: площадь минимального сечения сопла  $F_{\min} = 16 \text{ см}^2$ , площадь выходного сечения сопла  $F_{\max} = 32 \text{ см}^2$ , скорость истечения в  $F_{\min}$   $\text{щкр} = 614,9 \text{ м/с}$ , скорость истечения в  $F_{\max}$   $\text{щ} = 1040 \text{ м/с}$ .

## 10. ПАРЫ ВОДЯНОЙ ПАР

Условие задачи: 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?

Переведем давление в Паскалы: 20 ат = 20\*105 Па.

Отношение массы воды к массе пара выглядит следующим образом:

= ;

Учитывая, что пар и вода занимают каждый по половине объема сосуда, то объем можно сократить в верхней и нижней части формулы, остается:

= ;

Плотность сухой насыщенный пар и вода в состоянии насыщения можно определить по таблицам для водяного пара и воды, зная их давление - 2000 кПа. (приложение Б)

Плотность сухого насыщенного пара будет равна обратному удельному объему  $v$ ?:

$\rho_{\text{пара}} = 1/v = 1/0,09953 = 10 \text{ кг/м}^3$ ;

Плотность воды в состоянии насыщения будет равна обратному удельному объему  $v$ ?:

$\rho_{\text{воды}} = 1/v = 1/0,0011766 = 850 \text{ кг/м}^3$ ;

= = 85 раз.

Ответ: в 85 раз.

## 11. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Условие задачи: Температура влажного воздуха  $t = 25^\circ\text{C}$ , а температура точки росы  $t_p = 20^\circ\text{C}$ . Определить относительную влажность воздуха, энтальпию, абсолютную влажность воздуха, влагосодержание, парциальное давление водяного пара. При решении задачи использовать  $h$ - $d$ -диаграмму.

Используя  $h$ - $d$ -диаграмму, (приложение В) находим:

относительную влажность воздуха  $\varphi = 75\%$ ;

энтальпию  $h = 62 \text{ кДж/кг}$ ;

влагосодержание  $d = 14,5 \text{ г/кг}$ ;

парциальное давление водяного пара  $P = 2,25 \text{ кПа} = 2,25 \cdot 1000/133 = 17 \text{ мм рт.ст.}$

абсолютную влажность воздуха определим следующим образом:

Абсолютная влажность - количество водяного пара в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха, численно равное плотности пара ( $\rho_{\text{п}}$ ) при его парциальном давлении ( $P_{\text{п}}$ ).

По таблицам определим удельный объем водяного пара при давлении  $P_{\text{п}} = 2,25 \text{ кПа}$  (приложение Д)

$v = 56,926 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$\rho_{\text{п}} = 1/56,926 = 0,01756 \text{ кг/м}^3 = 17,56 \text{ г/м}^3$ .

Ответ:  $\varphi = 75\%$ ;  $h = 62 \text{ кДж/кг}$ ;  $14,5 \text{ г/кг}$ ;  $P = 17 \text{ мм рт.ст.}$ ,  $\rho_{\text{п}} = 17,56 \text{ г/м}^3$ .

газ идеальный энтропия термодинамический

Приложение А

Физические постоянные некоторых газов

Газ

Химическая формула



Относительная молекулярная масса, кг/кмоль

Газовая постоянная, Дж/кг

Плотность газа при н . у . , кг /м з

Кислород

O<sub>2</sub>

32

259,8

1,429

Водород

H<sub>2</sub>

2

4124,3

0,090

Азот

N<sub>2</sub>

28

296,8

1,250

Оксид углерода

CO

28

296,8

1,250

Воздух

--

28,96

287

1,293

Углекислый газ

44

189

1,977

Водяной пар

H<sub>2</sub>O

18

481,6

0,804

Гелий

He

4

2077,2

0,178

Аргон

Ar

40

208,2

1,784

Аммиак

$\text{N H}_3$

17

488,2

0,771

Ацетилен

$\text{C}_2\text{H}_2$

26

320

1,171

Бензол

$\text{C}_6\text{H}_6$

78,1

106

-

Бутан

C4H10

58,1

143

2,673

Оксид азота

NO2

46

181

-

Оксид серы

SO<sub>2</sub>

64,1

130

2,93

Метан

CH<sub>4</sub>

16

519

0,72

Пропан

СзНв

44,1

189

2,02

Пропилен

СзНб

42,1

198

1,91

Сероводород

H<sub>2</sub>S

34,1



244

1,54

Хлор

70,9

117

3,22

Этилен

$C_2H_4$

28,1

297

1,26

Этан

$C_2H_6$

30,1

277

1,36

Приложение Б

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлению)

$p$

$t_S$

$v?$

$v?$

$h?$

h?

r

s?

s?

1600

201,37

0,0011586

0,12368

858,6

2792,2

1933,6

2,3436

6,4187

1650

202,85

0,0011610

0,12004

865,3

2793,0

1927,7

2,3576

6,4075

1700

204,30

0,0011633

0,11661

871,8

2793,8

1922,0

2,3712

6,3967

1750

205,72

0,0011656

0,11338

878,3

2794,5

1916,2

2,3846

6,3862

1800

207,10

0,0011678

0,11031

884,6

2795,1

1910,5

2,3976

6,3759

1900

209,79

0,0011722

0,10464

896,8

2796,4

1899,6

2,4227

6,3561

1950

211,09

0,0011744

0,10202

902,7

2796,9

1894,2

2,4349

6,3466

2000

212,37

0,0011766

0,09953

908,6

2797,4

1888,8

2,4468

6,3373

Приложение В  
hd-диаграмма  
Приложение Г



## Удельный объем водяного пара

$p$

$t_S$

$v?$

$v?$

$h?$

$h?$

кПа

°C

м<sup>3</sup>/кг

м<sup>3</sup>/кг

кДж/кг

кДж/кг

1

13,034

0,0010006

87,982

54,71

2525,0

1,5

17,511

0,0010012

67,006

73,45

2533,2

2,0

19,029

0,0010015

61,229

79,80

2535,9

2,2

20,431

0,0010018

56,392

85,67

2538,5

2,4

21,094

0,0010020

54,256

88,44

2539,7

2,5

21,735

0,0010021

52,282

91,12

2540,9

#### Список литературы

1. Базаров И.П. Термодинамика. - М.: Высшая школа, 1991 г.
2. Гленсдорф П. , Пригожин И. Термодинамическая теория структуры , устойчивости и флуктуаций. - М.: Мир, 1973 г.
3. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. - М.: Иностранная литература , 1960 г.
4. Кириллин В.А., Сычев В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. -М.: Энергия, 1980г.
5. Беляев Н.М. Термодинамика Высшая шк. 1987г.
6. Андрущенко А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов. -М.: Высш. шк, 1975.
7. Э.И Туйго. Техническая термодинамика. .: -М 1974г.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1983г.
9. Михеев М.А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия 1977г...