

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Орский гуманитарно-технологический институт (филиал)
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»**

О. С. Ануфриенко

ЗАДАЧИ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ

*Утверждено редакционно-издательским советом
Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ОГУ
в качестве практикума*



Орск2011

УДК 621.036
ББК 31.31
А73

Научный редактор

Белашов В. И., доктор физико-математических наук, профессор
ГОУ ВПО «Казанский энергетический университет»

Рецензенты:

Братковский Е. В., кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой металлургических технологий Новотроицкого филиала
ФГОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»;

Чурсин В. Б., кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры общих и профессиональных дисциплин
ГОУ ВПО «Самарский государственный университет
путей сообщения» (филиал в г. Орске)

А73 Ануфриенко, О. С. Задачи по технической термодинамике : практикум / О. С. Ануфриенко. – Орск : Издательство Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ОГУ, 2011. – 91 с. – ISBN 978-5-8424-0583-1.

Настоящий практикум составлен на основании программ курсов «Теоретические основы теплотехники», «Теплотехника», «Перенос энергии и массы, основы теплотехники и аэродинамики», читаемых в Орском гуманитарно-технологическом институте (филиале) ОГУ студентам механико-технологического факультета.

ISBN 978-5-8424-0583-1

© Ануфриенко О. С., 2011

© Издательство Орского гуманитарно-технологического института (филиала) ОГУ, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ТЕЛА	6
1.1 Примеры решения задач.....	6
1.2 Задачи для самостоятельного решения.....	8
2 ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ	10
2.1 Примеры решения задач.....	10
2.2 Задачи для самостоятельного решения.....	11
3 ГАЗОВЫЕ СМЕСИ.....	13
3.1 Примеры решения задач.....	13
3.2 Задачи для самостоятельного решения.....	14
4 ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ.....	15
4.1 Примеры решения задач.....	15
4.2 Задачи для самостоятельного решения.....	18
5 ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ.....	19
5.1 Примеры решения задач.....	19
5.2 Задачи для самостоятельного решения.....	21
6 ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПРОЦЕССЫ	23
6.1 Изохорный процесс.....	23
6.1.1 Примеры решения задач.....	23
6.1.2 Задачи для самостоятельного решения.....	24
6.2 Изобарный процесс	25
6.2.1 Примеры решения задач.....	25
6.2.2 Задачи для самостоятельного решения.....	27
6.3 Изотермический процесс.....	28
6.3.1 Примеры решения задач.....	28
6.3.2 Задачи для самостоятельного решения.....	29
6.4 Адиабатный процесс.....	30
6.4.1 Примеры решения задач.....	30
6.4.2 Задачи для самостоятельного решения.....	31
6.5 Политропный процесс	32
6.5.1 Примеры решения задач.....	32
6.5.2 Задачи для самостоятельного решения.....	36
7 ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ	37
7.1 Примеры решения задач.....	37
7.2 Задачи для самостоятельного решения.....	41
8 КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ	42
8.1 Примеры решения задач.....	42

8.2 Задачи для самостоятельного решения.....	48
9 ВОДЯНОЙ ПАР	50
9.1 Примеры решения задач.....	50
9.2 Задачи для самостоятельного решения.....	59
10 ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ.....	61
10.1 Примеры решения задач.....	61
10.2 Задачи для самостоятельного решения.....	67
11 ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК.....	68
11.1 Примеры решения задач.....	68
11.2 Задачи для самостоятельного решения.....	73
12 ЦИКЛЫ ХОЛДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК.....	75
12.1 Примеры решения задач.....	75
12.2 Задачи для самостоятельного решения.....	79
13 ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ.....	81
13.1 Примеры решения задач.....	81
13.2 Задачи для самостоятельного решения.....	83
14 ТЕРМОДИНАМИКА ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	84
14.1 Примеры решения задач.....	84
14.2 Задачи для самостоятельного решения.....	88
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	90

ВВЕДЕНИЕ

В практикуме материалы по решению задач по теоретическим основам теплотехники предлагаются к изучению первой части одноименного курса, читаемого для студентов теплоэнергетических специальностей в Орском гуманитарно-технологическом институте (филиале) ОГУ. Может быть использовано также при изучении базовых курсов «Перенос энергии и массы» для материаловедов и «Теплотехника» для студентов, обучающихся по программам специальностей «Автомобили и автомобильное хозяйство».

Структурно практикум составлен с целью использования на практических занятиях и организации самостоятельной работы студентов, изучающих первый и второй закон термодинамики, идеальные и реальные газы и основные газовые законы, циклы паросиловых и холодильных установок.

В практикуме предлагается разбор и подробный анализ классических задач теплотехники с целью освоения методики расчета процессов, происходящих в тепломассообменном оборудовании и двигателях внутреннего сгорания. Успешное освоение предлагаемых подходов демонстрируется при самостоятельном решении студентом подобных задач по тем же темам. Практикум имеет мультимедийное сопровождение.

1 ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ТЕЛА

1.1 Примеры решения задач

1.1. Определить абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает $p = 1,3$ бар, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет $B = 680$ мм при $t = 25^\circ\text{C}$.

Решение

По формуле:

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{ман}} + B.$$

Показание барометра получено при температуре ртути $t = 25^\circ\text{C}$. Это показание необходимо привести к 0°C .

$$B = 680 - (4,31 * 680)/1000 = 680 - 2,93 = 677,07 \text{ мм рт. ст.}$$

Тот же результат будем иметь, если воспользуемся уравнением:

$$B_0 = B (1 - 0,000172 t) = 680 * 0,9957 = 677,08 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютное давление пара в котле:

$$p_{\text{абс}} = 1,3 + 677,07/ 750 = 1,3 + 0,9 = 2,2 \text{ бар.}$$

1.2. Ртутный вакуумметр, присоединенный к сосуду (рис. 1), показывает разрежение $h = 420$ мм при температуре ртути в вакуумметре $t = 20^\circ\text{C}$. Давление атмосферы по ртутному барометру $B = 768$ мм при температуре $t = 18^\circ\text{C}$. Определить абсолютное давление в сосуде.

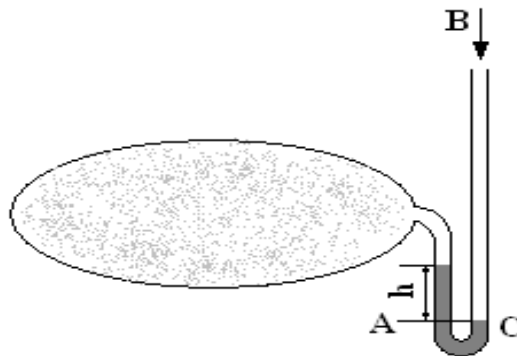


Рис. 1

Решение

Таблица 1

Температура столба ртути в °С.	0	5	10	15	20	25	30
Поправка на 1000 мм	0,00	0,87	1,73	2,59	3,45	4,31	5,17

Пользуясь данными таблицы 1, приводим показания вакуумметра и барометра к температуре ртути 0°С.

Тогда разрежение в сосуде, приведенное к нулю,

$$h = 420 - 3,45 * 0,420 = 418,5 \text{ мм рт. ст.}$$

а барометрическое давление, приведенное к нулю,

$$B = 768 - [(2,59 + (3,45 - 2,59)3/5)] * 0,768 = 768 - 2,4 = 765,6 \text{ мм рт. ст.}$$

Абсолютное давление в сосуде:

$$p = (765,6 - 418,5) / 750 = 347,1 / 750 = 0,46 \text{ бар} = 46 * 10^3 \text{ н/м}^3.$$

1.3. На высоте $H = 2000$ м над уровнем моря давление воздуха $p_1 = 0,79$ бар, на высоте 5000 м давление $p_2 = 0,54$ бар и на высоте $10\,000$ м давление $p_3 = 0,29$ бар. По этим данным, а также принимая, что на уровне моря давление воздуха $p_0 = 1,013$ бар, составить приближенное интерполяционное уравнение вида:

$$p = a + bH + cH^2 + dH^3,$$

дающее зависимость давления воздуха от высоты над уровнем моря.

Решение

Составление интерполяционного уравнения вида $p = a + bH + cH^2 + dH^3$ сводится к нахождению постоянных a, b, c, d . Последние могут быть найдены на основании заданных четырех точек. Для этого составляем четыре уравнения:

$$\text{Для } H = 0 \quad 1,013 = a;$$

$$H = 2 \text{ км} \quad 0,79 = a + 2b + 4c + 8d;$$

$$H = 5 \text{ км} \quad 0,54 = a + 5b + 25c + 125d;$$

$$H = 10 \text{ км } 0,29 = a + 10b + 100c + 1000d.$$

Решая эту систему уравнений, получаем:

$$a = 1,013; b = - 0,1243; c = 0,0067; d = - 0,000147.$$

Следовательно, приближенное уравнение, выражающее зависимость давления воздуха от высоты над уровнем моря, найденное на основании четырех заданных точек, имеет следующий вид:

$$p = 1,013 - 0,1243H + 0,0067H^2 - 0,000147H^3.$$

Значения H в данном уравнении выражены в км.

1.2 Задачи для самостоятельного решения

1.1. В сосуде объемом $0,9 \text{ м}^3$ находится $1,5 \text{ кг}$ окиси углерода.

Определить удельный объем и плотность окиси углерода при указанных условиях.

Отв. $v = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\rho = 1,67 \text{ кг/м}^3$.

1.2. Разрежение в газоходе парового котла измеряется тягомером с наклонной трубкой (рис. 1). Угол наклона трубки $\alpha = 30^\circ$. Длина столба воды, отсчитанная по шкале, $l = 160 \text{ мм}$. Определить абсолютное давление газов, если показание ртутного барометра $B = 740 \text{ мм}$ (приведено к 0°C).

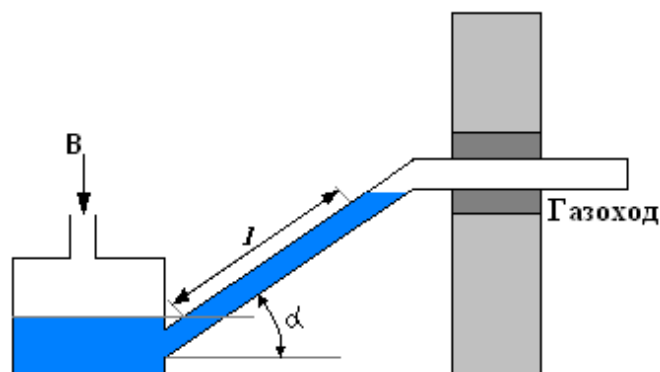


Рис. 2

Отв. $p = 734,1$ мм рт. ст.

1.3. В трубке вакуумметра высота столбика ртути составляет 570 мм при температуре ртути 20°C . Над ртутью находится столбик воды высотой 37 мм. Барометрическое давление воздуха 728 мм рт. ст. при 15°C . Определить абсолютное давление в сосуде.

Отв. $p = 155,4$ мм рт. ст.

1.4. Пользуясь формулой $p = 1,013 - 0,1243H + 0,0067H^2 - 0,000147H^3$, определить давление воздуха на высоте 7000 м над уровнем моря.

Отв. $p = 0,42$ бар.

1.5. Водяной пар имеет давление $p = 185$ ат. и температуру $t = 550^{\circ}\text{C}$. Перевести давление в lb/in^2 , а температуру – в $^{\circ}\text{F}$.

Отв. $p = 2631 \text{ lb/in}^2$, $t = 1022^{\circ}\text{F}$.

2 ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

2.1 Примеры решения задач

2.1. Баллон с кислородом емкостью 20 л находится под давлением 10 Мн/м^2 при 15°C . После израсходования части кислорода давление понизилось до $7,6 \text{ Мн/м}^2$, а температура упала до 10°C . Определить массу израсходованного кислорода.

Решение

Из характеристического уравнения

$$pV = MRT$$

имеем

$$M = pV/RT.$$

Следовательно, до расходования кислорода масса его составляла

$$M_1 = (10 * 10^6 * 0,02) / (259,8 * 288) = 2,673 \text{ кг.}$$

а после израсходования

$$M_2 = (7,6 * 10^6 * 0,02) / (259,8 * 283) = 2,067 \text{ кг.}$$

Таким образом, расход кислорода:

$$2,673 - 2,067 = 0,606 \text{ кг.}$$

2.2. Определить подъемную силу воздушного шара, наполненного водородом, если объем его на поверхности земли равен 1 м^3 при давлении $p = 750 \text{ мм рт. ст.}$ и температуре $t = 15^\circ\text{C}$.

Решение

На поверхности земли подъемная сила воздушного шара, наполненного водородом, равна разности сил тяжести (весов) воздуха и водорода в объеме шара:

$$G = G_{\text{возд}} - G_{\text{H}_2} = M_{\text{возд}} g - M_{\text{H}_2} g = gV (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}_2}),$$

где $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ – ускорение силы тяжести на уровне земли.

Значения плотностей воздуха и водорода могут быть определены из уравнения состояния:

$$p v = R T.$$

Откуда

$$1/v = \rho = p/R T.$$

Значения газовых постоянных могут быть легко вычислены или взяты из специальной таблицы:

$$R_{\text{возд}} = 287 \text{ Дж / (кг*град)}; R_{\text{H}_2} = 4124 \text{ Дж / (кг*град)}.$$

Так как давление водорода и воздуха равно 750 мм от. ст., то есть 1 бар, то

$$\begin{aligned} \rho_{\text{возд}} &= 1 \cdot 10^5 / (287 \cdot 288) = 1,210 \text{ кг/м}^3; \\ \rho_{\text{H}_2} &= 1 \cdot 10^5 / (4124 \cdot 288) = 0,084 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Следовательно, подъемная сила шара

$$\Delta G = g V (\rho_{\text{возд}} - \rho_{\text{H}_2}) = 9,81 \cdot 1(1,210 - 0,084) = 11,1 \text{ н.}$$

2.2 Задачи для самостоятельного решения

2.1. Определить плотность и удельный объем двуокиси углерода (CO_2) при нормальных условиях.

Отв. $\rho_{\text{H}} = 1,964 \text{ кг/м}^3$; $v_{\text{H}} = 0,509 \text{ м}^3/\text{кг}$.

2.2. В воздухоподогреватель парового котла подается вентилятором $130000 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха при температуре 30°C . Определить объемный расход воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если нагрев его производится до 400°C при постоянном давлении.

Отв. $V = 288 \text{ 700 м}^3/\text{ч}$.

2.3 В цилиндре диаметром 60 см содержится $0,41 \text{ м}^3$ воздуха при $p = 2,5$ бар и $t_1 = 35^\circ\text{C}$. До какой температуры должен нагреваться воздух при постоянном давлении, чтобы движущийся без трения поршень поднялся на 40 см?

Отв. $t_2 = 117,6^\circ\text{C}$.

2.4. Резервуар объемом 4 м^3 заполнен углекислым газом. Найти массу и силу тяжести (вес) газа в резервуаре, если избыточное давление газа $p = 0,4$ бар, температура его $t = 80^\circ\text{C}$, а барометрическое давление воздуха $B = 780$ мм рт. ст.

Отв. $M = 8,64$ кг; $G = 84,8$ н.

2.5. Сосуд емкостью $V = 10 \text{ м}^3$ заполнен 25 кг углекислоты. Определить абсолютное давление в сосуде, если температура в нем $t = 27^\circ\text{C}$.

Отв. $p = 1,417$ бар.

2.6. Определить необходимый объем аэростата, наполненного водородом, если подъемная сила, которую он должен иметь на максимальной высоте $H = 7000$ м, равна 39 240 н. Параметры воздуха на указанной высоте принять равными: $p = 0,41$ бар, $t = - 30^\circ\text{C}$.

На сколько уменьшится подъемная сила аэростата при заполнении его гелием? Чему равен объем аэростата V_2 на поверхности земли при давлении $p = 0,981$ бар и температуре $t = 30^\circ\text{C}$?

Отв. $V_1 = 7311 \text{ м}^3$; $\Delta G = - 177$ н; $V_2 = 3738 \text{ м}^3$.

3 ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

3.1 Примеры решения задач

3.1. Атмосферный воздух имеет примерно следующий массовый состав:

$$m(\text{O}_2) = 23,2\%; \quad m(\text{N}_2) = 76,8\%.$$

Определить объемный состав воздуха, его газовую постоянную, кажущуюся молекулярную массу и парциальные давления кислорода и азота, если давление воздуха по барометру $B = 760$ мм рт. ст.

Решение

$$r(\text{O}_2) = (m(\text{O}_2)/\mu(\text{O}_2)) / (m(\text{O}_2)/\mu(\text{O}_2) + m(\text{N}_2)/\mu(\text{N}_2)) = (23,2/32) / (23,2/32 + 76,8/28,02) = 0,21$$

$$r(\text{N}_2) = (m(\text{N}_2)/\mu(\text{N}_2)) / (m(\text{O}_2)/\mu(\text{O}_2) + m(\text{N}_2)/\mu(\text{N}_2)) = (76,8/28,02) / (23,2/32 + 76,8/28,02) = 0,79$$

Газовая постоянная воздуха определяется по уравнению:

$$R_{\text{см}} = \sum m_i R_i = m(\text{O}_2)R(\text{O}_2) + m(\text{N}_2)R(\text{N}_2) = 0,232 \cdot 260 + 0,768 \cdot 295 = 287 \text{ дж/(кг} \cdot \text{град)}$$

Кажущаяся молекулярная масса смеси определяется из уравнения:

$$\mu_{\text{см}} = \sum \mu_i r_i = \mu(\text{O}_2) r(\text{O}_2) + \mu(\text{N}_2) r(\text{N}_2) = 0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28,02 = 28,9$$

или из уравнения :

$$R_{\text{см}} = 8314 / \mu_{\text{см}}.$$

Отсюда

$$\mu_{\text{см}} = 8314 / R_{\text{см}} = 8314 / 287 = 28,9.$$

Парциальные давления определяем из уравнения:

$$p_i = r_i p.$$

Следовательно,

$$p(\text{O}_2) = r(\text{O}_2)p = 0,21 \cdot 760 = 159,4 \text{ мм рт. ст.};$$

$$p(\text{N}_2) = r(\text{N}_2)p = 0,79 \cdot 760 = 600,6 \text{ мм рт. ст.}$$

3.2. Смесь газов состоит из водорода и окиси углерода. Массовая доля водорода $m(\text{H}_2) = 6,67\%$.

Определить газовую постоянную смеси и ее удельный объем при нормальных условиях.

Решение

Из уравнения

$$R_{\text{см}} = \sum m_i R_i = m_1 R_1 + m_2 R_2 = 0,0667 \cdot 4124 + 0,9333 \cdot 296,8 = 552 \text{ дж/(кг*град)}.$$

Удельный объем газовой смеси найдем из характеристического уравнения:

$$pv = RT$$

$$v_{\text{н}} = RT_{\text{н}} / p_{\text{н}} = (552 \cdot 273) / (760 \cdot 10^5 / 750) = 1,49 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3.2 Задачи для самостоятельного решения

3.1. Объемный состав сухих продуктов сгорания топлива (не содержащих водяных паров) следующий: $\text{CO}_2 = 12,3\%$; $\text{O}_2 = 7,2\%$; $\text{N}_2 = 80,5\%$. Найти кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную, а также плотность и удельный объем продуктов сгорания при $B = 750 \text{ мм рт. ст.}$ и $t = 800^\circ\text{C}$.

Отв. $\mu_{\text{см}} = 30,3$; $R_{\text{см}} = 274 \text{ дж/(кг*град)}$; $v = 2,94 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\rho_{\text{см}} = 0,34 \text{ кг/м}^3$.

3.2. Генераторный газ состоит из следующих объемных частей: $\text{H}_2 = 18\%$; $\text{CO} = 24\%$; $\text{CO}_2 = 6\%$; $\text{N}_2 = 52\%$. Определить газовую постоянную генераторного газа и массовый состав входящих в смесь газов.

Отв. $R_{\text{см}} = 342 \text{ дж/(кг*град)}$; $m(\text{C}_2) = 10,86\%$; $m(\text{N}_2) = 60,03\%$; $m(\text{H}_2) = 1,48\%$; $m(\text{CO}) = 27,63\%$.

4 ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

4.1 Примеры решения задач

Таблица 2

Газы	μc_v	μc_p	μc_v	μc_p
	в кДж/ (кмоль*град)		в ккал/ (кмоль*град)	
Одноатомные	12,56	20,93	3	5
Двухатомные	20,93	29,31	5	7
Трех- и многоатомные	29,31	37,68	7	9

4.1. Определить значение объемной теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая $c = \text{const}$.

Решение

По таблице 2 для двухатомных газов:

$$\begin{aligned}\mu c_v &= 20,93 \text{ кДж/ (кмоль*град)}; \\ \mu c_p &= 29,31 \text{ кДж/ (кмоль*град)}.\end{aligned}$$

Следовательно, для кислорода (и любого двухатомного газа):

$$\begin{aligned}c'_v &= \mu c_v / 22,4 = 20,93 / 22,4 = 0,934 \text{ кДж/ (м}^3\text{*град)} \\ c'_p &= \mu c_p / 22,4 = 29,31 / 22,4 = 1,308 \text{ кДж/ (м}^3\text{*град)}\end{aligned}$$

4.2. Вычислить среднюю массовую и среднюю объемную теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме для интервала температур 0-1200°C, если известно, что $(\mu c_{pm})_0^{1200}$ для окиси углерода равно 32,192 кДж/ (кмоль*град).

Решение

$$\begin{aligned}(\mu c_v)_0^{1200} &= 32,192 - 8,314 = 23,877 \text{ кДж/ (кмоль*град)}; 23,877 \\ (c_{vm})_0^{1200} &= (\mu c_v)_0^{1200} / 28 = 23,877 / 28 = 0,8528 \text{ кДж/ (кг*град)} \\ (c'_{vm})_0^{1200} &= (\mu c_v)_0^{1200} / 22,4 = 23,877 / 22,4 = 1,0659 \text{ кДж/ (м}^3\text{*град)}\end{aligned}$$

4.3. Вычислить среднюю теплоемкость c_{pm} для воздуха при постоянном давлении в пределах 200-800°C [кДж/ (кг*град)], считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Решение

По уравнениям

$$c_m = q / (t_2 - t_1) \text{ и } q_p = c_{pm2}t_2 - c_{pm1}t_1$$
$$(c_{pm})_{t_1}^{t_2} = (c_{pm2}t_2 - c_{pm1}t_1) / (t_2 - t_1)$$

Из таблицы «Теплоемкость воздуха» получаем:

$$(c_{pm})_0^{800} = 1,0710 \text{ кдж/ (кг*град)}$$
$$(c_{pm})_0^{200} = 1,0115 \text{ кдж/ (кг*град)}$$

Отсюда

$$(c_{pm})_{200}^{800} = (1,0710*800 - 1,0115*200) / (800 - 200) = 1,091 \text{ кдж/ (кг*град)}$$

4.4. Опытным путем найдены следующие значения истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении.

Для 0°C $\mu_{c_p} = 29,2741 \text{ кдж/ (кмоль*град)}$.

Для 500°C $\mu_{c_p} = 33,5488 \text{ кдж/ (кмоль*град)}$.

Для 1000°C $\mu_{c_p} = 35,9144 \text{ кдж/ (кмоль*град)}$.

По этим данным составить приближенное интерполяционное уравнение вида:

$$\mu_{c_p} = a + bt + dt^2,$$

дающее зависимость истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении от температуры.

Решение

Составление интерполяционного уравнения вида

$$\mu_{c_p} = a + bt + dt^2$$

сводится к нахождению постоянных a , b и d . Последние могут быть найдены на основании трех заданных точек. Для этого составляем три уравнения:

для 0°C $29,2741 = a;$

для 500°C $33,5488 = a + 5 \cdot 10^2 b + 25 \cdot 10^4 d$;

для 1000°C $35,9144 = a + 10^3 b + 10^6 d$.

Решая эту систему уравнений, получаем:

$$a = 29,2741; b = 0,010459; d = - 0,000003818.$$

Следовательно, приближенное уравнение, выражающее температурную зависимость истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении, имеет следующий вид:

$$\mu_{c_p} = 29,2741 + 0,010459t - 0,000003818t^2.$$

4.5. В сосуде объемом 300 л находится кислород при давлении $p_1 = 2$ бар и температуре $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$.

Какое количество тепла необходимо подвести, чтобы температура кислорода повысилась до $t_2 = 300^{\circ}\text{C}$? Какое давление установится при этом в сосуде? Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

Решение

Количество тепла, сообщаемое газу при $v = \text{const}$, равно

$$Q_v = V_n (c'_{v m2} t_2 - c'_{v m1} t_1),$$

где V_n – объем газа, заключенного в сосуде, приведенного к нормальным условиям. Величина V_n определяется по уравнению:

$$pV/T = p_n V_n / T_n.$$

Следовательно,

$$V_n = pVT_n / T_n p_n = (2 \cdot 0,3 \cdot 273) / (1,013 \cdot 293) = 0,552 \text{ м}^3.$$

Значения теплоемкостей определяем по специальной таблице.

$$Q_v = 0,552 (0,9852 \cdot 300 - 0,9374 \cdot 20) = 0,552 \cdot 276,8 = 152,8 \text{ кДж}.$$

Конечное давление можно определить, если воспользоваться характеристическими уравнениями для начального и конечного состояний кислорода:

$$v p_1 = R T_1, v p_2 = R T_2.$$

Следовательно,

$$p_2/p_1 = T_2/T_1; p_2 = p_1 T_2/T_1 = 2 \cdot 573 / 293 = 3,9 \text{ бар.}$$

4.2 Задачи для самостоятельного решения

4.1. Найти среднюю теплоемкость c_{pm} и c'_{vm} в пределах от $t_1 = 200^\circ\text{C}$ до $t_2 = 800^\circ\text{C}$ для CO , считая зависимость теплоемкости от температуры линейной. Ответ дать в кдж/(кг*град) и ккал/(кг*град).

Отв. $c_{pm} = 1,1262 \text{ кдж/(кг*град)} = 0,2692 \text{ ккал/(кг*град)}$;
 $c'_{pm} = 1,0371 \text{ кдж/(м}^3\text{*град)} = 0,2479 \text{ ккал/(м}^3\text{*град)}$.

4.2. Пользуясь формулой, $\mu_{cp} = 29,2741 + 0,010459t - 0,000003818t^2$, определить истинную мольную теплоемкость кислорода при постоянном давлении для температуры 700°C .

Сравнить полученное значение теплоемкости со значением его, взятым из таблиц.

Отв. $\mu_{cp} = 34,725 \text{ кдж/(кмоль*град)}$.

4.3. Найти количество тепла, необходимое для нагрева 1 м^3 (при нормальных условиях) газовой смеси состава $r(\text{CO}_2) = 14,5 \%$, $r(\text{O}_2) = 6,5\%$, $r(\text{N}_2) = 79,0\%$ от 200 до 1200°C при $p = \text{const}$ и нелинейной зависимости теплоемкости от температуры.

Отв. $q_p = 1582,2 \text{ кдж/ м}^3$

5 ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

5.1 Примеры решения задач

5.1. В котельной электрической станции за 20 ч работы сожжены 62 т каменного угля, имеющего теплоту сгорания 28 900 кДж/ кг (6907 ккал/ кг). Определить среднюю мощность станции, если в электрическую энергию превращено 18% тепла, полученного при сгорании угля.

Решение

Количество тепла, превращенного в электрическую энергию за 20 ч работы,

$$Q = 62 \cdot 1000 \cdot 28900 \cdot 0,18 \text{ кДж.}$$

Эквивалентная ему электрическая энергия или работа

$$L = (62 \cdot 1000 \cdot 28900 \cdot 0,18) / 3600 = 89590 \text{ кВт*ч.}$$

Следовательно, средняя электрическая мощность станции

$$N = 89590 / 20 = 4479 \text{ кВт.}$$

5.2. Паросиловая установка мощностью 4200 кВт имеет к.п.д. $\eta_{ст} = 0,20$. Определить часовой расход топлива, если его теплота сгорания $Q_H^P = 25\,000$ кДж/ кг.

Решение

По формуле:

$$\eta_{ст} = 3600 / (Q_H^P b).$$

Отсюда

$$b = 3600 / (\eta_{ст} Q_H^P) = 3600 / (0,2 \cdot 25000) = 0,72 \text{ кг/(кВт*ч).}$$

Часовой расход топлива составит

$$0,72 \cdot 4200 = 3024 \text{ кГ/ч.}$$

5.3. Найти изменение внутренней энергии 1 кг воздуха при переходе его от начального состояния $t_1 = 300^\circ\text{C}$ до конечного при $t_2 = 50^\circ\text{C}$. Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной. Ответ дать в кДж.

Решение

$$\Delta u = c_{vm}(t_2 - t_1)$$

Из таблицы «Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоёмкостей газов» получаем для воздуха:

$$(c_{vm})_0^t = 0,7084 + 0,00009349t \text{ кДж/(кг*град)}$$
$$(c_{vm})_{50}^{300} = 0,7084 + 0,00009349(50 + 300) = 0,7411 \text{ кДж/(кг*град).}$$

Следовательно,

$$\Delta u = 0,7411(50 - 300) = - 185,3 \text{ кДж/кг.}$$

5.4. В двух разобщенных между собой сосудах А и В (рис. 2) содержатся следующие газы: в сосуде А – 50 л азота при давлении $p_1 = 20$ бар и температуре $t_1 = 200^\circ\text{C}$, в сосуде В – 200 л углекислого газа при давлении $p_2 = 5$ бар и температуре $t_2 = 600^\circ\text{C}$. Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов. Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

Решение

Температура смеси определяется по формуле:

$$T = [\sum p_i V_i / (k_i - 1)] / [\sum p_i V_i / (k_i - 1) T_i]$$

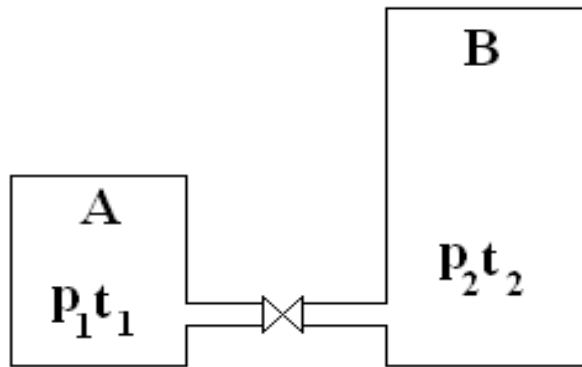


Рис. 3

Значения k для азота и углекислоты находим из таблиц «Теплоёмкость азота» и «Теплоёмкость углекислого газа».

Имеем:

$$k_{200}(\text{N}_2) = c_{p200}/c_{v200} = 29,471/ 21,156 = 1,39,$$

$$k_{600}(\text{CO}_2) = c_{p600}/c_{v600} = 52,452/ 44,137 = 1,19.$$

Следовательно,

$$T = (20 \cdot 0,05 / 0,39 + 5 \cdot 0,2 / 0,19) 10^5 / (20 \cdot 0,05 / (0,39 \cdot 473) + 5 \cdot 0,2 / (0,19 \cdot 873)) 10^5 = 684^\circ\text{K} = 411^\circ\text{C}.$$

5.2 Задачи для самостоятельного решения

5.1. Мощность турбогенератора 12 000 кВт, к.п.д. генератора 0,97. Какое количество воздуха нужно пропустить через генератор для его охлаждения, если конечная температура воздуха не должна превышать 55°C ? Температура в машинном отделении равна 20°C ; среднюю теплоемкость воздуха c_{pm} принять равной $1,0$ кдж/(кг*град).

Отв. 10,3 кг/сек.

5.2. При испытании нефтяного двигателя было найдено, что удельный расход топлива равен 170 г/(л. с.ч). Определить эффективный к.п.д. этого двигателя, если теплота сгорания топлива $Q_H^P = 41\,000$ кдж/кг (9800 ккал/кг).

Отв. $\eta_e = 0,38$.

5.3. Свинцовый шар падает с высоты $h = 100$ м на твердую поверхность. В результате падения кинетическая энергия шара полностью превращается в тепло. Одна треть образовавшегося тепла передается окружающей среде, а две трети расходятся на нагревание шара. Теплоемкость свинца $c = 0,030$ ккал/(кг*град). Определить повышение температуры шара.

Отв. $\Delta t = 5,2^\circ\text{C}$.

5.4. Найти изменение внутренней энергии 2 м^3 воздуха, если температура его понижается от $t_1 = 250^\circ\text{C}$ до $t_2 = 70^\circ\text{C}$. Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной. Начальное давление воздуха $p_1 = 6$ бар. Ответ дать в ккал.

Отв. $\Delta U = - 253,8$ ккал.

5.5. В сосуде А находится 100 л водорода при давлении 15 бар и температуре 1200°C , а в сосуде В – 50 л азота при давлении 30 бар и температуре 200°C . Определить давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов при условии отсутствия теплообмена с окружающей средой.

Отв. $t = 467^\circ\text{C}$; $p = 20,8$ бар.

6 ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

6.1 Изохорный процесс

6.1.1 Примеры решения задач

6.1. В закрытом сосуде емкостью $V = 0,6 \text{ м}^3$ содержится воздух при давлении $p_1 = 5 \text{ бар}$ и температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$. В результате охлаждения сосуда воздух, содержащийся в нем, теряет 105 кДж . Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, какое давление и какая температура устанавливаются после этого в сосуде.

Решение

Пользуясь уравнением состояния, определяем массу воздуха в сосуде:

$$M = pV / RT = (5 \cdot 10^5 \cdot 0,6) / (287 \cdot 293) = 3,57 \text{ кг.}$$

Количество тепла, отводимого от воздуха в процессе, определяется уравнением:

$$Q = Mc_{vm}(t_2 - t_1), \text{ откуда} \\ t_2 = (Q / Mc_{vm}) + t_1 = - 105 / (3,57 \cdot 0,723) + 20 = - 20,7^\circ\text{C.}$$

Значение $c_{vm} = 0,723$ получено из выражения $c_{vm} = \mu c_{vm} / \mu$ (для двухатомных газов).

Из соотношения параметров в изохорном процессе

$$p_2/p_1 = T_2/T_1$$

имеем

$$p_2 = p_1 T_2/T_1 = 5(273 - 20,7) / 293 = 4,3 \text{ бар.}$$

6.2. Сосуд емкостью 90 л содержит воздух при давлении 8 бар и температуре 30°C . Определить количество тепла, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление при $v = \text{const}$ до 16 бар . Принять зависимость $c = f(t)$ нелинейной. Ответ дать в ккал.

Решение

Из соотношения параметров изохорного процесса

$$p_2/p_1 = T_2/T_1$$

получаем:

$$T_2 = T_1 p_2/p_1 = (303 \cdot 16)/8 = 606^\circ\text{K};$$
$$t_2 = 606 - 273 = 333^\circ\text{C}.$$

По уравнению

$$q_v = c_{vm2}t_2 - c_{vm1}t_1.$$

Пользуясь таблицей «Теплоемкость воздуха», находим

$$c_{vm1} = 0,7173 \text{ кдж/ (кг*град)}; \quad c_{vm2} = 0,7351 \text{ кдж/ (кг*град)}.$$

Следовательно,

$$q_v = 0,7351 \cdot 333 - 0,7173 \cdot 30 = 223,2 \text{ кдж/кг}.$$

Масса воздуха, находящегося в резервуаре, определяется из уравнения:

$$M = p_1 V_1 / RT_1 = (8 \cdot 10^5 \cdot 0,09) / (287 \cdot 303) = 0,8278 \text{ кг}.$$

а сообщенное ему количество тепла:

$$Q_v = 0,8278 \cdot 223,2 = 184,8 \text{ кдж} = 44,2 \text{ ккал}.$$

6.1.2 Задачи для самостоятельного решения

6.1. В закрытом сосуде емкостью $V = 0,3 \text{ м}^3$ содержится $2,75 \text{ кг}$ воздуха при давлении $p_1 = 8 \text{ бар}$ и температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$.

Определить давление и удельный объем после охлаждения воздуха до 0°C .

Отв. $p_2 = 7,32 \text{ бар}$; $v_2 = 0,109 \text{ м}^3/\text{кг}$.

6.2. В закрытом сосуде емкостью $V = 0,5 \text{ м}^3$ содержится двуокись углерода при $p_1 = 6 \text{ бар}$ и $t_1 = 527^\circ\text{C}$. Как изменится давление газа, если от него отнять 100 ккал ? Принять зависимость $c = f(t)$ линейной.

Отв. $p_2 = 4,2$ бар.

6.3. До какой температуры нужно охладить $0,8 \text{ м}^3$ воздуха с начальным давлением 3 бар и температурой 15°C , чтобы давление при постоянном объеме понизилось до 1 бар? Какое количество тепла нужно для этого отвести? Теплоемкость воздуха принять постоянной.

Отв. До $t_2 = -177^\circ\text{C}$; $Q = -402$ кдж.

6.2 Изобарный процесс

6.2.1 Примеры решения задач

6.3. В цилиндре находится воздух при давлении $p = 5$ бар и температуре $t_1 = 400^\circ\text{C}$. От воздуха отнимается тепло при постоянном давлении таким образом, что в конце процесса устанавливается температура $t_2 = 0^\circ\text{C}$. Объем цилиндра, в котором находится воздух, равен 400 л. Определить количество отнятого тепла, конечный объем, изменение внутренней энергии и совершенную работу сжатия. Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

Решение

Количество отнятого тепла по формуле:

$$Q_p = V_H c'_{pm}(t_2 - t_1),$$

где V_H – объем воздуха при нормальных условиях.

Значение его легко определить из выражения:

$$\begin{aligned} pV/T &= p_H V_H / T_H \\ V_H &= pV T_H / p_H T = (5 * 0,4 * 273) / (1,013 * 673) = 0,8 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

По специальной таблице находим

$$c'_{pm} = 1,3289 \text{ кдж}/(\text{м}^3 * \text{град}).$$

Следовательно,

$$Q_p = 0,8 * 1,3289 (0 - 400) = -425 \text{ кдж}.$$

Это же количество тепла можно вычислить не только по объему воздуха, но и по его массе:

$$Q_p = Mc_{pm}(t_2 - t_1).$$

Масса воздуха определяется из характеристического уравнения:

$$M = p_1 V_1 / RT_1 = (5 \cdot 10^5 \cdot 0,4) / (287 \cdot 673) = 1,035 \text{ кг.}$$

Из специальной таблицы находим

$$c_{pm} = 1,0283 \text{ кдж/(кг*град).}$$

Следовательно,

$$Q_p = 1,035 \cdot 1,0283 (0 - 400) = - 425 \text{ кдж.}$$

Конечный объем определяется из уравнения:

$$\begin{aligned} V_2/V_1 &= T_2/T_1 \\ V_2 &= V_1 T_2/T_1 = 0,4 \cdot 273 / 673 = 0,1622 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = V_n c'_{vm}(t_2 - t_1).$$

Пользуясь специальной таблицей, находим

$$c'_{vm} = 0,9579 \text{ кдж/(м}^3 \cdot \text{град).}$$

Следовательно,

$$\Delta U = 0,8 \cdot 0,9579 (0 - 400) = - 306,5 \text{ кдж.}$$

Работа, затраченная на сжатие:

$$L = p (V_2 - V_1) = 5 \cdot 10^5 (0,1622 - 0,4) = - 118,9 \text{ кдж.}$$

6.8. Определить, какая часть тепла, подводимого к газу в изобарном процессе, расходуется на работу и какая – на изменение внутренней энергии.

Решение

Аналитическое выражение первого закона термодинамики:

$$dq = du + dl$$

может быть представлено в виде:

$$du/dq + dl/dq = 1.$$

Величина

$$dl/dq = 1 - du/dq.$$

Определяет ту долю от всего подводимого к газу тепла, которая превращается в работу расширения. Так как для идеального газа в процессе $p = \text{const}$

$$du = c_v dt \text{ и } dq = c_p dt$$

то

$$dl/dq = 1 - c_v dt / c_p dt$$

Принимая $k = 1,4$, получаем

$$dl/dq = 1 - 1/1,4 = 0,285$$

Следовательно, в изобарном процессе только 28,5% тепла, подводимого к газу, превращается в работу. Все остальное тепло, то есть 71,5%, расходуется на увеличение внутренней энергии.

6.2.2 Задачи для самостоятельного решения

6.4. $0,2 \text{ м}^3$ воздуха, имеющего начальную температуру 18°C , подогреваются в цилиндре диаметром 50 см при постоянном давлении $p = 2$ бар до температуры 200°C . Определить работу расширения, перемещение поршня и количество затраченного тепла, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Отв. $L = 25\,000$ дж; $h = 0,64$ м; $Q = 88,3$ кдж.

6.5. 2 м^3 воздуха с начальной температурой $t_1 = 15^\circ\text{C}$ расширяются при постоянном давлении до 3 м^3 вследствие сообщения газу 837 кдж тепла. Определить конечную температуру, давление газа в процессе и работу расширения.

Отв. $T_2 = 159^\circ\text{C}$; $p = 2,4$ бар; $L = 239$ кдж.

6.3 Изотермический процесс

6.3.1 Примеры решения задач

6.4. 1 кг воздуха при температуре $t_1 = 30^\circ\text{C}$ и начальном давлении $p_1 = 1$ бар сжимается изотермически до конечного давления $p_2 = 10$ бар. Определить конечный объем, затрачиваемую работу и количество тепла, отводимого от газа.

Решение

Определяем начальный объем воздуха из уравнения состояния:

$$v_1 = RT_1/p_1 = 287 \cdot 303 / 10^5 = 0,87 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Так как в изотермическом процессе

$$p_1 v_1 = p_2 v_2,$$

то конечный объем

$$v_2 = p_1 v_1 / p_2 = 0,87 \cdot 1 / 10 = 0,087 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг воздуха, получается из уравнения:

$$l = RT \cdot \ln(p_1 / p_2) = - 2,303 \cdot 287 \cdot 303 \lg 10 = - 200 \text{ кдж/кг}.$$

Количество тепла, отводимого от газа, равно работе, затраченной на сжатие. Следовательно,

$$q = - 200 \text{ кдж/кг}.$$

6.5. Как будут соотноситься между собой значения работы изотермического сжатия, вычисленные для равной массы различных газов, при прочих одинаковых условиях?

Решение

Значения работы изотермического сжатия для 1 кг различных газов при одинаковых условиях выражаются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}l_1 &= R_1 T \ln (p_2/p_1) \\l_2 &= R_2 T \ln (p_2/p_1) \\l_3 &= R_3 T \ln (p_2/p_1) \text{ и т. д.}\end{aligned}$$

Поэтому

$$l_1 : l_2 : l_3 = R_1 : R_2 : R_3,$$

то есть работа изотермического сжатия пропорциональна газовой постоянной.

6.3.2 Задачи для самостоятельного решения

6.6. Воздух в количестве 0,5 кг при $p_1 = 5$ бар и $t_1 = 30^\circ\text{C}$ расширяется изотермически до пятикратного объема. Определить работу, совершаемую газом, конечное давление и количество тепла, сообщаемого газу.

Отв. $p_2 = 1$ бар; $L = Q = 70$ кдж = 16,7 ккал.

6.7. При изотермическом сжатии $2,1 \text{ м}^3$ азота, взятого при $p_1 = 1$ бар, от газа отводится 335 кдж тепла. Определить конечный объем V_2 , конечное давление p_2 и затраченную работу L .

Отв. $V_2 = 0,426 \text{ м}^3$; $L = - 335$ кдж; $p_2 = 4,93$ бар.

6.8. Начальное состояние газа определяется параметрами: $p_1 = 10$ бар и $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$. Построить изотерму расширения.

6.4 Адиабатный процесс

6.4.1 Примеры решения задач

6.6. 1 кг воздуха при начальной температуре $t_1 = 30^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 1$ бар сжимается адиабатно до конечного давления $p_2 = 10$ бар. Определить конечный объем, конечную температуру и затрачиваемую работу.

Решение

Из соотношения параметров в адиабатном процессе находим

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k},$$

откуда

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k}.$$

Принимая $k = 1,4$, получаем:

$$\begin{aligned} T_2 &= 303 * 10^{0,4/1,4} = 303 * N \\ \lg N &= \lg 10^{0,286} = 0,286 \lg 10 = 0,286; \\ N &= 1,931; T_2 = 303 * 1,931 = 585^\circ \text{K}; t_2 = 312^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Значение величины $(p_2/p_1)^{(k-1)/k}$ можно взять из таблицы «Адиабатное и политропное расширение газов». Как видно из этой таблицы, для адиабатного сжатия при $p_2/p_1 = 10$ величина

$$(p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 1,931$$

Затраченная работа

$$l = R(T_1 - T_2)/(k - 1) = 0,287 (303 - 585)/ 0,4 = - 202 \text{ кдж/кг}.$$

Конечный объем определяется из уравнения состояния

$$v_2 = RT_2 / p_2 = 287 * 585 / (10 * 10^5) = 0,168 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

6.7. В газовом двигателе смесь газа и воздуха адиабатно сжимается так, что к концу сжатия ее температура оказывается на 200°C ниже

температуры самовоспламенения газа. В начале сжатия $p_1 = 0,9$ бар и $t_1 = 70^\circ\text{C}$. Показатель адиабаты $k = 1,36$; $R = 314$ дж/ (кг*град), температура самовоспламенения равна 650°C . Определить величину работы сжатия и степень сжатия $\varepsilon = v_1/v_2$.

Решение

Из соотношения параметров в адиабатном процессе имеем

$$\varepsilon = v_1/v_2 = (723/343)^{1/0,36}; \quad \varepsilon = 7,92$$

Работа сжатия

$$l = R(T_1 - T_2)/(k - 1) = (343 - 723)314/0,36 = -331,4 \text{ кдж/кг.}$$

6.4.2 Задачи для самостоятельного решения

6.9. 1 кг воздуха при температуре $t_1 = 15^\circ\text{C}$ и начальном давлении $p_1 = 1$ бар адиабатно сжимается до 8 бар. Определить работу, конечный объем и конечную температуру.

Отв. $t_2 = 248^\circ\text{C}$; $v_2 = 0,187 \text{ м}^3/\text{кг}$; $l = -167,2 \text{ кдж/кг}$.

6.10. До какого давления нужно адиабатно сжать смесь воздуха и паров бензина, чтобы в результате повышения температуры наступило самовоспламенение смеси?

Начальные параметры: $p_1 = 1$ бар; $t_1 = 15^\circ\text{C}$. Температура воспламенения смеси $t_2 = 550^\circ\text{C}$; $k = 1,39$.

Отв. $p_2 = 42$ бар.

6.11. В цилиндре газового двигателя находится газовая смесь при давлении $p_1 = 1$ бар и температуре $t_1 = 50^\circ\text{C}$. Объем камеры сжатия двигателя составляет 16% от объема, описываемого поршнем. Определить конечное давление и конечную температуру газовой смеси при адиабатном ее сжатии. Показатель адиабаты k принять равным 1,38.

Отв. $p_2 = 15,4$ бар; $t_2 = 412^\circ\text{C}$.

6.5 Политропный процесс

6.5.1 Примеры решения задач

6.8. 1 кг воздуха при $p_1 = 5$ бар и $t_1 = 111^\circ\text{C}$ расширяется политропно до давления $p_2 = 1$ бар. Определить конечное состояние воздуха, изменение внутренней энергии, количество подведенного тепла и полученную работу, если показатель политропы $m = 1,2$.

Решение

Определяем начальный объем воздуха:

$$v_1 = RT_1/p_1 = 287 \cdot 384 / (5 \cdot 10^5) = 0,22 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Конечный объем воздуха находим из уравнения:

$$v_2 = v_1(p_1/p_2)^{1/m} = 0,22 \cdot 5^{1/1,2} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Конечную температуру проще всего найти из характеристического уравнения

$$T_2 = p_2 v_2 / R = 1 \cdot 10^5 \cdot 0,84 / 287 = 293^\circ\text{K}.$$

Величину работы находим из уравнения:

$$l = R(T_1 - T_2)/(m - 1) = 287 \cdot (384 - 293) / 0,2 = 130\,600 \text{ Дж/кг} = 130,6 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1) = 20,93 \cdot (293 - 384) / 28,96 = -65,8 \text{ кДж/кг}.$$

Количество тепла, сообщенного воздуху:

$$q = c_v(m - k)(t_2 - t_1)/(m - 1) = 0,72(1,2 - 1,4)(20 - 111)/(1,2 - 1) = 65,8 \text{ кДж/кг}.$$

Нетрудно видеть, что в этом процессе внешняя работа совершается за счет подведенного тепла и уменьшения внутренней энергии. Исходя из этого можно проверить полученные результаты следующим образом:

$$q = \Delta u + l; l = q - \Delta u = 65,8 - (-65,8) = 131,6 \text{ кДж/кг}.$$

Этот же результат нами получен выше другим путем.

6.9. Воздух в количестве $0,01 \text{ м}^3$ при давлении $p_1 = 10 \text{ бар}$ и температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$ расширяется в цилиндре с подвижным поршнем до 1 бар . Определить конечный объем, конечную температуру, работу, произведенную газом, и подведенное тепло, если расширение в цилиндре происходит: а) изотермически, б) адиабатно и в) политропно с показателями $m = 1,3$.

Решение

а) Изотермическое расширение. Конечный объем определяется по формуле:

$$V_2 = V_1 p_1 / p_2 = 0,01 * 10 / 1 = 0,1 \text{ м}^3.$$

Так как в изотермическом процессе $t = \text{const}$, то конечная температура

$$t_2 = t_1 = 25^\circ\text{C}.$$

Работа газа по уравнению

$$L = p_1 V_1 \ln (p_1 / p_2) = 10 * 10^5 * 0,01 * 2,3031 \lg 10 = 23 \text{ 000 дж} = 23 \text{ кдж}.$$

Количество подведенного тепла по формуле:

$$Q = L = 23 \text{ кдж}.$$

б) Адиабатное расширение. Конечный объем определяется по уравнению:

$$V_2 = V_1 (p_1 / p_2)^{1/k} = 0,01 * 10^{1/1,4}$$

Пользуясь таблицей «Адиабатное и политропное расширение газов» получаем

$$10^{1/1,4} = 5,188.$$

Следовательно,

$$V_2 = 0,01 * 5,188 = 0,05188 \text{ м}^3.$$

Конечная температура воздуха на основании уравнения

$$T_2 = T_1(p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 298*0,1^{(1,4-1)/1,4} = 298/1,931 = 54,3^\circ\text{K}$$

Работа газа по уравнению

$$L = [p_1 V_1 * (1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k})] / (k - 1) = 10*10^5*0,01*(1 - 1/1,931) / 0,4 = 25000*0,48 = 12\ 000 \text{ Дж} = 12 \text{ кДж.}$$

в) Политропное расширение. Конечный объем определится из уравнения

$$V_2 = V_1(p_1/p_2)^{1/m} = 0,01*10^{1/1,3} = 0,01*5,885 = 0,05885 \text{ м}^3.$$

Конечная температура по уравнению

$$T_2 = T_1(p_1/p_2)^{(m-1)/m} = 298*0,1^{0,3/1,3} = 175,2^\circ\text{K};$$
$$t_2 = -97,8^\circ\text{C}.$$

Работа газа по уравнению

$$L = [p_1 V_1 * (1 - (p_2/p_1)^{(m-1)/m})] / (m - 1) =$$
$$= 10*10^5*0,01*(1 - 0,1^{0,3/1,3}) / 0,3 = 33333 (1 - 1/1,701) =$$
$$= 13\ 700 \text{ Дж} = 13,7 \text{ кДж.}$$

Подведенное тепло по уравнению

$$Q = L(k - m) / (k - 1) = 13,7*0,1 / 0,4 = 3,425 \text{ кДж}$$

6.10. Исследовать политропные процессы расширения, если показатели политропы равны: $m = 0,8$; $m = 1,1$; $m = 1,5$ (k принять равным 1,4).

Решение

1. Политропный процесс с показателем $m = 0,8$. Определяем φ .

$$\varphi = (m - 1) / (m - k) = (0,8 - 1) / (0,8 - 1,4) = 1/3.$$

Значение коэффициента φ позволяет сделать заключение, что в процессе расширения $1/3$ внешнего тепла расходуется на увеличение внутренней энергии, а $2/3$ – на внешнюю работу.

2. Политропный процесс с показателем $m = 1,1$. Определяем φ .

$$\varphi = (m - 1) / (m - k) = (1,1 - 1) / (1,1 - 1,4) = - 1/3.$$

Или

$$q = l - 1q/3.$$

Откуда

$$l = 4q/3.$$

То есть полученная работа больше количества подведенного тепла. Другими словами, в данном процессе работа совершается как за счет подведенного к газу тепла, так и за счет внутренней энергии. Нетрудно так же видеть, что внутренняя энергия газа уменьшается на $1/3$ от q .

3. Политропный процесс с показателем $m = 1,5$. Так как $m > k$, то тепло от газа отводится, внутренняя энергия газа уменьшается. Работа в этом процессе получается, очевидно, за счет внутренней энергии газа; тепло отводится также за счет уменьшения внутренней энергии. Определяем φ .

$$\varphi = (m - 1) / (m - k) = (1,5 - 1) / (1,5 - 1,4) = 5.$$

По первому закону термодинамики:

$$q = \Delta u + l.$$

Для данного процесса имеем

$$-q = -\Delta u + l.$$

Так как

$$\varphi = \Delta u / q = 5,$$

то

$$q = \Delta u / 5$$

Следовательно,

$$-\Delta u / 5 = -\Delta u + l$$

или

$$l = 4\Delta u / 5.$$

Полученный результат означает, что $4/5$ от величины, на которую уменьшается энергия газа, расходуется на внешнюю работу, количество же тепла, отведенного от газа, составляет $1/5$ уменьшения его внутренней энергии.

6.5.2 Задачи для самостоятельного решения

6.12. Воздух в количестве 3 м^3 расширяется политропно от $p_1 = 5,4$ бар и $t_1 = 45^\circ\text{C}$ до $p_2 = 1,5$ бар. Объем, занимаемый при этом воздухом, становится равным 10 м^3 . Определить показатель политропы, конечную температуру, полученную работу и количество подведенного тепла.

Отв. $m = 1,064$; $t_2 = 21,4^\circ\text{C}$; $L = 1875$ кдж; $Q = 1575$ кдж = $376,4$ ккал.

6.13. В процессе политропного сжатия затрачивается работа, равная 195 кдж, причем в одном случае от газа отводится 250 кдж, а в другом – газу сообщается 42 кдж. Определить показатели обеих политроп.

Отв. 1) $m = 0,9$; 2) $m = 1,49$.

6.14. Исследовать политропные процессы сжатия, если показатели их $m = 0,9$ и $m = 1,1$ ($k = 1,4$).

7 ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

7.1 Примеры решения задач

7.1. Определить энтропию 1 кг кислорода при $p = 8$ бар и $t = 250^\circ\text{C}$. Теплоемкость считать переменной, приняв зависимость ее от температуры линейной.

Решение

По формуле

$$s = a_p \ln(T/273) - R \ln(p/p_n) + b(T - 273)$$
$$c_{pm} = 0,9127 + 0,00012724t \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$$

для кислорода.

Поэтому формула линейной зависимости истинной теплоемкости будет иметь вид

$$c_p = 0,9127 + 0,00025448t \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$$

или

$$c_p = 0,9127 + 0,00025448(T - 273) \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град}).$$

Следовательно,

$$c_p = 0,8432 + 0,00025448T \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град}).$$

Таким образом,

$$a = 0,8432; b = 0,00025448;$$

значение энтропии

$$s = 0,8432 \cdot 2,3031g(523/273) - 8,314 \cdot 2,3031g(8/0,013) +$$
$$0,00025448(523 - 273);$$
$$s = 0,5476 - 0,5371 + 0,0634 = 0,0739 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град}).$$

7.2. 1 кг кислорода при температуре $t_1 = 127^\circ\text{C}$ расширяется до пятикратного объема; температура его при этом падает до $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

Решение

По уравнению

$$s_2 - s_1 = c_v \ln(T_2/T_1) + R \ln(v_2/v_1) = 2,303 (20,93 \lg(300/400)/32 + 0,260 \lg 5) = 2,303 (-0,0818 + 0,1827) = 0,2324 \text{ кдж}/(\text{кг} \cdot \text{град}) = 0,055 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град}).$$

7.3. 10 м^3 воздуха, находящегося в начальном состоянии при нормальных условиях, сжимают до конечной температуры 400°C . Сжатие производится: 1) изохорно, 2) изобарно, 3) адиабатно и 4) политропно с показателем политропы $m = 2,2$.

Считая значение энтропии при нормальных условиях равным нулю и принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить энтропию воздуха в конце каждого процесса.

Решение

Находим массу 10 м^3 воздуха при нормальных условиях:

$$M = pV / RT = 1,013 \cdot 10^5 \cdot 10 / (287 \cdot 273) = 12,9 \text{ кг}.$$

Определяем изменение энтропии в каждом из перечисленных процессов:

1) изохорное сжатие

$$\Delta s_1 = s_1 = Mc_v \ln(T/273) = 12,9 \cdot 0,723 \cdot 2,303 \lg(673/273) = 8,42 \text{ кдж}/\text{град};$$

2) изобарное сжатие

$$\Delta s_2 = s_2 = Mc_p \ln(T/273) = 12,9 \cdot 1,0117 \cdot 2,303 \lg(673/273) = 11,78 \text{ кдж}/\text{град};$$

3) адиабатное сжатие

$$\Delta s_3 = s_3 = 0;$$

4) политропное сжатие

$$\Delta s_4 = s_4 = Mc_v \ln(T/273) \cdot (m - k) / (m - 1) = 12,9 \cdot 0,723 \cdot 2,303 \lg(673/273) \cdot (2,2 - 1,4) / (2,4 - 1) = 5,56 \text{ кдж}/\text{град}.$$

7.4. В процессе политропного расширения воздуха температура его уменьшилась от $t_1 = 25^\circ\text{C}$ до $t_2 = -37^\circ\text{C}$. Начальное давление воздуха $p_1 = 4$ бар, количество его $M = 2$ кг. Определить изменение энтропии в этом процессе, если известно, что количество подведенного к воздуху тепла составляет 89,2 кдж.

Решение

Количество тепла, сообщаемого газу в политропном процессе

$$Q = Mc_v(t_2 - t_1) (m - k) / (m - 1).$$

Подставляя значения известных величин, получаем

$$(m - k) / (m - 1) = - 89,2 / (2 * 0,723 * 62) = - 0,995.$$

Отсюда показатель политропы $m = 1,2$.

Из соотношения параметров политропного процесса определяем конечное давление:

$$p_2 / p_1 = (T_2 / T_1)^{m / (m - 1)} ; p_2 = p_1 (T_2 / T_1)^{m / (m - 1)} = 4 * (236 / 298)^6 = 1 \text{ бар.}$$

Изменение энтропии по уравнению:

$$\Delta s = M [c_p \ln(T_2 / T_1) - R \ln(p_2 / p_1)].$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \Delta s &= 2 * 2,3(29,31 \lg(236 / 298) / 28,96 - 287 \lg(1 / 4) / 1000) = \\ &= 4,6 (-0,1025 + 0,1760) = 0,338 \text{ кдж/град.} \end{aligned}$$

7.5. В сосуде объемом 300 л заключен воздух при давлении $p_1 = 50$ бар и температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Параметры среды: $p_0 = 1$ бар $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести сжатый воздух, находящийся в сосуде. Представить процесс в диаграмме $p-v$

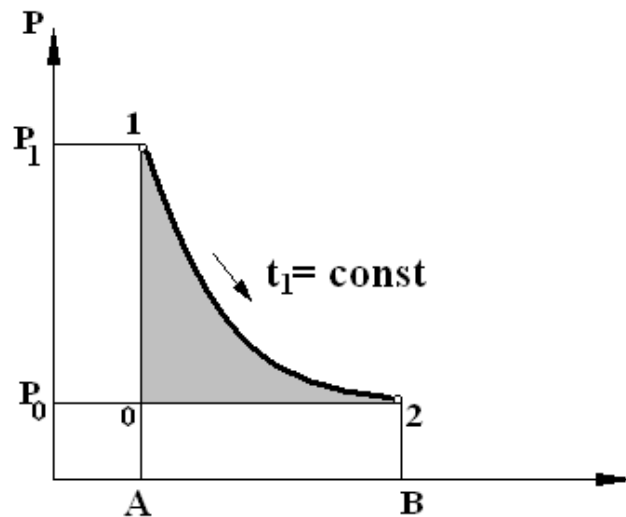


Рис. 4

Решение

Так как температура воздуха в начальном состоянии равна температуре среды, то максимальная работа, которую может выполнить воздух, может быть получена лишь при условии изотермического расширения воздуха от начального давления $p_1 = 50$ бар до давления среды $p_0 = 1$ бар. В диаграмме максимальная работа изобразится площадью $1 - 2 - B - A$, а максимальная полезная работа – площадью $1 - 2 - 0 - 1$ (см. рис. 3). Величина ее равна

$$L_{\max(\text{полезн})} = T_0(s_2 - s_1) - p_0(V_2 - V_1).$$

Или

$$L_{\max(\text{полезн})} = MT_0(s_2 - s_1) - p_0(V_2 - V_1).$$

Определяем массу воздуха, находящегося в сосуде, и объем воздуха после изотермического расширения:

$$M = p_1 V_1 / (RT_1) = 50 \cdot 10^5 \cdot 0,3 / (287 \cdot 293) = 17,83 \text{ кг.}$$

$$V_2 = p_1 V_1 / p_2 = 50 \cdot 0,3 / 1 = 15 \text{ м}^3.$$

Так как изменение энтропии в изотермическом процессе по формуле

$$s_2 - s_1 = R \ln(p_1/p_2),$$

то

$$L_{\max(\text{полезн})} = M T_0 R \ln(p_1/p_2) - p_0(V_2 - V_1) = 17,83 \cdot 293 \cdot 287 \cdot 2,3 \cdot 1,699 - 1 \cdot 10^5 (15 - 0,3) = 5847000 - 1470000 = 4377000 \text{ дж} = 4377 \text{ кдж}.$$

7.2 Задачи для самостоятельного решения

7.1. Определить энтропию 6,4 кг азота при $p = 5$ бар и $t = 300^\circ\text{C}$. Теплоемкость считать постоянной.

Отв. $s = 1,94 \text{ кдж/град} = 0,464 \text{ ккал/град}$.

7.2. 1 кг воздуха сжимается от $p_1 = 1$ бар в $t_1 = 15^\circ\text{C}$ до $p_2 = 5$ бар и $t_2 = 100^\circ\text{C}$. Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

Отв. $\Delta s = -0,196 \text{ кдж/ (кг*град)} = -0,047 \text{ ккал/ (кг*град)}$.

7.3. Определить приращение энтропии 3 кг воздуха: а) при нагревании его по изобаре от 0 до 400°C ; б) при нагревании его по изохоре от 0 до 880°C ; в) при изотермическом расширении с увеличением объема в 16 раз. Теплоемкость считать постоянной.

Отв. а) $\Delta s_p = 0,655$; б) $\Delta s_v = 0,748$; в) $\Delta s_T = 0,563 \text{ ккал/град}$.

7.4. Построить в диаграмме Ts для воздуха, в пределах от 0 до 500°C , изобары: $p_1 = 2$ бар, $p_2 = 6$ бар, $p_3 = 18$ бар.

7.5. В сосуде объемом 200 л находится углекислота при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 100$ бар. Температура среды $t_0 = 20^\circ\text{C}$, давление среды $p_0 = 1$ бар. Определить максимальную полезную работу, которую может произвести находящаяся в сосуде углекислота.

Отв. $L_{\max(\text{полезн})} = 7220 \text{ кдж}$.

8 КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

8.1 Примеры решения задач

8.1. 1 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур $t_1 = 627^\circ\text{C}$ и $t_2 = 27^\circ\text{C}$, причем наивысшее давление составляет 60 бар, а наинизшее – 1 бар. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический к. п. д. цикла и количество подведенного и отведенного тепла.

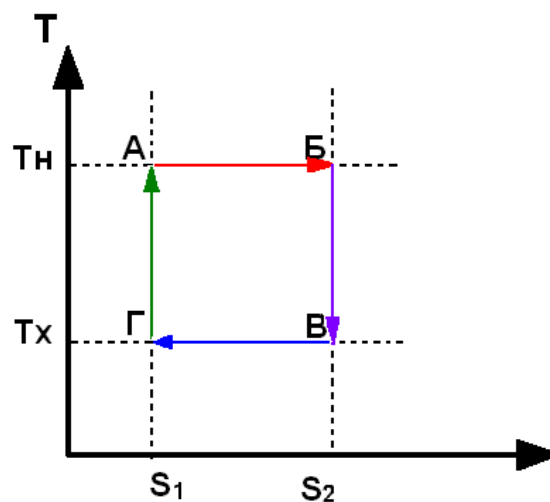


Рис. 5

Решение

Точка 1:

$$p_1 = 60 \text{ бар}; T_1 = 900^\circ\text{K}.$$

Удельный объем газа определяем из характеристического уравнения

$$v_1 = RT_1/p_1 = 287 \cdot 900 / (60 \cdot 10^5) = 0,043 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2:

$$T_2 = 300^\circ\text{K}.$$

Из уравнения адиабаты (линия Б – В)

$$p_2/p_3 = (T_2/T_3)^{k/(k-1)} = 3^{1,4/0,4} = 46,8$$

$$p_2 = 1*46,8 = 46,8 \text{ бар.}$$

Из уравнения изотермы (линия А – Б)

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

получаем

$$v_2 = p_1 v_1 / p_2 = 60 * 0,043 / 46,8 = 0,055 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Точка 3:

$$p_3 = 1 \text{ бар; } T_3 = 300^\circ\text{К;}$$

$$v_3 = RT_3 / p_3 = 287 * 300 / 10^5.$$

Точка 4:

$$T_4 = 300^\circ\text{К.}$$

Из уравнения адиабаты (линия Г – А) получаем:

$$p_1/p_4 = (T_1/T_4)^{k/(k-1)} = 46,8$$

$$p_4 = p_1 / 46,8 = 1,284 \text{ бар.}$$

Из уравнения изотермы (линия В – Г) получаем:

$$p_3 v_3 = p_4 v_4$$

$$v_4 = p_3 v_3 / p_4 = 1 * 0,861 / 1,284 = 0,671 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Термический к.п.д. цикла

$$\eta_t = (T_1 - T_2)/T_1 = (900 - 300)/900 = 0,667.$$

Подведенное количество тепла

$$q_1 = RT_1 \ln (v_2/v_1) = 2,303 * 0,287 * 900 \lg (0,055/0,043) =$$

$$= 63,6 \text{ кДж/кг.}$$

Отведенное количество тепла

$$q_2 = RT_3 \ln (v_3/v_4) = 2,303 * 0,287 * 300 \lg (0,861/0,671) =$$

$$= 21,5 \text{ кДж/кг.}$$

Работа цикла

$$l_o = q_1 - q_2 = 69,6 - 21,5 = 42,1 \text{ кДж/кг.}$$

Для проверки можно воспользоваться формулой:

$$\eta_t = (q_1 - q_2)/q_1 = l_o / q_1 = 42,1 / 63,6 = 0,662.$$

8.2. Для идеального цикла газовой турбины с подводом тепла при $p = \text{const}$ (см. рис. 6) определить параметры в характерных точках, полезную работу, термический к.п.д., количество подведенного и отведенного тепла, если дано: $p_1 = 1$ бар; $t_1 = 27^\circ\text{C}$; $t_3 = 700^\circ\text{C}$; $\lambda = p_2/p_1 = 10$, $k = 1,4$. Рабочее тело – воздух. Теплоемкость принять постоянной.

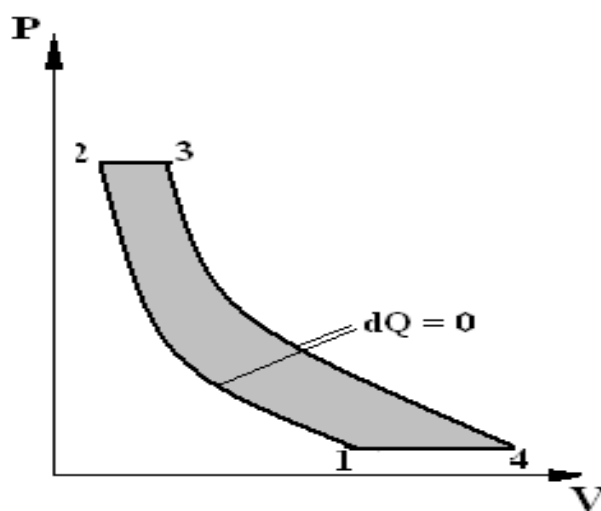


Рис. 6

Решение

Точка 1:

$$v_1 = RT_1 / p_1 = 287 \cdot 300 / (1 \cdot 10^5) = 0,861 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Точка 2:

$$T_2 / T_1 = (p_2 / p_1)^{(k-1)/k};$$

$$T_2 = T_1 (p_2 / p_1)^{(k-1)/k} = T_1 \lambda^{(k-1)/k}$$

$$T_2 = 300 \cdot 10^{0,4/1,4} = 300 \cdot 1,93 = 579^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 306^\circ\text{C}$$

$$p_2 = p_1 \lambda = 1 \cdot 10 = 10 \text{ бар}$$

$$v_2 = RT_2 / p_2 = 287 \cdot 579 / (10 \cdot 10^5) = 0,166 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Точка 3:

$$T_3 = 700 + 273 = 973^\circ\text{K}; p_3 = p_2 = 10 \text{ бар};$$

$$v_3 = v_2 T_3 / T_2;$$

$$v_3 = 0,166 \cdot 973 / 579 = 0,279 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Точка 4:

$$\begin{aligned} T_3 / T_2 &= T_2 / T_4 ; \\ T_4 &= 973 \cdot 300 / 579 = 504^\circ\text{К}; \\ t_4 &= 229^\circ\text{С} \\ p_4 &= p_1 = 1 \text{ бар}; \\ v_4 / v_1 &= T_4 / T_1 \\ v_4 &= v_1 T_4 / T_1 = 0,861 \cdot 504 / 300 = 1,45 \text{ м}^3 / \text{кг}. \end{aligned}$$

Количество тепла:

$$\begin{aligned} q_1 &= q_{2-3} = c_p (T_3 - T_2) = 29,31 \cdot (973 - 579) / 28,96 = 399 \text{ кДж/кг}. \\ q_2 &= q_{4-1} = c_p (T_4 - T_1) = 29,31 \cdot (500 - 300) / 28,96 = 202 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Работа цикла

$$l_o = q_1 - q_2 = 399 - 202 = 197 \text{ кДж/кг}.$$

Термический к.п.д. цикла

$$\eta_t = 1 - q_2 / q_1 = 1 - 202 / 399 = 0,494.$$

8.3. Компрессор всасывает 100 м³/ч воздуха при давлении $p_1 = 1$ бар и температуре $t_1 = 27^\circ\text{С}$. Конечное давление воздуха составляет 8 бар. Определить теоретическую мощность двигателя для привода компрессора и расход охлаждающей воды, если температура ее повышается на 13°С . Расчет произвести для изотермического, адиабатного и политропного сжатия. Показатель политропы принять равным 1,2. Теплоемкость воды принять равной 4,19 кДж/кг.

Решение

1. Изотермическое сжатие.

Работу компрессора определяем по уравнению:

$$L_0 = p_1 V_1 \ln (p_2 / p_1) = 2,303 \cdot 1 \cdot 10^5 \cdot 100 \lg 8 = 20,8 \text{ МДж/ч}.$$

Теоретическая мощность двигателя по формуле

$$N = L_0 / (1000 \cdot 3600) = 20,8 \cdot 10^6 / (1000 \cdot 3600) = 5,8$$

Тепло, отводимое с охлаждающей водой, определяется из равенства

$$Q = L_0 = 20,8 \text{ Мдж/ч.}$$

Следовательно, расход охлаждающей воды

$$M = -20,8 \cdot 10^6 / (13 \cdot 4,19) = 382 \text{ кг/ч.}$$

2. Адиабатное сжатие.

По уравнению

$$\begin{aligned} L_0 &= p_1 V_1 [(p_2/p_1)^{(k-1)/k} - 1] k / (k - 1) = \\ &= 1 \cdot 10^5 \cdot 100 \cdot (8^{0,4/1,4} - 1) 1,4 / 0,4 = 28,4 \text{ Мдж/ч.} \end{aligned}$$

Мощность двигателя

$$N = L_0 / (1000 \cdot 3600) = 28,4 \cdot 10^6 / (1000 \cdot 3600) = 7,9 \text{ кВт.}$$

3. Политропное сжатие.

По уравнению

$$\begin{aligned} L_0 &= p_1 V_1 [(p_2/p_1)^{(m-1)/m} - 1] m / (m - 1) = \\ &= 1 \cdot 10^5 \cdot 100 \cdot (8^{0,2/1,2} - 1) 1,2 / 0,2 = 24,8 \text{ Мдж/ч.} \end{aligned}$$

Мощность двигателя определяется по формуле:

$$N = L_0 / (1000 \cdot 3600) = 24,8 \cdot 10^6 / (1000 \cdot 3600) = 6,9 \text{ кВт.}$$

Количество тепла, отводимого от воздуха, определяется из уравнения:

$$Q = M c_v (t_2 - t_1) (m - k) / (m - 1) = -116 \cdot 0,723 \cdot 124 = -10400 \text{ кдж/ч,}$$

причем

$$\begin{aligned} T_2 / T_1 &= (p_2 / p_1)^{(m-1)/m} = 8^{0,2/1,2} = 1,414; \\ T_2 &= T_1 \cdot 1,414 = 424^\circ\text{K} = 151^\circ\text{C}; \\ c_v (m - k) / (m - 1) &= -0,723 \cdot 0,2 / 0,2 = -0,723 \text{ кдж/(кг} \cdot \text{град)}; \\ M &= p_1 V_1 / (R T_1) = 1 \cdot 10^5 \cdot 100 / (287 \cdot 300) = 116 \text{ кг/ч.} \end{aligned}$$

Расход охлаждающей воды

$$M = 10400 / (13 \cdot 4,19) = 190 \text{ кг/ч.}$$

8.4. Воздух при давлении 1 бар и температуре 20°C должен быть сжат по адиабате до давления 8 бар. Определить температуру в конце сжатия, теоретическую работу компрессора и величину объемного к.п.д.:

а) для одноступенчатого компрессора;

б) для двухступенчатого компрессора с промежуточным холодильником, в котором воздух охлаждается до начальной температуры.

Относительная величина вредного пространства равна 8%. Полученные результаты свести в таблицу и сравнить между собой.

Решение

а) Одноступенчатое сжатие. Температуру в конце сжатия определяем по формуле:

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 293 * 8^{0,4/1,4} = 293 * 1,81 = 530^\circ\text{K} = 257^\circ\text{C}.$$

Теоретическая работа компрессора по формуле

$$l_0 = RT_1 [(p_2/p_1)^{(k-1)/k} - 1] k / (k - 1) = 287 * 293 (1,81 - 1) * 1,4 / 0,4 = 238410 \text{ Дж/кг}.$$

Объемный к.п.д. компрессора находим по формуле

$$\lambda_0 = 1 - a [(p_2/p_1)^{1/k} - 1] = 1 - 0,08 (8^{1/1,4} - 1) = 0,73.$$

б) Двухступенчатое сжатие. Степень сжатия в каждой ступени определяем по уравнению:

$$x = (8/1)^{1/2} = 2,84.$$

Температура в конце сжатия в каждой ступени

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 293 * 2,84^{0,4/1,4} = 293 * 1,35 = 396^\circ\text{K} = 123^\circ\text{C}.$$

Теоретическая работа компрессора в обеих ступенях

$$l_0 = 2RT_1 [(p_2/p_1)^{(k-1)/k} - 1] k / (k - 1) =$$

$$= 2 \cdot 287 \cdot 293(1,35 - 1) \cdot 1,4 / 0,4 = 206000 \text{ Дж/кг.}$$

Объемный к.п.д.

$$\lambda_0 = 1 - 0,08 (2,84^{1/1,4} - 1) = 0,912.$$

Полученные результаты приведены в таблице.

Таблица

Наименование величин	Одноступенчатое сжатие	Двухступенчатое сжатие
Температура в конце сжатия в °С	257	123
Теоретическая затрата работы в Дж/кг	238 410	206 000
Объемный к.п.д.	0,73	0,912

Приведенные данные наглядно показывают преимущества двухступенчатого сжатия.

8.2 Задачи для самостоятельного решения

8.1. 1 кг воздуха совершает цикл Карно между температурами $t_1 = 327^\circ\text{C}$ и $t_2 = 27^\circ\text{C}$; наивысшее давление при этом составляет 20 бар, а наинизшее – 1,2 бар. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках, работу, термический к.п.д. цикла и количества подведенного и отведенного тепла.

Отв. $v_1 = 0,086 \text{ м}^3/\text{кг}$; $v_2 = 0,127 \text{ м}^3/\text{кг}$; $v_3 = 0,717 \text{ м}^3/\text{кг}$; $v_4 = 0,486 \text{ м}^2/\text{кг}$; $p_2 = 13,6 \text{ бар}$; $p_4 = 1,77 \text{ бар}$; $\eta_t = 0,5$; $l_0 = 33,7 \text{ кДж/кг}$; $q_1 = 67,4 \text{ кДж/кг}$; $q_2 = 33,7 \text{ кДж/кг}$.

8.2. Газовая турбина работает по циклу с подводом тепла при $p = \text{const}$. Известны параметры: $p_1 = 1 \text{ бар}$; $t_1 = 40^\circ\text{C}$; $t_4 = 400^\circ\text{C}$, а также степень увеличения давления $\lambda = 8$. Рабочее тело – воздух. Определить параметры в характерных точках цикла, количество подведенного и отведенного тепла, работу, совершаемую за цикл, и термический к. п. д. Теплоемкость считать постоянной.

Отв. $v_1 = 0,9 \text{ м}^3/\text{кг}$; $p_2 = 8 \text{ бар}$; $v_2 = 0,204 \text{ м}^3/\text{кг}$; $t_2 = 297^\circ\text{C}$;
 $v_3 = 0,438 \text{ м}^3/\text{кг}$; $t_3 = 948^\circ\text{C}$; $v_4 = 1,93 \text{ м}^3/\text{кг}$; $q_1 = 659 \text{ кДж/кг}$; $q_2 = 364 \text{ кДж/кг}$;
 $l_0 = 296 \text{ кДж/кг}$; $\eta_t = 0,45$.

8.3. Определить мощность идеального компрессора с изотермическим сжатием и часовое количество тепла, передаваемого охлаждающей воде, если $p_1 = 760 \text{ мм рт. ст.}$, а давление сжатого воздуха $p_2 = 4 \text{ бар}$. Расход всасываемого воздуха – $500 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Отв. $N = 14,2 \text{ кВт}$; $Q = 69\,580 \text{ кДж/ч}$.

8.4. Двухступенчатый компрессор всасывает воздух при давлении $p_1 = 1 \text{ бар}$ и температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и сжимает его до конечного давления $p_2 = 40 \text{ бар}$. Между ступенями компрессора установлен промежуточный холодильник, в котором воздух охлаждается при постоянном давлении до начальной температуры. Производительность компрессора $V_n = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$. Определить теоретическую мощность каждой ступени и количество тепла, которое должно быть отведено от обеих ступеней компрессора и промежуточного холодильника, если известно, что отношение конечного давления к начальному одинаково для обеих ступеней и сжатие происходит политропно с показателем $m = 1,3$. Изобразить процесс сжатия и охлаждения воздуха в диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Отв. $N_1 = N_2 = 35,3 \text{ кВт}$; $Q_1 = Q_2 = -24780 \text{ кДж/ч}$; $Q_{н. х} = 104,3 \text{ МДж/ч}$.

9 ВОДЯНОЙ ПАР

9.1 Примеры решения задач

9.1. Манометр парового котла показывает давление 2 бар. Показание барометра – 776 мм рт. ст. Считая пар сухим насыщенным, определить его температуру, удельный объем и энтальпию.

Решение

Показание барометра

$$B = 776 / 750 = 1,03 \text{ бар.}$$

Следовательно, абсолютное давление пара в паровом котле

$$p = 2 + 1,03 = 3,03 \text{ бар.}$$

По таблице «Насыщенный водяной пар (по давлениям)»:

$$\text{при } p = 3,1 \text{ бар } t_n = 134,66^\circ\text{C};$$

$$\text{при } p = 3 \text{ бар } t_n = 133,54^\circ\text{C}.$$

Интерполируя, получаем для

$$p = 3,03 \text{ бар: } t_n = 133,54 + 0,112 \cdot 3 = 133,88^\circ\text{C}.$$

Аналогично получаем:

$$v'' = 0,5928 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad i'' = 2725,6 \text{ кДж/кг.}$$

9.2. Определить состояние водяного пара, если давление его $p = 6$ бар, а удельный объем $v = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Решение

Давлению 6 бар соответствует удельный объем сухого насыщенного пара

$$v'' = 0,3156 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Так как для заданного состояния $v'' > v$, то пар является влажным. Степень сухости его по уравнению

$$x = (v_x - v') / (v'' - v') = (0,3 - 0,0011) / (0,3156 - 0,0011) = 0,95.$$

Или по приближенной формуле:

$$x = v_x / v'' = 0,3 / 0,3156 = 0,95.$$

Таким образом, расчет по приближенной формуле для данного случая весьма точен.

9.3. Определить массу, внутреннюю энергию, энтальпию, энтропию 6 м³ насыщенного водяного пара при давлении $p = 12$ бар и сухости пара $x = 0,9$.

Решение

Удельный объем влажного пара по формуле:

$$v_x = 0,1633 * 0,9 = 0,147 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Масса пара

$$M = V / v = 6 / 0,147 = 40,8 \text{ кг}.$$

Внутренняя энергия пара

$$U_x = M(i_x - p v_x).$$

Энтальпия пара

$$I_x = M i_x = 40,8 (798,3 + 1987 * 0,9) = 40,8 * 2586,3 = 105 521 \text{ кДж}.$$

Следовательно,

$$U_x = 40,8 (2586,3 - 12 * 10^5 * 0,147 / 1000) = 40,8 * 2409,9 = 98 324 \text{ кДж}.$$

Энтропия пара

$$S_x = M s_x = M [s' + (s'' - s') x] = 40 [2,216 + 0,9 (6,523 - 2,216)] = 40,8 * 6,092 = 248,6 \text{ кДж/град}.$$

9.4. Определить количество тепла, затрачиваемого на перегрев 1 кг сухого насыщенного пара при 90 бар до 500°C.

Решение

Из таблицы «Вода и перегретый водяной пар» находим:

$$i'' = 2743 \text{ кДж/кг}; \quad i = 3386 \text{ кДж/кг}.$$

Следовательно, теплота перегрева пара

$$q_n = i - i'' = 3386 - 2743 = 643 \text{ кДж/кг}.$$

9.5. В паровом котле с объемом $V = 12 \text{ м}^3$ находятся 1800 кг воды и пара при давлении 110 бар и температур насыщения. Определить массы воды и сухого насыщенного пара находящиеся в котле.

Решение

Обозначим массы воды и пара соответственно через M_B и M_{Π} (в кг). Удельный объем кипящей воды равен $v' \text{ м}^3/\text{кг}$, а удельный объем сухого насыщенного пара – $v'' \text{ кг/м}^3$. Следовательно, объем, занимаемый водой:

$$M_B v' \text{ м}^3,$$

а объем, занимаемый паром:

$$M_{\Pi} v'' \text{ м}^3.$$

Суммарный объем:

$$V = M_B v' + M_{\Pi} v''.$$

Но так как

$$M_B + M_{\Pi} = M,$$

то

$$V = (M - M_{\Pi})v' + M_{\Pi}v'' = Mv' + M_{\Pi}(v'' - v').$$

Из этого выражения:

$$M_{\Pi} = (V - Mv') / (v'' - v').$$

Из таблицы «Насыщенный водяной пар (по давлениям)» получаем:

$$v' = 0,001489 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad v'' = 0,01598 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

следовательно, масса пара

$$M_{\Pi} = (12 - 1800 * 0,001489) / (0,01598 - 0,001489) = 643,2 \text{ кг.}$$

А масса воды

$$M_{\text{В}} = 1800 - 643,2 = 1156,8 \text{ кг.}$$

Задача может быть решена и другим путем. Если в паровом котле при рассматриваемых условиях находилась бы только вода, то масса ее была бы равна:

$$M_{\text{В}} = V_{\text{В}} \rho' = V_{\text{В}} / v' = 12 / 0,001489 = 8059 \text{ кг.}$$

В действительности масса воды меньше на

$$8059 - 1800 = 6259 \text{ кг,}$$

так как плотность воды при давлении 110 бар больше плотности пара при том же давлении на

$$671,58 - 62,58 = 609 \text{ кг/м}^3 \text{ } (\rho' = 671,58 \text{ кг/м}^3; \rho'' = 62,58 \text{ кг/м}^3).$$

Следовательно, объем пара в котле:

$$V_{\Pi} = 6259 / 609 = 10,277 \text{ м}^3$$

а его масса:

$$M_{\Pi} = 62,58 * 10,277 = 643,1 \text{ кг.}$$

Вода занимает объем

$$12 - 10,277 = 1,723 \text{ м}^3,$$

следовательно, ее масса:

$$671,58 * 1,723 = 1157,1 \text{ кг.}$$

9.6. Задано состояние пара: $p = 16$ бар; $x = 0,96$. Определить остальные параметры, пользуясь диаграммой i_s , и сравнить их со значениями этих же параметров, вычисленных с помощью таблиц водяного пара и соответствующих формул.

Решение

На диаграмме $i-s$ находим точку А, характеризующую данное состояние (рис. 7). Проектируя ее, соответственно, на ось ординат и ось абсцисс, находим значение $i_x = 2716$ кдж/кг и $s_x = 6,26$ кдж/(кг*град). Величина удельного объема пара определяется по значению изохоры, проходящей через точку А: $v_x = 0,12$ м³/кг. Для определения температуры пара нужно от точки А подняться по изобаре $p = 16$ бар до верхней пограничной кривой (В). Через эту точку проходит изотерма $t = 202^\circ\text{C}$; эта температура и является температурой насыщенного пара при давлении 16 бар.

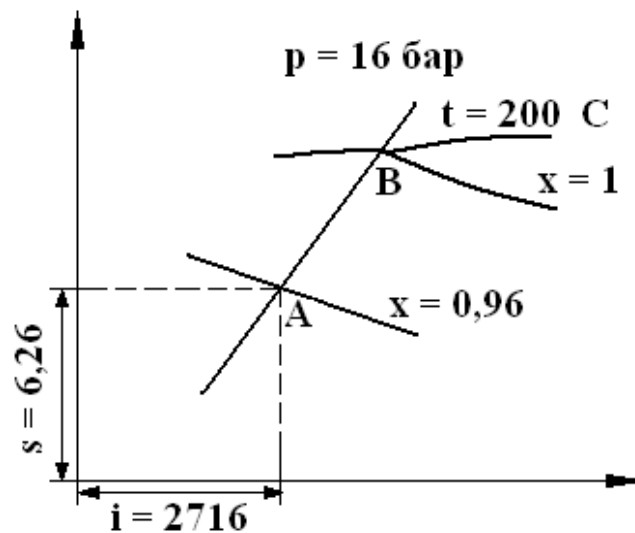


Рис. 7

Сопоставим полученные значения со значениями этих же параметров, вычисленных при помощи таблиц водяного пара и соответствующих формул.

По таблице «Насыщенный водяной пар (по давлениям)» для пара при давлении 16 бар находим:

$$\begin{aligned}
 t_n &= 201,36^\circ\text{C}; \\
 v'' &= 0,1238 \text{ м}^3/\text{кг}; \\
 i' &= 858,3 \text{ кдж/кг}; \\
 r &= 1935 \text{ кдж/кг}; \\
 s' &= 2,344 \text{ кдж}/(\text{кг}\cdot\text{град}); \\
 s'' &= 6,422 \text{ кдж}/(\text{кг}\cdot\text{град}).
 \end{aligned}$$

Энтальпию пара определяем по формуле:

$$i_x = i' + r x = 858,3 + 0,96 * 1935 = 2715,9 \text{ кДж/кг.}$$

Энтропию пара вычисляем по формуле:

$$s_x = s' + (s'' - s') x = 2,344 + (6,422 - 2,344) * 0,96 = 6,2589 \text{ кДж/(кг*град).}$$

Значение удельного объема находим по формуле:

$$v_x = v'' x = 0,1238 * 0,96 = 0,1188 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Как видно, совпадение значений параметров вполне удовлетворительное.

9.7. В закрытом сосуде содержится 1 м^8 сухого насыщенного водяного пара при давлении 10 бар.

Определить давление, степень сухости пара и количество отданного им тепла, если он охладился до температуры 60°C .

Решение

Пользуясь таблицей «Насыщенный водяной пар (по температурам)», получаем при $t_2 = 60^\circ\text{C}$ давление пара

$$p = 0,19917 \text{ бар.}$$

Так как процесс происходит при постоянном объеме, то

$$v_1 = v_2 = v_1'' = 0,1946 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

По уравнению:

$$x_2 = v_1 / v_2''.$$

Пользуясь таблицей «Насыщенный водяной пар (по температурам)», находим

$$v_2'' = 7,678 \text{ м}^3/\text{кг,}$$

И таким образом,

$$x_2 = 0,1946 / 7,678 = 0,0253.$$

Количество тепла в изохорном процессе по формуле:

$$q_v = u_2 - u_1.$$

Определяем значения внутренней энергии пара в начале и в конце процесса:

$$u_1 = i_1 - p_1 v_1 = 2778 - 10 \cdot 10^5 \cdot 0,1946 / 1000 = 2583,4 \text{ кДж/кг.}$$

Значение i_2 определяется по формуле :

$$i_2 = i'_2 + r x_2 = 251,1 + 2358,8 \cdot 0,0258 = 310,8 \text{ кДж/кг.}$$

Следовательно,

$$u_2 = i_2 - p_2 v_2 = 310,8 - 0,19917 \cdot 10^5 \cdot 0,1946 / 1000 = 306,9 \text{ кДж/кг.}$$

Таким образом,

$$q_v = u_2 - u_1 = 306,9 - 2583,4 = -2276,5 \text{ кДж/кг.}$$

Так как в рассматриваемом процессе участвует 1 м^3 пара и плотность его по таблице «Насыщенный водяной пар (по давлениям)» при $p = 10$ бар равна

$$\rho = 5,139 \text{ кг/м}^3,$$

то

$$q'_v = \rho q_v = 5,139 (-2276,5) = -11\,699 \text{ кДж/м}^3.$$

9.8. 1 кг водяного пара при $p = 10$ бар и $t_1 = 240^\circ\text{C}$ нагревается при постоянном давлении до 320°C . Определить затраченное количество тепла, работу расширения и изменение внутренней энергии пара.

Решение

Количество тепла в изобарном процессе по уравнению:

$$q_p = i_2 - i_1.$$

Так как при $p = 10$ бар температура насыщения $t_n = 179,88^\circ\text{C}$, то пар заданных параметров перегретый. Пользуясь таблицами перегретого пара, получаем:

$$q_p = i_2 - i_1 = 3091 - 2918 = 173 \text{ кДж/кг.}$$

Работа расширения по формуле:

$$l = p(v_2 - v_1)$$

или, пользуясь таблицей «Вода и перегретый водяной пар»,

$$l = 10 \cdot 10^5 (0,2677 - 0,2274) = 40300 \text{ Дж/кг} = 40,3 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение внутренней энергии проще всего определится из уравнения первого закона термодинамики:

$$u_2 - u_1 = q - l = 173,0 - 40,3 = 132,7 \text{ кДж/кг.}$$

9.9. 2 кг пара, занимающие при $p = 8$ бар объем $V_1 = 0,15 \text{ м}^3$, изотермически расширяются до $V_2 = 0,35 \text{ м}^3$. Определить работу расширения, количество подведенного тепла и степень сухости пара.

Решение

Определяем удельный объем пара:

$$v_1 = V_1 / M = 0,15 / 2 = 0,075 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$v_2 = V_2 / M = 0,35 / 2 = 0,175 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

При $p_1 = 8$ бар удельный объем

$$v'' = 0,2403 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Так как v_1 и v_2 меньше v'' , то пар в начальном и конечном состояниях влажный. Степень сухости определяется из уравнения:

$$x_1 = (v_1 - v') / (v'' - v') = (0,075 - 0,001) / (0,2403 - 0,001) = 0,309,$$

$$x_2 = (v_2 - v') / (v'' - v') = (0,175 - 0,001) / (0,2403 - 0,001) = 0,727.$$

Работа расширения и количество подведенного тепла могут быть определены по формулам изобарного процесса, так как рассматриваемый изотермический процесс, протекающий в области влажного пара, одновременно является процессом изобарным. Следовательно, работа расширения определяется по уравнению:

$$L = M_p(V_2 - V_1) = 2 \cdot 8 \cdot 10^5 (0,35 - 0,15) = 320000 \text{ дж} = 320 \text{ кдж},$$

а подведенное тепло – по уравнению:

$$Q = M(i_2 - i_1) = M_r (x_2 - x_1) = 2 \cdot 2048(0,727 - 0,309) = 1712 \text{ кдж}.$$

Количество подведенного тепла может быть также определено по формуле изотермического процесса:

$$Q = MT (s_2 - s_1),$$

где T – температура насыщения при данном давлении в °К, а s_1 и s_2 – энтропия влажного насыщенного пара в начальном и конечном состояниях, определяемая по выше указанному уравнению:

Так как

$$s_1 = s' + (s'' - s')x_1;$$

$$s_2 = s' + (s'' - s')x_2;$$

то

$$s_2 - s_1 = (s'' - s')(x_2 - x_1),$$

где s и s'' – энтропии кипящей воды и сухого насыщенного пара при данном давлении.

Таким образом,

$$Q = MT (s'' - s')(x_2 - x_1) = 2 \cdot 443,42 (6,663 - 2,046) (0,727 - 0,309) = 1711,5 \text{ кдж}.$$

9.2 Задачи для самостоятельного решения

9.1. Манометр парового котла показывает давление $p = 1,5$ бар. Показание барометра равно 764 мм рт. ст. Считая пар сухим насыщенным, определить его температуру и удельный объем.

Отв. $t_n = 127,69^\circ \text{C}$; $v'' = 0,7133 \text{ м}^3/\text{кг}$.

9.2. Определить состояние водяного пара, если давление его $p = 22$ бар, а $t = 240^\circ \text{C}$.

Отв. Пар перегрет.

9.3. Водяной пар имеет параметры $p = 30$ бар, $t = 400^\circ \text{C}$. Определить значения остальных параметров.

Отв. $\rho = 10,07 \text{ кг/м}^3$, $u = 2931,1 \text{ кДж/кг}$.

9.4. Определить количество тепла, затрачиваемого на перегрев 1 кг влажного пара при давлении $p = 100$ бар и степени сухости $x = 0,98$ до температуры $t = 480^\circ \text{C}$.

Отв. $q_n = 621,6 \text{ кДж/кг}$.

9.5. В паровом котле с объемом $V = 15 \text{ м}^3$ находятся 4000 кг воды и пара при давлении 40 бар и температуре насыщения. Определить массы воды и сухого насыщенного пара, находящиеся в котле.

Отв. $M_{\text{п}} = 206 \text{ кг}$; $M_{\text{в}} = 3794 \text{ кг}$.

9.6. Пользуясь диаграммой i_s водяного пара, определить энтальпию пара: а) сухого насыщенного при давлении $p = 10$ бар; б) влажного насыщенного при $p = 10$ бар и $x = 0,95$; в) перегретого при $p = 10$ бар и $t = 300^\circ \text{C}$.

Отв. а) $i'' = 2778 \text{ кДж/кг}$; б) $i_x = 2677 \text{ кДж/кг}$; в) $i = 3048 \text{ кДж/кг}$.

9.7. Определить количество тепла, которое нужно сообщить 6 кг водяного пара, занимающего объем $0,6 \text{ м}^3$ при давлении 6 бар, чтобы при $v = \text{const}$ повысить его давление до 10 бар; найти также конечную степень сухости пара.

Отв. $x_2 = 0,505$; $Q_v = 2570 \text{ кДж}$.

9.8. 1 кг водяного пара при $p_1 = 16 \text{ бар}$ и $t_1 = 300^\circ\text{C}$ нагревается при постоянном давлении до 400°C . Определить затраченное количество тепла, работу расширения и изменение внутренней энергии пара.

Отв. $q_p = 223 \text{ кДж/кг}$; $l = 50,24 \text{ кДж/кг}$; $\Delta u = 172,8 \text{ кДж/кг}$.

9.9. 6 кг пара при давлении $p_1 = 10 \text{ бар}$ и степени сухости $x_1 = 0,505$ расширяются изотермически так, что в конце расширения пар оказывается сухим насыщенным. Определить количество тепла, сообщенного пару, произведенную им работу и изменение внутренней энергии.

Отв. $Q = 5984,6 \text{ кДж}$; $L = 577,8 \text{ кДж}$; $\Delta U = 5406,8$

10 ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

10.1 Примеры решения задач

10.1. В резервуаре, заполненном кислородом, поддерживают давление $p_1 = 50$ бар. Газ вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением 40 бар. Начальная температура кислорода 100°C . Определить теоретическую скорость истечения и расход, если площадь выходного сечения сопла $f = 20$ мм². Найти также теоретическую скорость истечения кислорода и его расход, если истечение будет происходить в атмосферу. В обоих случаях считать истечение адиабатным. Барометрическое давление принять равным 1 бар.

Решение

Отношение давлений составляет

$$p_2/p_1 = 40/50 = 0,8 > (p_2/p_1)_{\text{кр}} = 0,528.$$

Следовательно, скорость истечения меньше критической и определяется по формуле:

$$c = (2\gamma p_1 v_1 / (\gamma - 1) (1 - (p/p_1)^{\gamma - 1/\gamma}))^{1/2}.$$

Из характеристического уравнения:

$$v_1 = RT_1/p_1 = 259,8 \cdot 373 / 50 \cdot 10^5 = 0,0194 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Все остальные величины, входящие в формулу, известны. Подставляя их значения, получаем

$$c = ((2 \cdot 1,4 \cdot 50 \cdot 10^5 \cdot 0,0194 / 0,4) (1 - (40/50)^{0,4/1,4}))^{1/2} = 205 \text{ м/сек}.$$

Секундный расход найдем по формуле:

$$M = f((2\gamma p_1 / (\gamma v_1 - v_1)) ((p_2/p_1)^{2/\gamma} - (p_2/p_1)^{\gamma + 1/\gamma}))^{1/2}$$

Подставляя численные значения, получаем:

$$M = 0,175 \text{ кг/сек}.$$

При истечении в атмосферу отношение давлений

$$p_2/p_1 = 1/50 < (p_2/p_1)_{кр} = 0,528.$$

Следовательно, скорость истечения в этом случае будет равна критической, а расход будет максимальным. По формуле

$$c_{кр} = 1,08 (RT_1)^{1/2} = 336 \text{ м/сек.}$$

Максимальный расход определится по формуле:

$$M_{\text{шах}} = 0,686f (p_1/v_1)^{1/2}$$

$$M_{\text{шах}} = 0,686 * 0,00002(5000000/0,0194)^{1/2} = 0,22 \text{ кг/сек}$$

10.2. Воздух при давлении $p_1 = 10$ бар и температуре $t_1 = 300^\circ\text{C}$ вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением $p_2 = 1$ бар. Расход воздуха $M = 4$ кг/сек. Определить размеры сопла. Угол конусности расширяющейся части сопла принять равным 10° . Расширение воздуха в сопле считать адиабатным.

Решение

Площадь минимального сечения сопла определяем по формуле:

$$f_{\text{min}} = M_{\text{max}} v_{кр} / c_{кр}.$$

M_{max} , согласно условию, равен 4 кг/сек.

Удельный объем воздуха в минимальном сечении $v_{кр}$ находим из соотношения параметров адиабатного процесса:

$$v_{кр}/v_1 = (p_1/p_{кр})^{1/k}.$$

Значение v_1 определяем из начальных условий:

$$v_1 = R_1 T / p_1 = 0,164 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Критическое отношение давлений для воздуха:

$$(p_2/p_1)_{кр} = 0,528.$$

Следовательно, критическое давление, устанавливающееся в минимальном сечении сопла,

$$p_{кр} = 0,528p_1 = 0,528*10 = 5,28 \text{ бар};$$

$$v_{кр} = v_1 (p_1/p_{кр})^{1/k} = 0,259 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретическая скорость воздуха $c_{кр}$ в минимальном сечении по формуле:

$$c_{кр} = 1,08 (RT_1)^{1/2} = 1,08 (287*573)^{1/2} = 432 \text{ м/сек}.$$

Следовательно, площадь минимального сечения сопла должна быть

$$f_{min} = 4*0,259*10^6/432 = 2400 \text{ мм}^2.$$

Принимая сечение сопла круглым, находим диаметр наиболее узкой части:

$$d_{min} = (f_{min}/(\pi/4))^{1/2} = 55,4 \text{ мм}.$$

Площадь выходного сечения сопла по формуле:

$$f = Mv_2/c.$$

Удельный объем воздуха в выходном сечении:

$$v_2 = v_1 (p_1/p_2)^{1/k} = 0,164*10^{1/1,4} = 0,85 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Скорость истечения воздуха из сопла по уравнению:

$$c = (2kp_1v_1/k - 1(1 - (p_2/p_1)^{k-1/k}))^{1/2} = 744 \text{ м/сек},$$

и, следовательно, площадь выходного сечения сопла:

$$f = 4*0,87*10^6/744 = 4680 \text{ мм}^2,$$

а диаметр выходного сечения сопла:

$$d = (f/0,785)^{1/2} = (4680/0,785)^{1/2} = 77 \text{ мм}.$$

Расстояние между сечением сопла на выходе и наиболее узким сечением выбирается из конструктивных соображений; что касается длины расширяющейся части, то она определяется по формуле:

$$l = d - d_{min} / (2\text{tg}\alpha/2) = 77 - 55,4/2*0,0875 = 123 \text{ мм}.$$

10.3. Влажный пар при $p_1 = 16 \text{ ат}$ и $x_1 = 0,95$ вытекает из сопла Лавалья в среду с давлением $p_2 = 2 \text{ ат}$. Расход пара $M = 6 \text{ кг/сек}$. Определить действительную скорость истечения пара, а также сече-

ния сопла Лавалья (минимальное и выходное), если скоростной коэффициент сопла $\varphi = 0,95$.

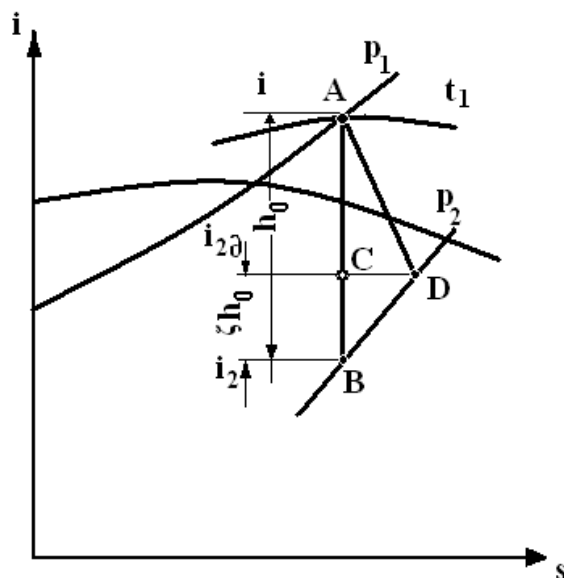


Рис. 8

Решение

В диаграмме is теоретический процесс истечения изображается отрезком АВ (см. рис. 8). При этом энтальпия пара в начальном и конечном состояниях соответственно равна:

$$i_1 = 644 \text{ ккал/кг}; \quad i_2 = 562 \text{ ккал/кг.}$$

Адиабатный перепад тепла:

$$h_0 = i_1 - i_2 = 644 - 562 = 82 \text{ ккал/кг.}$$

Коэффициент потери энергии по формуле:

$$\zeta = 1 - \varphi^2 = 1 - 0,95^2 = 0,1.$$

Потери кинетической энергии на трение:

$$\zeta h_0 = 0,1 * 82 = 8 \text{ ккал/кг.}$$

Действительное значение энтальпии пара после истечения:

$$i_{2d} = 562 + 8 = 570 \text{ ккал/кг.}$$

Находим в диаграмме *is* точку, характеризующую действительное состояние пара в конце расширения. Для этого из точки В откладываем вверх отрезок, соответствующий 8 ккал (обычный масштаб – 1 ккал/кг = 1 мм), и через полученную точку проводим горизонталь до пересечения с конечной изобарой p_2 . Получим точку D, для которой $x_2 = 0,857$.

Действительная скорость истечения по формуле:

$$c' = \varphi c = 91,53 \varphi (i_1 - i_2)^{1/2} = 787 \text{ м/сек.}$$

Эта скорость может быть также получена из формулы:

$$c' = 91,53 (i_1 - i_{2d})^{1/2} = 91,53 (644 - 570)^{1/2} = 787 \text{ м/сек.}$$

Площадь выходного сечения определяем из уравнения:

$$Mv_2 = fc'.$$

Удельный объем пара в конце расширения:

$$v_2 = v_2'' x_2 = 0,857 * 0,902 = 0,77 \text{ м}^3/\text{кг},$$

откуда

$$f = Mv_2 / c' = 6 * 0,77 / 787 = 58,7 \text{ см}^2.$$

Минимальное сечение сопла определяем по уравнению:

$$f_{\min} = Mv_{кр} / c_{кр}.$$

Для определения $v_{кр}$ и $c_{кр}$ необходимо знать $p_{кр}$, которое определяется из критического отношения давлений для пара рассматриваемого состояния. Примем его (ввиду высокой степени сухости пара) равным 0,577 (как для сухого насыщенного пара), тогда

$$p_{кр} = 16 * 0,577 = 9,23 \text{ ат.}$$

Удельный объем $v_{кр}$ будет равен xv'' , где $x = 0,91$ (по диаграмме *is*), а v'' для давления $p_{кр} = 9,23 \text{ ат}$ равен $0,2137 \text{ м}^3/\text{кг}$, следовательно,

$$v_{кр} = 0,91 * 0,2137 = 0,194 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Критическая скорость определяется по формуле:

$$c_{кр} = 91,53(i_1 - i_{кр})^{1/2}$$

Так как

$$i_{кр} = 620 \text{ ккал/кг},$$

то

$$c_{кр} = 91,53 (644 - 620)^{1/2} = 448 \text{ м/сек.}$$

Таким образом,

$$f_{\min} = Mv_{кр}/c_{кр} = 26,0 \text{ см}^2.$$

10.4. Давление воздуха при движении его по трубопроводу понижается вследствие местных сопротивлений от $p_1 = 8$ бар до $p_2 = 6$ бар. Начальная температура воздуха $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Определить изменение температуры и энтропии в рассматриваемом процессе. Какова температура воздуха после дросселирования?

Решение

Так как с достаточной точностью можно принять, что при дросселировании энтальпия воздуха в начальном и конечном состояниях одинакова, то есть $i_1 = i_2$, то конечную температуру воздуха можно принять равной начальной, то есть

$$t_2 = t_1 = 20^\circ\text{C}.$$

Приращение энтропии можно определить по формуле:

$$\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1)$$

и так как для рассматриваемого процесса,

$$T_2 = T_1$$

То

$$\Delta s = -R \ln(p_2/p_1) = R \ln(p_2/p_1) = 287 * 2,31 \lg(8/6) = 82,6 \text{ кдж/(кг/град)}$$

10.2 Задачи для самостоятельного решения

10.1. Определить теоретическую скорость адиабатного истечения азота и секундный расход, если $p_1 = 70$ бар, $p_2 = 45$ бар, $t_1 = 50^\circ\text{C}$, $f = 10$ мм².

Отв. $c = 282$ м/сек; $M = 0,148$ кг/сек.

10.2. К соплам газовой турбины подводятся продукты сгорания топлива при давлении $p_1 = 10$ бар и температуре $t_1 = 600^\circ\text{C}$. Давление за соплами $p_2 = 1,2$ бар. Расход газа, отнесенный к одному соплу, $M = 1440$ кг/ч. Определить размеры сопла. Истечение считать адиабатным. Угол конусности принять равным 10° . Принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха.

Отв. $d_{\min} = 19,4$ мм; $d = 25$ мм; $l = 32$ мм.

10.3. 1 кг воздуха при температуре $t_1 = 200^\circ\text{C}$ дросселируется от давления 12 ат до давления 7 ат. Определить энтальпию воздуха после дросселирования (принимая, что энтальпия его при 0°C равна нулю) и изменение энтропии в рассматриваемом процессе.

Отв. $i = 48,3$ ккал/кг; $\Delta s = 0,0376$ ккал/(кг* град) = $0,157$ кдж/(кг*град).

11 ЦИКЛЫ ПАРОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

11.1 Примеры решения задач

11.1. Паросиловая установка работает по циклу Ренкина. Параметры начального состояния: $p_1 = 20$ бар, $t_1 = 300^\circ\text{C}$. Давление в конденсаторе $p_2 = 0,04$ бар. Определить термический к.п.д.

Решение

Термический к. п. д. цикла Ренкина по формуле:

$$\eta_t = (i_1 - i_2)/(i_1 - i_2').$$

По диаграмме is находим:

$$\begin{aligned}i_1 &= 3019 \text{ кДж/кг}; \\i_2 &= 2036 \text{ кДж/кг}; \\i_2' &= 121,0 \text{ кДж/кг}.\end{aligned}$$

Точное значение i_2' находим по специальным таблицам:

$$i_2' = 121,4 \text{ кДж/кг}.$$

Подставляя найденные значения в эту формулу, получаем:

$$\eta_t = (3019 - 2036)/(3019 - 121,4) = 0,339.$$

11.2. В паросиловой установке, работающей при параметрах $p_1 = 110$ бар; $t_1 = 500^\circ\text{C}$; $p_2 = 0,04$ бар, введен вторичный перегрев пара при $p' = 30$ бар до начальной температуры $t' = t_1 = 500^\circ\text{C}$. Определить термический к.п.д. цикла с вторичным перегревом.

Решение

Изображаем заданный цикл в диаграмме is и по ней находим (рис. 9):

$$\begin{aligned}i_1 &= 3360 \text{ кДж/кг}; \quad i_3 = 2996 \text{ кДж/кг}; \quad i_4 = 3456 \text{ кДж/кг}; \\i_2 &= 2176 \text{ кДж/кг}; \quad i_2' = 121,4 \text{ кДж/кг}.\end{aligned}$$

Работа 1 кг пара в цилиндре высокого давления (до вторичного перегрева):

$$i_1 - i_3 = 3360 - 2996 = 364 \text{ кДж/кг.}$$

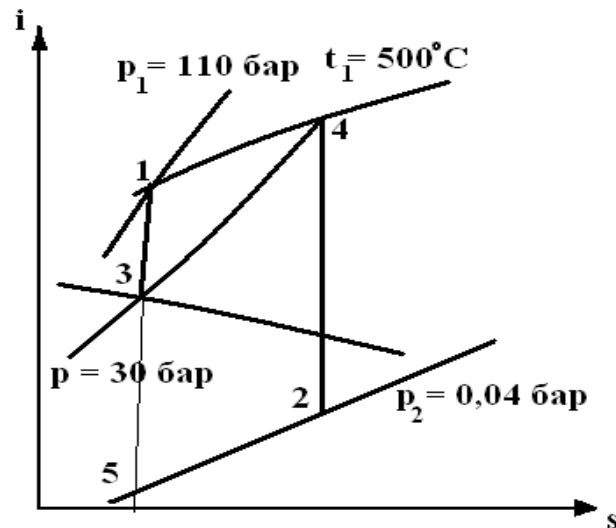


Рис. 9

Работа 1 кг пара в цилиндре низкого давления (после вторичного перегрева):

$$i_4 - i_2 = 3456 - 2176 = 1280 \text{ кДж/кг.}$$

Суммарная работа 1 кг пара:

$$l_0 = (i_1 - i_3) + (i_4 - i_2) = 364 + 1280 = 1644 \text{ кДж/кг.}$$

Подведенное в цикле тепло в паровом цикле

$$i_1 - i'_2 = 3360 - 121,4 = 3238,6 \text{ кДж/кг,}$$

а при вторичном перегреве

$$i_4 - i_3 = 3456 - 2996 = 460 \text{ кДж/кг.}$$

Количество тепла, затраченного в цикле:

$$(i_1 - i'_2) + (i_4 - i_3) = 3238,6 + 460,0 = 3698,6 \text{ кДж/кг.}$$

Термический к.п.д. цикла с вторичным перегревом:

$$\eta_t = ((i_1 - i_3) + (i_4 - i_2)) / ((i_1 - i'_2) + (i_4 - i_3)) = 1644 / 3698,6 = 0,445.$$

11.3. На заводской теплоэлектроцентрали установлены две паровые турбины с противодавлением мощностью 4000 кВт каждая. Весь пар из турбины направляется на производство, откуда он возвращается обратно в котельную в виде конденсата при температуре насыщения. Турбины работают с полной нагрузкой при следующих параметрах пара: $p_1 = 35$ бар; $t_1 = 435^\circ\text{C}$; $p_2 = 1,2$ бар. Принимая, что установка работает по циклу Ренкина, определить часовой расход топлива, если к.п.д. котельной равен 0,84, а теплота сгорания топлива $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 28\,470$ кДж/кг.

Решение

По диаграмме i_s находим:

$$\begin{aligned} i_1 &= 3302 \text{ кДж/кг}; \\ i_2 &= 2538 \text{ кДж/кг}; \\ i'_2 &= 439,4 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Удельный расход пара определяем по формуле:

$$d_0 = 3600 / (3302 - 2538) = 4,71 \text{ кг/(кВт*ч)}.$$

Часовой расход пара, потребляемого турбинами,

$$D_0 = Nd_0 = 8000 * 4,71 = 37\,680 \text{ кг/ч}.$$

Так как все это количество пара направляется на производство, то количество потребляемого им тепла будет

$$Q_{\text{пр}} = D_0(i_2 - i'_2) = 37\,680 (2538 - 439,4) = 79,075 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}.$$

Количество тепла, сообщенного пару в котельной,

$$Q = D_0 (i_1 - i'_2) = 37\,680 (3302 - 439,4) = 107,9 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч}.$$

Расход топлива в котельной определяется из уравнения:

$$Q = BQ_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{к.у.}}$$

Следовательно, часовой расход топлива

$$B = Q / Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{к.у.}} = 107,9 \cdot 10^6 / (28\,470 * 0,84) = 4511 \text{ кг/ч}.$$

11.4. Турбина мощностью 6000 кВт работает при параметрах пара: $p_1 = 35$ бар; $t_1 = 435^\circ\text{C}$; $p_2 = 0,04$ бар. Для подогрева питательной воды из турбины отбирается пар при $p = 1,2$ бар (рис. 10). Определить термический к.п.д. установки, удельный расход пара и тепла и улучшение термического к.п.д. в сравнении с такой же установкой, но работающей без регенеративного подогрева.

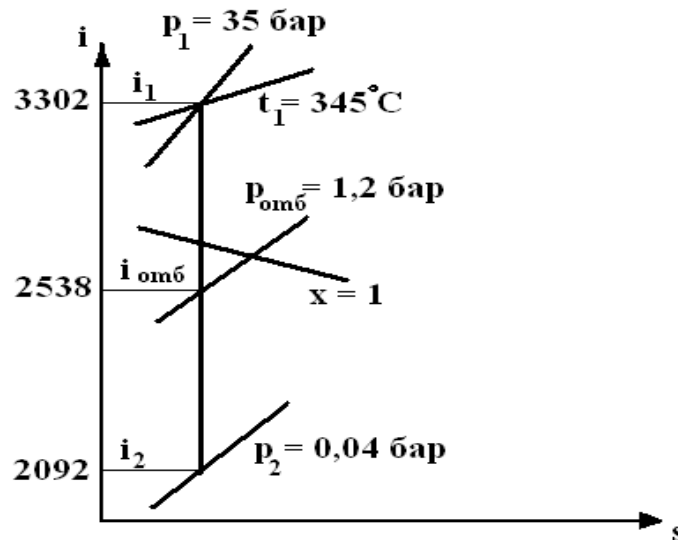


Рис. 10

Решение

Пользуясь диаграммой is (рис. 10) и таблицами водяного пара, находим:

$$\begin{aligned}
 i_1 &= 3302 \text{ кДж/кг}; \\
 i_{\text{омб}} &= 2538 \text{ кДж/кг}; \\
 i_2 &= 2092 \text{ кДж/кг}; \\
 i'_{\text{омб}} &= 439,4 \text{ кДж/кг}; \\
 i'_2 &= 121,4 \text{ кДж/кг}; \\
 t_{\text{омб.н}} &= 104,8^\circ\text{C}; \\
 t_2 &= 29^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

Определяем долю отбора α , считая, что конденсат нагревается в смешивающем подогревателе до температуры насыщения, соответствующей давлению в отборе, то есть $t_{\text{омб.н}} = 104,8^\circ\text{C}$.

По уравнению находим:

$$\alpha = (i'_{\text{ом6}} - i'_2)/(i_{\text{ом6}} - i'_2) = (439,4 - 121,4)/(2538 - 121,4) = 318/2416,6 = 0,13.$$

Полезная работа 1 кг пара определится по формуле:

$$l_{\text{оп}} = i_1 - i_2 - \alpha(i_{\text{ом6}} - i_2)$$

$$l_{\text{оп}} = 3302 - 2092 - 0,13(2538 - 2092) = 1152 \text{ кДж/кг.}$$

Удельный расход пара по формуле составит:

$$d_{\text{оп}} = 3600/h_{\text{оп}} = 3600/1152 = 3,12 \text{ кг/(кВт*ч)}.$$

Удельный расход тепла:

$$q_{\text{оп}} = d_{\text{оп}}(i_1 - i'_{\text{ом6}}) = 3,12(3302 - 439,4) = 8938 \text{ кДж/(кВт*ч)}.$$

Термический к.п.д. регенеративного цикла по формуле:

$$\eta_{\text{т. рек}} = l_{\text{оп}}/(i_1 - i'_{\text{ом6}}) = 1152/(3302 - 439,4) = 0,4.$$

При отсутствии регенеративного подогрева термический к.п.д.:

$$\eta_{\text{т}} = (i_1 - i_2)/(i_1 - i'_2) = 1210/3180 = 0,38.$$

Удельный расход пара и тепла при отсутствии регенерации соответственно составит:

$$d_0 = 3600/h_0 = 3600/1210 = 2,98 \text{ кг/(кВт*ч)}$$

$$q_0 = d_0(i_1 - i'_2) = 2,98(3302 - 121,4) = 9452 \text{ кДж/кВт*ч.}$$

Легко видеть, что удельный расход пара без регенерации меньше, чем при регенеративном подогреве. Однако эта величина не характеризует экономичности процесса. Показателем последней является или термический к.п.д., или удельный расход тепла, который при наличии регенерации всегда меньше удельного расхода тепла, чем при конденсационном режиме без регенерации.

Улучшение термического к.п.д. вследствие регенерации составит:

$$(0,4 - 0,38)100/0,38 = 5,26\%.$$

11.2 Задачи для самостоятельного решения

11.1. Определить термический к.п.д. и мощность паровой машины, работающей по циклу Ренкина, при следующих условиях: при впуске пар имеет давление $p_1 = 15$ бар и температуру $t_1 = 300^\circ\text{C}$; давление пара при выпуске $p_2 = 0,1$ бар; часовой расход пара составляет 940 кг/ч.

Отв. $\eta_t = 0,296$; $N = 220$ кВт.

11.2. На электростанции сжигается топливо с теплотой сгорания $Q_H^p = 30$ Мдж/кг. Определить удельный расход топлива на 1 кВт*ч q_3 , если известны следующие данные: $\eta_{кы} = 0,8$; $\eta_n = 0,97$; $\eta_t = 0,4$; $\eta_{oi} = 0,82$; $\eta_m = 0,98$; $\eta_r = 0,97$. Определить также удельный расход тепла на 1 кВт*ч.

Отв. $q_3 = 14,9$ Мдж/(кВт*ч); $b = 0,498$ кг/(кВт*ч).

11.3. Паросиловая установка работает при начальных параметрах $p_1 = 90$ атм и $t_1 = 450^\circ\text{C}$. Конечное давление $p_2 = 0,06$ атм. При $p_1 = 24$ атм введен вторичный перегрев до $t' = 440^\circ\text{C}$. Определить термический к.п.д. цикла с вторичным перегревом и влияние введения вторичного перегрева на термический к.п.д.

Отв. $\eta_t = 0,417$; $\Delta\eta \cdot 100 / \eta_t = 2,96\%$

11.4. Паротурбинная установка мощностью 12 000 кВт работает по циклу Ренкина при следующих параметрах пара: $p_1 = 35$ атм; $t_1 = 450^\circ\text{C}$; $p_2 = 2$ атм. Весь пар из турбины направляется на производство, откуда он возвращается в котельную в виде конденсата при температуре насыщения. Топливо, сжигаемое в котельной, имеет теплоту сгорания $Q_H^p = 29,3$ Мдж/кг, к.п.д. котельной установки $\eta_{к.у} = 0,85$. Определить часовой расход топлива. Сравнить его с тем расходом топлива, который был бы в случае отдельной выработки электрической энергии в конденсационной установке с давлением пара в кон-

денсаторе $p_2 = 0,04$ атм, а тепловой энергии в котельной низкого давления. К.п.д. котельной низкого давления принять таким же, как и к.п.д. котельной высокого давления.

Отв. $B_1 = 7220$ кг/ч; $B_2 = 10030$ кг/ч.

11.5. Турбина мощностью 24 000 кВт работает при параметрах пара: $p_1 = 26$ атм (25,5 бар); $t_1 = 420^\circ\text{C}$, $p_2 = 0,04$ атм (0,0392 бар). Для подогрева питательной воды из турбины отбирается пар при $p_0 = 1,2$ атм (1,18 бар). Определить термический к.п.д. и удельный расход пара. Определить также улучшение термического к.п.д. в сравнении с такой же установкой, но работающей без регенеративного подогрева.

Отв. $\eta_{tp} = 0,38$; $d_{op} = 3,32$ кг/(кВт*ч); $\eta_t = 0,361$; $\Delta\eta*100/\eta = 5,26\%$.

12 ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

12.1 Примеры решения задач

12.1. В компрессор воздушной холодильной установки поступает воздух из холодильной камеры давлением $p = 1$ бар и температурой $t_1 = -10^\circ\text{C}$. Адиабатно сжатый в компрессоре воздух до давления $p_1 = 5$ бар направляется в охладитель, где он при $p = \text{const}$ снижает свою температуру до $t_3 = +10^\circ\text{C}$. Отсюда воздух поступает в расширительный цилиндр, где расширяется по адиабате до первоначального давления, после чего возвращается в холодильную камеру. Отнимая тепло от охлаждаемых тел, воздух нагревается до $t_1 = -10^\circ\text{C}$ и вновь поступает в компрессор. Определить температуру воздуха, поступающего в холодильную камеру, теоретическую работу, затрачиваемую цикле, холодопроизводительность воздуха и холодильный коэффициент для данной установки и для установки, работающей по циклу Карно для того же интервала температур.

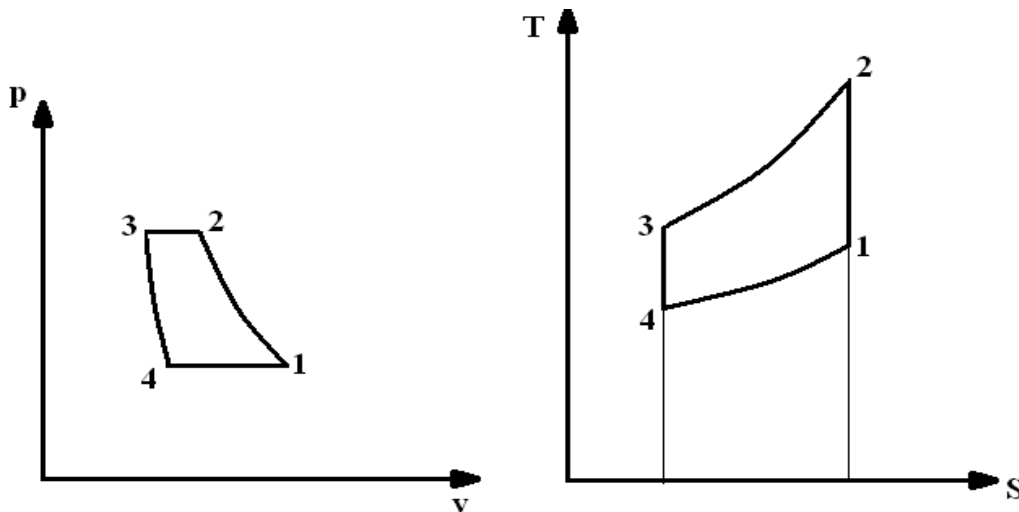


Рис. 11

Решение

Рассматриваемый цикл холодильной установки изображен в диаграммах p_v и T_s на рисунке 11. Температуру T_4 воздуха, поступающего в холодильную камеру, определяем из соотношения параметров адиабатного процесса 3-4.

$$T_4 = T_3(p_4/p_3)^{(k-1)/k} = T_3(p_1/p_2)^{(k-1)/k} = 283(1/5)^{0,286} = 283/1,583 = 179^\circ\text{К}.$$

Температуру T_2 сжатого воздуха, выходящего из компрессора, определяем из соотношения параметров процесса 1-2:

$$T_2 = T_1(p_1/p_2)^{(k-1)/k} = 263*5^{0,286} = 263*1,583 = 416^\circ\text{К}$$

Работа, затраченная в цикле, равна разности работ: затраченной в компрессоре и полученной в расширительном цилиндре.

Работа, затраченная в компрессоре, определяется по формуле:

$$l_k = c_{pm}(T_2 - T_1) = 1,012(416 - 263) = 154,8 \text{ кДж/кг} = 37 \text{ ккал/кг}.$$

Работа, полученная в расширительном цилиндре, находится по формуле:

$$l_{p.ц} = c_{pm}(T_3 - T_4) = 1,012(283 - 179) = 105,2 \text{ кДж/кг} = 25,1 \text{ ккал/кг}.$$

Следовательно, работа цикла

$$l_0 = l_k - l_{p.ц} = 154,8 - 105,2 = 49,6 \text{ кДж/кг} = 11,8 \text{ ккал/кг}.$$

Удельная холодопроизводительность воздуха по формуле:

$$q_0 = c_{pm}(T_1 - T_4) = 1,012(263 - 179) = 85 \text{ кДж/кг} = 20,3 \text{ ккал/кг}.$$

Холодильный коэффициент установки:

$$\varepsilon = q_0 / l_0 = 85/49,6 = 1,71.$$

Холодильный коэффициент установки, работающей по циклу Карно для того же интервала температур:

$$\varepsilon_k = T_1 / (T_3 - T_1) = 263 / (283 - 263) = 263 / 20 = 13,15.$$

12.2. Компрессор аммиачной холодильной установки всасывает аммиачный пар при температуре $t_1 = -10^\circ\text{C}$ и степени сухости $x_1 = 0,92$ и сжимает его адиабатно до давления, при котором его температура $t_2 = 20^\circ\text{C}$ и степень сухости $x_2 = 1$. Из компрессора аммиачный пар поступает в конденсатор, в котором охлаждающая вода имеет на входе температуру $t'_в = 12^\circ\text{C}$, а на выходе $t''_в = 20^\circ\text{C}$. В редукционном (регулирующем) вентиле жидкий аммиак подвергается дросселированию до 3 бар, после чего он направляется в испаритель, из которого выходит со степенью сухости $x = 0,92$ и снова поступает в компрессор. Теплота, необходимая для испарения аммиака, заимствуется из рассола, имеющего на входе в испаритель температуру $t'_р = -2^\circ\text{C}$, а на выходе из него – температуру $t''_р = -5^\circ\text{C}$. Определить теоретическую мощность двигателя холодильной машины и часовой расход аммиака, рассола и охлаждающей воды, если холодопроизводительность установки $Q_0 = 58,15$ кдж/сек. Теплоемкость рассола принять равной $4,19$ кдж/(кг*град).

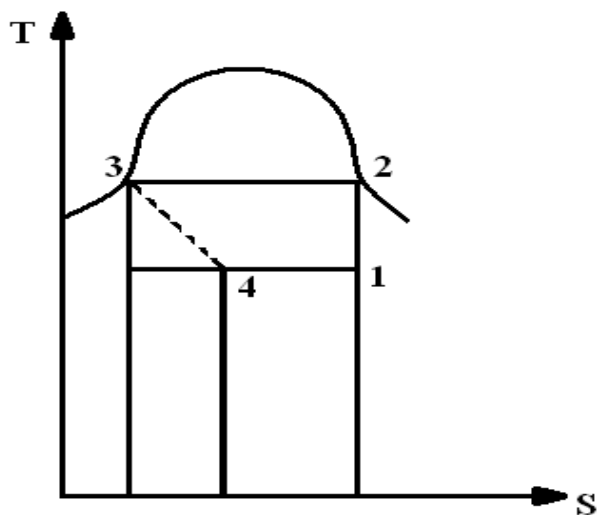


Рис. 12

Решение

Условный цикл аммиачной холодильной установки для данных, указанных в задаче, показан на рисунке 12. Работа, затраченная на компрессор, по уравнению:

$$l_k = i_2 - i_1.$$

Энтальпия пара, выходящего из компрессора, поскольку он является сухим насыщенным, определяется непосредственно по таблице насыщенного пара аммиака:

$$i'' = i' = 1699,4 \text{ кДж/кг}; r_2 = 1186,9 \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпия влажного пара, всасываемого компрессором, определяется по формуле для влажного пара:

$$i_1 = i_x = i'_1 + r_1 x.$$

По таблице насыщенного пара аммиака находим:

$$i'_1 = 372,6 \text{ кДж/кг}; r_1 = 1296,6 \text{ кДж/кг},$$

откуда

$$i_1 = 372,6 + 1296,6 * 0,92 = 1565,5 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом, работа, затраченная на привод компрессора,

$$l_k = i_2 - i_1 = 1699,4 - 1565,6 = 133,8 \text{ кДж/кг}.$$

Для определения мощности двигателя холодильной машины необходимо знать количество холодильного агента (аммиака), всасываемого компрессором. Оно определяется из уравнения:

$$M_a = Q_0 / q_0.$$

Холодопроизводительность Q_0 аммиачной машины известна, а величина q_0 определяется по формуле:

$$q_0 = i_1 - i_4.$$

Так как процесс дросселирования (линия 3-4) характеризуется равенством начального и конечного значений энтальпии, то

$$i_4 = i_3 = i'_2 = 512,5 \text{ кДж/сек.}$$

Следовательно,

$$q_0 = 1565,5 - 512,5 = 1053 \text{ кДж/кг.}$$

Количество холодильного агента (аммиака)

$$M_a = 58,15 / 1053 = 0,0552 \text{ кг/сек.}$$

Таким образом, теоретическая мощность двигателя по формуле:

$$N_{\text{теор}} = M l_0 = 0,0552 * 133,8 = 7,39 \text{ кДж/сек} = 7,39 \text{ кВт.}$$

Потребное количество рассола по уравнению:

$$M_p = c(t'_p - t''_p).$$

При $c = 4,19 \text{ кДж/(кг*град)}$ равно

$$M_p = 58,15 / (4,19 [-2 - (-5)]) = 4,626 \text{ кг/с.}$$

Необходимое количество охлаждающей воды определяется из уравнения:

$$M_b = M_{ar} / (c(t''_b - t'_b)) = 0,0552 * 1186,9 / (4,19(20 - 12)) = 1,96 \text{ кг/сек.}$$

12.2 Задачи для самостоятельного решения

12.1. Воздушная холодильная установка имеет холодопроизводительность $Q = 200\ 000 \text{ ккал/ч}$. Состояние воздуха, всасываемого компрессором, характеризуется давлением $p_1 = 1 \text{ ат}$ и температурой $t_1 = -10^\circ\text{C}$. Давление воздуха после сжатия $p_2 = 4 \text{ ат}$. Температура воздуха, поступающего в расширительный цилиндр, равна 20°C . Определить теоретическую мощность двигателя компрессора и расширительного цилиндра, холодильный коэффициент установки, рас-

ход холодильного агента (воздуха), а также количество тепла, передаваемого охлаждающей воде.

Отв. $N_{\text{дв}} = 114$ кВт; $N_{\text{к}} = 452$ кВт; $N_{\text{р.ц}} = 338$ кВт; $\varepsilon = 2,04$; $M_{\text{в}} = 12\ 650$ кг/ч; $Q = 297\ 700$ ккал/ч.

12.2. Холодопроизводительность воздушной холодильной установки $Q = 20\ 000$ ккал/ч. Определить ее холодильный коэффициент и потребную теоретическую мощность двигателя, если известно: максимальное давление воздуха в установке $p_2 = 5$ ат, минимальное давление $p_1 = 1,1$ ат, температура воздуха в начале сжатия $t_1 = 0^\circ\text{C}$, а при выходе из охладителя $t_3 = 20^\circ\text{C}$. Сжатие и расширение воздуха принять политропным с показателем политропы $m = 1,28$

Отв. $\varepsilon = 2,56$; $N_{\text{дв}} = 9,3$ кВт.

13 ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

13.1 Примеры решения задач

13.1. Определить влагосодержание воздуха при температуре $t = 60^\circ\text{C}$ и барометрическом давлении $B = 745$ мм рт. ст., если относительная влажность воздуха $\varphi = 60\%$.

Решение

По формуле

$$d = \rho_n / \rho_v.$$

А так как по уравнению

$$\varphi = p_n / p_n^*,$$

то

$$p_n = \varphi p_n^*.$$

p_n^* определяют по таблице насыщенного водяного пара для температуры $t = 60^\circ\text{C}$. Из этой таблицы $p_n^* = 0,2031$ атм и, следовательно,

$$p_n = 0,6 * 0,2031 = 0,1219 \text{ атм.}$$

По таблицам перегретого пара для $p = 0,1219$ атм и $t = 60^\circ\text{C}$ находим $v = 12,83$ м³/кг. Тогда

$$\rho_n = 1/12,83 = 0,078.$$

Парциальное давление воздуха

$$p_v = p - p_n = 745 / 735,6 - 0,1219 = 1,0128 - 0,1219 = 0,8909 \text{ атм.}$$

Плотность влажного воздуха

$$\rho_v = p_v / RT = 0,874 * 10^5 / (287 (273 + 60)) = 0,914 \text{ кг/ м}^3,$$

поэтому

$$d = 0,078 / 0,914 = 0,0853 \text{ кг/кг} = 85,3 \text{ г/кг.}$$

Значение d можно также определить из формулы:

$$d = 622 * p_n / (B - p_n) = 622 * 0,1219 / 0,8979 = 85,1 \text{ г/кг.}$$

13.2. Наружный воздух, имеющий температуру $t = 20^\circ\text{C}$ и влагосодержание $d = 6 \text{ г/кг}$, подогревается до температуры 45°C . Определить относительную влажность наружного и подогретого воздуха. Барометрическое давление принять равным 1 ат .

Решение

Относительная влажность воздуха определяется по формуле:

$$\varphi = p_n / p_n^*$$

Величина p_n^* определяется по таблицам насыщенного пара и при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ составляет

$$p_n^* = 0,02383 \text{ ат.}$$

Парциальное давление водяного пара в воздухе при ином барометрическом давлении является функцией только влагосодержания и определяется по формуле:

$$p_n = p d / (622 + d) = 1 * 6 / 628 = 0,0096 \text{ ат.}$$

Следовательно,

$$\varphi_1 = 0,0096 * 100 / 0,02383 = 40\%.$$

В процессе подогрева влагосодержание воздуха не изменяется. Следовательно, остается неизменным и парциальное давление пара. Давление насыщения p_n^* при температуре $t = 45^\circ\text{C}$ по таблицам насыщенного водяного пара составит

$$p_n^* = 0,09771 \text{ ат,}$$

поэтому

$$\varphi_2 = 0,0096 * 100 / 0,0977 = 9,8\%.$$

13.2 Задачи для самостоятельного решения

13.1. Задано состояние влажного воздуха $t_b = 80^\circ\text{C}$, $p_n = 0,15 \text{ ат}$. Определить относительную влажность, влагосодержание и плотность. Барометрическое давление $B = 745 \text{ мм рт. ст.}$

Отв. $\varphi = 0,31$; $d = 108 \text{ г/кг}$; $\rho = 0,925 \text{ кг/м}^3$.

13.2. Газовый двигатель всасывает $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха при $t = 25^\circ\text{C}$. Относительная влажность воздуха $\varphi = 0,4$. Какое количество водяного пара всасывается двигателем в час?

Отв. $4,6 \text{ кг/ч}$.

13.3. Состояние влажного воздуха характеризуется температурой $t = 25^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $\varphi = 0,8$. Барометрическое давление $B = 745 \text{ мм рт. ст.}$ Найти парциальное давление пара в воздухе и его влагосодержание.

Отв. $p_n = 0,0258 \text{ ат}$; $d = 16,3 \text{ г/кг}$.

14 ТЕРМОДИНАМИКА ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

14.1 Примеры решения задач

14.1. Тепловой эффект реакции $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$, протекающей при постоянном давлении, $Q_p = 110\,598$ кДж/кмоль при $t = 25^\circ C$. Определить тепловой эффект этой реакции при той же температуре и постоянном объеме.

Решение

Зависимость тепловых эффектов Q_v и Q_p определяется уравнением:

$$Q_v = Q_p + \mu R \Delta n T.$$

Для рассматриваемой реакции

$$\Delta n = n_2 - n_1 = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2},$$

так как объемом углерода по сравнению с объемом газов можно пренебречь. Следовательно,

$$Q_v = 110\,598 + 8,315 / (0,5 * 298) = 111837 \text{ кДж/кмоль.}$$

14.2. Определить теплоту сгорания 1 кг CO и 1 кг H₂ при постоянном давлении и температуре $t = 25^\circ C$, если известно, что тепловые эффекты реакций сгорания CO в CO₂ и H₂ в H₂O при постоянном объеме и той же температуре соответственно равны: $Q_{vCO} = 281\,931$ кДж/кмоль. $Q_{vH_2} = 282\,287$ кДж/кмоль (с образованием воды).

Решение

Теплотой сгорания данного вещества называется количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы массы или единицы объема вещества. Очевидно, теплота сгорания CO есть не что иное, как тепловой эффект реакции, отнесенный к 1 кг или 1 м³ вещества при нормальных условиях. Следовательно, теплота сгорания CO при постоянном давлении

$$q_{pCO} = Q_{pCO} / \mu_{CO},$$

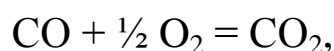
а теплота сгорания H_2 при постоянном давлении

$$q_{pH_2} = Q_{pH_2} / \mu_{H_2}.$$

Для нахождения Q_p для CO воспользуемся формулой:

$$Q_v = Q_p + \mu R \Delta n T.$$

Так как горение CO происходит по формуле:



то изменение числа молей составляет:

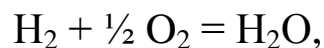
$$\Delta n = n_2 - n_1 = 1 - (1 + \frac{1}{2}) = - \frac{1}{2}.$$

И, следовательно,

$$Q_{pCO} = 281931 + 8,314 * 0,5 * 298 = 283170 \text{ кдж/кмоль}.$$

Точно так же находим Q_p для H_2 .

Так как горение водорода происходит по формуле:



то изменение числа кмолей в реакции

$$\Delta n = 0 - n_1 = 0 - (1 + \frac{1}{2}) = - 1,5.$$

(объемом воды, образовавшейся при горении, пренебрегаем) и, следовательно,

$$Q_{pH_2} = Q_{vH_2} - 8,314 \Delta n T = 282287 + 8,314 * 298 * 3/2 = 286000 \text{ кдж/кмоль}.$$

Теплота сгорания CO при $p = \text{const}$ составит:

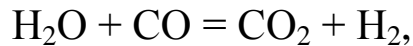
$$q_{pCO} = Q_{pCO} / \mu_{CO} = 283170 / 28 = 10113 \text{ кдж/кг (2416 ккал/кг)};$$
$$q_{pH_2} = Q_{pH_2} / \mu_{H_2} = 286000 / 2,016 = 141867 \text{ кдж/кг (33887 ккал/кг)}.$$

Нетрудно видеть, что разница между Q_p и Q_v не превышает 0,4-1,3%, и поэтому ею часто пренебрегают.

14.3. Из опытных данных известны тепловые эффекты при $p = \text{const}$ для реакций сгорания CO в CO₂ и H₂ в H₂O (пар), а именно:

$$Q_{p\text{CO}} = 283\,170 \text{ кДж/кмоль};$$
$$Q_{p\text{H}_2} = 241\,989 \text{ кДж/кмоль}.$$

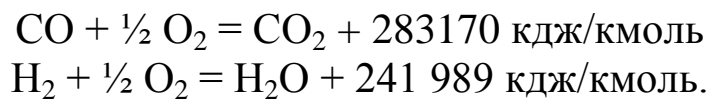
Определить теоретическим путем тепловой эффект реакции:



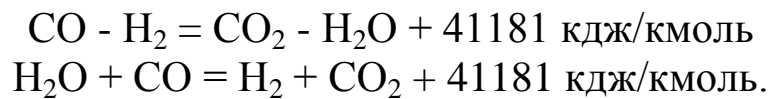
опытное определение которой затруднительно.

Решение

Составляем уравнения реакций, для которых тепловые эффекты известны:



После почленного вычитания получаем:



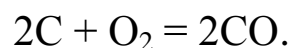
Следовательно, тепловой эффект реакции:

$$Q_p = 41181 \text{ кДж/кмоль} (9838 \text{ ккал/кмоль}).$$

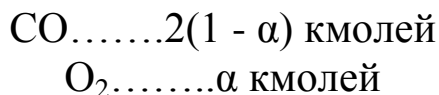
14.4. Определить степень диссоциации окиси углерода в газогенераторе при давлении в нём $p = 0,85 \text{ ат}$ и $T = 2000^\circ\text{К}$, если константа равновесия при этих условиях $K_p = 5,62 \cdot 10^{-13}$.

Решение

Диссоциации окиси углерода происходит по следующим реакциям:



Обозначим степень диссоциации CO через α , тогда количество CO уменьшится на 2α кмоль и, следовательно, неразложёнными останутся $2(1 - \alpha)$ кмоль CO. Таким образом, к моменту равновесия смесь будет состоять из:



Всего $2 - \alpha$ кмоль (выпадающим твёрдым углеродом пренебрегаем). Парциальные давления отдельных компонентов будут соответственно равны:

$$\begin{aligned} p_{\text{CO}} &= r_{\text{CO}}p = 2(1 - \alpha)p / (2 - \alpha), \\ p_{\text{O}_2} &= r_{\text{O}_2}p = \alpha p / (2 - \alpha). \end{aligned}$$

В этих выражениях r_{CO} и r_{O_2} – соответственно объёмные доли CO и O₂, а p – общее давление смеси газов.

По уравнению

$$K_p = p_{\text{O}_2} / p_{\text{CO}}^2 = \alpha p (2 - \alpha)^2 / [(2 - \alpha)4p^2 (1 - \alpha)^2] = \alpha(2 - \alpha) / (4(1 - \alpha)^2 p).$$

Считая α очень малой величиной, упрощаем последнюю формулу, принимая:

$$\begin{aligned} 2 - \alpha &\approx 2 \\ 1 - \alpha &\approx 1. \end{aligned}$$

Тогда

$$K_p = \alpha / 2p.$$

откуда

$$\alpha = K_p 2p = 5,62 \cdot 10^{-13} \cdot 2 \cdot 0,85 = 9,554 \cdot 10^{-13}.$$

14.5. Для реакции $3\text{H}_2 + \text{N}_2 = 2\text{NH}_3$ при $t = 450^\circ\text{C}$ константа равновесия $K_c = 0,518$. Начальные концентрации реагентов равны: $C_{\text{H}_2} = 5 \text{ кмоль/м}^3$; $C_{\text{N}_2} = 3 \text{ кмоль/м}^3$; $C_{\text{NH}_3} = 6 \text{ кмоль/м}^3$.

Определить максимальную работу реакции и ее направление.

Решение

Максимальная работа рассматриваемой реакции имеет вид:

$$L = \mu RT [\ln (C_{\text{H}_2}^3 \cdot C_{\text{N}_2} / C_{\text{NH}_3}^2) - \ln K_c].$$

Подставляя значения соответствующих величин, получаем:

$$\begin{aligned} L &= 8,314 \cdot 723 \cdot 2,3 (\ln(5^3 \cdot 3 / 6^2) - 0,518) = \\ &= 8,314 \cdot 723 \cdot 2,3 \cdot 1,303 = 18\,016 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

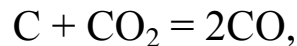
Так как $L > 0$, то реакция протекает слева направо.

14.2 Задачи для самостоятельного решения

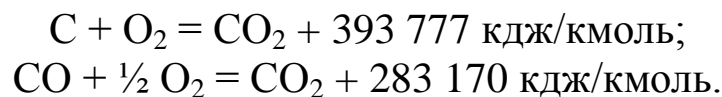
14.1. Определить тепловой эффект Q_v реакции $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$ при $t = 25^\circ\text{C}$, если тепловой эффект Q_p этой реакции при той же температуре равен 131390 кДж/кмоль.

Отв. $Q_v = 128\,912$ кДж/кмоль.

14.2. Определить тепловой эффект Q_p реакции

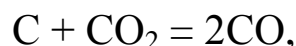


если известны тепловые эффекты для реакции полного сгорания углерода в углекислоту и для реакции горения окиси углерода:



Отв. $Q_p = -172\,580$ кДж/кмоль.

14.3. Определить степень диссоциации и состав смеси в момент равновесия реакции



если известно, что давление смеси $p = 9,8$ бар, константа равновесия при $T = 727^\circ\text{C}$, $K_p = 0,082$ и до реакции в сосуде находилось 6 кмоль СО.

Отв. $\alpha = 13,1\%$; $\text{CO} = 5,214$ кмоль.

14.4. Для реакции $\text{H}_2 + \text{J}_2 = 2\text{HJ}$ при $t = 445^\circ\text{C}$ константа равновесия $K = K_c = K_p = 0,02$. Определить направление реакции при этой температуре по заданным начальным концентрациям для следующих случаев:

1) $C_{\text{H}_2} = 1,5$ кмоль/ м^3 ; $C_{\text{J}_2} = 0,25$ кмоль/ м^3 ; $C_{\text{HJ}} = 10$ кмоль/ м^3 ;

2) $C_{\text{H}_2} = 1$ кмоль/ м^3 ; $C_{\text{J}_2} = 2$ кмоль/ м^3 ; $C_{\text{HJ}} = 10$ кмоль/ м^3 .

Отв. 1) $L = -1717$ кдж; реакция идет справа налево; 2) $L = 0$; реакция – в динамическом равновесии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бродов, Ю. М. Теплообменники энергетических установок : учебник для вузов / Ю. М. Бродов, К. Э. Арсон, С. И. Блинков, В. И. Березин. – Екатеринбург : Издательство «Сократ», 2002. – 968 с. – ISBN 5-7516-0534-9.
2. Клименко, А. В. Теплоэнергетика и теплотехника. Общие вопросы : справочник / А. В. Клименко, В. М. Зорин. – 3-е изд., перераб. – М. : Издательство МЭИ, 1999. – 528 с. – ISBN 5-9692-0070-0.
3. Костюк, А. Г. Турбины тепловых и атомных электрических станций : учебник для вузов / А. Г. Костюк, В. В. Фролов, А. Е. Булкин, А. Д. Трухний. – М. : Издательство МЭИ, 2001. – 488 с. – ISBN 5-93556-024-0.
4. Латыпов, Р. Ш. Вопросы рациональной эксплуатации газотурбинных установок : учебное пособие / Р. Ш. Латыпов. – Уфа : УГНТУ, 2000. – 99 с. – ISBN 5-91250-029-2.
5. Материалы НТС РАО «ЕЭС России» : протокол совместного заседания Научно-технического совета РАО «ЕЭС России»¹, Научного совета РАН по проблемам надежности и безопасности больших систем энергетики и Комиссии по газовым турбинам РАН от 28.03.01 № 8 по теме : «О готовности ГТЭ-110 к промышленному освоению».
6. Ривкин, С. Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара : справочник / С. Л. Ривкин, А. А. Александров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 80 с. – ISBN 5-832-13860-8.
7. Росляков, П. В. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях : справочник / П. В. Росляков, И. А. Закиров. – М. : Издательство МЭИ, 2001. – 144 с. – ISBN 5-7516-0568-3.

8. Стандарт предприятия : СТП ЧГТУ 04-96 : Курсовые и дипломные проекты. Общие требования к оформлению. – Челябинск : ЧГТУ, 1996. – 37 с.

9. Цанев, С. В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций : учебное пособие для вузов / С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремезов. – М. : Издательство МЭИ, 2002. – 584 с. – ISBN 5-0400-8892-2.

10. Шульман, В. Л. Методические основы природоохранной деятельности ТЭС : учебное пособие / В. Л. Шульман. – Екатеринбург : Издательство Уральского Университета, 2000. – 447 с. – ISBN 5-91250-028-4.

Учебное издание

Ольга Сергеевна Ануфриенко

ЗАДАЧИ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ

Практикум

Ведущий редактор
Е. В. Кондаева

Старший корректор
М. А. Сухарева

Ведущий инженер
Г. А. Чумак

Подписано в печать _____
Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 6,2.
Тираж _____ экз. Заказ _____

**Издательство Орского гуманитарно-технологического института (филиала)
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»**

462403, г. Орск Оренбургской обл., пр. Мира, 15 А