

3232



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания
к индивидуальным заданиям

Минск 2007

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Теплогасоснабжение и вентиляция»

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания
к индивидуальным заданиям
для студентов специальности 1-70 04 02
«Теплогасоснабжение, вентиляция
и охрана воздушного бассейна»

М и н с к 2 0 0 7

УДК 620.1.016.7 (075.8)

~~ББК 31.31я7~~

Т 38

Составители:

И.И. Станецкая, Е.С. Калиниченко, В.Д. Акельев

Рецензенты:

Р.И. Есьман, А.М. Протасевич

Методические указания предназначены для студентов дневной и заочной форм обучения специальности «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна», изучающих основы технической термодинамики. Издание призвано оказывать помощь в изучении и закреплении материала по основным вопросам курса: первый закон термодинамики; $h-s$ -диаграмма водяного пара; термодинамические процессы изменения состояния водяного пара; $h-d$ -диаграмма влажного воздуха; процессы охлаждения воздуха в сухих воздухоохладителях; истечение газа из сопла Лаваля.

© БНТУ 2007

Введение

Согласно учебному плану на изучение дисциплины «Техническая термодинамика» отводится 102 часа, из которых: лекции – 51, практические занятия – 17, лабораторные занятия – 34. Для всех видов занятий предусматривается самостоятельная работа в объеме 68 часов.

При выполнении домашних заданий необходимо хорошо усвоить теоретические основы дисциплины и научиться применять их при решении практических задач.

Выполняя задания, необходимо соблюдать следующие требования:

1. На титульном листе (см. образец) пояснительной записки необходимо указывать: фамилию и инициалы автора работы, шифр, наименование дисциплины, номер задания, вариант и дату.

2. Вариант работы должен соответствовать номеру шифра студента.

3. Обязательно выписать условия индивидуального задания.

4. Решения должны сопровождаться кратким пояснительным текстом, в котором указываются: ход решения задачи, расчетные формулы и входящие в них физические величины.

5. Графики и схемы тщательно выполняются на кальке или миллиметровой бумаге и вкладываются по тексту пояснительной записки. Если решение производится по диаграммам $h-s$ и $h-d$, то необходимо представить выкопировку из диаграмм с указанием стрелками хода решения. На графиках следует указывать основные числовые данные.

6. При использовании таблиц, номограмм, эмпирических формул и других справочных материалов нужно делать ссылку на литературный источник с указанием номера страницы, таблицы и т.д.

7. Пояснительная записка должна иметь поля для замечаний рецензента.

Образец титульного листа

Министерство образования Республики Беларусь
Белорусский национальный технический университет

Факультет энергетического строительства

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 1
по технической термодинамике
«Расчет сопла Лаваля»

Выполнил: студент 2 курса гр.110415
Зайцев Владимир Петрович

Проверил: канд. техн. наук, доцент
Береговой С.Н.

Минск 2007

ЗАДАНИЕ №1

Расчет термодинамических процессов изменения состояния идеального газа

Дано: в термодинамическом цикле рабочим телом является 1 кг воздуха с

$$c_p = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Требуется:

1) определить параметры: абсолютное давление (p), удельный объем (v), термодинамическую температуру (T), внутреннюю энергию (u), энтальпию (h) для основных точек цикла;

2) построить цикл в p - v -координатах; каждый процесс цикла должен быть построен не менее чем по трем промежуточным точкам;

3) найти показатель политропы (n), теплосмкость (c), изменение внутренней энергии (Δu), изменение энтальпии (Δh), теплоту (q), работу (l) для каждого процесса цикла;

4) определить работу цикла $l_{\text{ц}}$ и его термический КПД η_t .

Полученные данные поместить в таблицы 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Расчетные параметры цикла

Точки цикла	Давление p , МПа	Удельный объем v , м ³ /кг	Температура T , К	Внутренняя энергия u , кДж/кг	Энтальпия h , кДж/кг
1					
1'					
2					
2'					
3					
3'					
4					
4'					

Таблица 1.2 – Основные характеристики процессов цикла

Процессы	n	$c,$ кДж/(кг·К)	$\Delta h,$ кДж/кг	$\Delta u,$ кДж/кг	$l,$ кДж/кг	$q,$ кДж/кг
1-2						
2-3						
3-4						
4-1						

Значения параметров в точках 1...4 цикла выбрать из таблицы 1.3 по предпоследней цифре шифра, а номер варианта и рисунок цикла – по последней цифре.

Таблица 1.3 – Варианты задания

№ вариан- та	Предпоследняя цифра номера группы								
	1								
	p_1	p_2	p_3	ν_1	ν_2	t_1	t_2	t_3	n
	МПа			м ³ /кг		°С			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,8	2,0	1,2	0,12					
2	1,3	0,5				300		17	
3	0,2	1,2		0,45				300	
4	3,5		2,5			210		300	1,2
5	0,1	0,5				0		200	1,3
6	0,9	4,0				30		200	1,2
7	0,1	2,0		0,5				150	1,2
8	1,8	6,0	4,5			30			1,1
9	0,3	2,0		0,3				300	1,3
10	2,0		0,6		0,12	200			
11	0,2	2,0				50		200	
12	0,4	1,6	0,6			100			
13	0,3	0,8				27		100	
14	1,2	3,0				100		200	
15	5,0	1,8	0,6			300			

Продолжение таблицы 1.3

№ вариан- та	Предпоследняя цифра номера группы								
	1								
	p_1	p_2	p_3	ν_1	ν_2	t_1	t_2	t_3	n
	МПа			м ³ /кг		°С			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	0,7	2,0		0,12				200	
17	0,3	0,6				30		250	
18	0,4	1,0		0,3				300	
19	0,7		03		0,4	20			
20	0,3	1,0				25		250	
21	0,3	1,0		0,3				200	
22	1,2	1,4		0,08				150	
23		2,5		0,12		50		300	
24	1,2	6,0				50		320	
25	0,3	1,8				20		330	
26	0,6	1,2		0,1				200	
27	0,6		1,0	0,1				300	
28	2,5	1,0	0,8	0,15	0,12				

Продолжение таблицы 1.3

№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы								
	2								
	P_1	P_2	P_3	ν_1	ν_2	t_1	t_2	t_3	n
	МПа			м ³ /кг		°С			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,80	1,9	1,2	0,12					
2	1,4	0,4				300		17	
3	0,3	1,1		0,45				300	
4	3,6		2,4			210		300	1,2
5	0,2	0,4				0			1,3
6	0,9	5,0				30		200	1,2
7	0,3	2,0		0,5				150	1,2
8	2,8	4,0	3,0			30			1,1
9	0,4	1,9		0,3				300	1,3
10	2,1		0,7		0,12	220			
11	0,3	1,9				50		200	
12	0,5	1,5	0,6			100			
13	0,4	0,7				27		100	
14	1,3	2,9				100		200	
15	5,1	1,7	0,7			300			
16	0,8	1,9		0,12				200	
17	0,4	0,5				30		250	
18	0,5	0,6		0,3				300	
19	0,8		0,4		0,4	10			
20	0,4	0,9				25		250	
21	0,4	0,9		0,3				200	
22	1,3	1,5		0,08				150	
23		2,6		0,12		55		300	
24	1,3	5,9				50		320	
25	0,5	2,0				20		380	
26	0,6	1,0			0,03			200	
27	0,4	0,8		0,25				300	
28	2,5		0,8	0,05			75		

Продолжение таблицы 1.3

№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы								
	3								
	p_1	p_2	p_3	v_1	v_2	t_1	t_2	t_3	n
	МПа			м ³ /кг		°С			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,0	1,8	1,2	0,12					
2	1,5	0,3				300		17	
3	0,4	1,0		0,45				300	
4	3,7		2,3			210		300	1,2
5	0,3	0,5				0		200	1,3
6	0,9	3,5				30		200	1,2
7	0,6	2,3		0,5				150	1,2
8	2,5	4,5	3,5			30			1,2
9	0,5	1,8		0,3				300	1,3
10	2,2		0,8		0,12	230			
11	0,4	1,8				50		200	
12	0,1	1,4	0,6			100			
13	0,5	0,9				27		100	
14	11,4	2,8				100		200	
15	5,2	1,6	0,8			300			
16	0,9	1,8		0,12				200	
17	0,5	0,7				30		250	
18	0,6	0,8		0,3				300	
19	0,9		0,5		0,4	20			
20	0,5	0,8				25		250	
21	0,5	0,8			0,3			200	
22	1,4	1,7			0,08			500	
23		2,7		0,12		60		300	
24	1,4	5,8				50		320	
25	0,6	2,1				20		330	
26	0,6				0,03	30		200	1,2
27	0,4	0,8		0,2				300	
28	2,5	0,6	0,4	0,06					

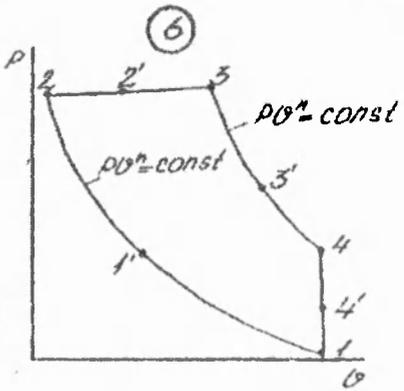
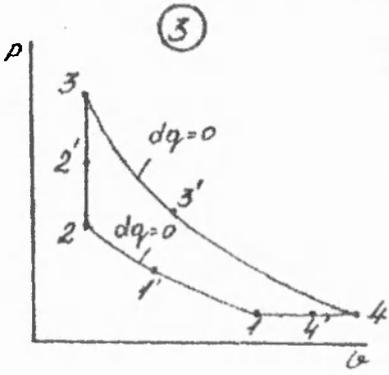
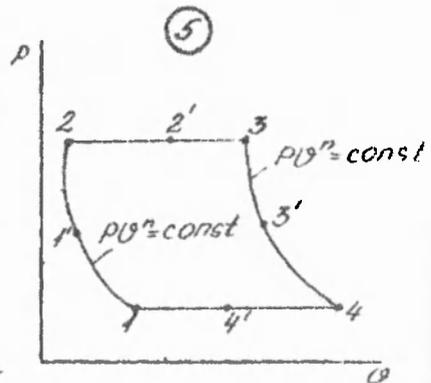
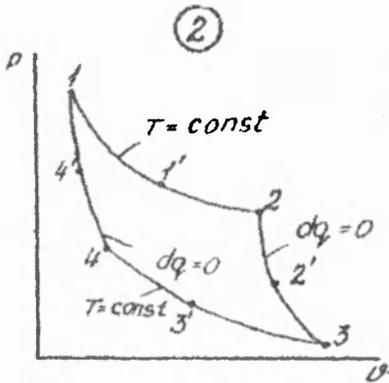
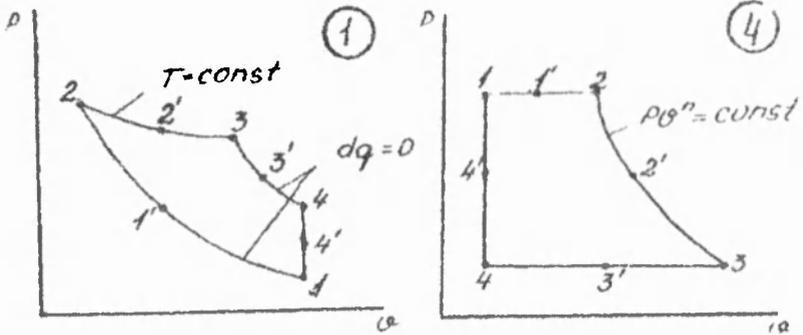
Продолжение таблицы 1.3

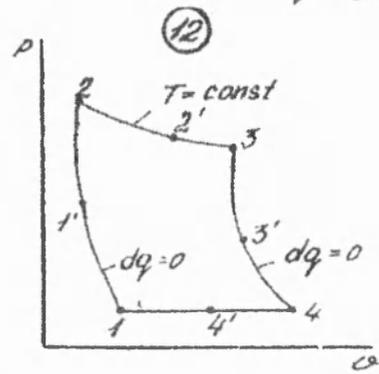
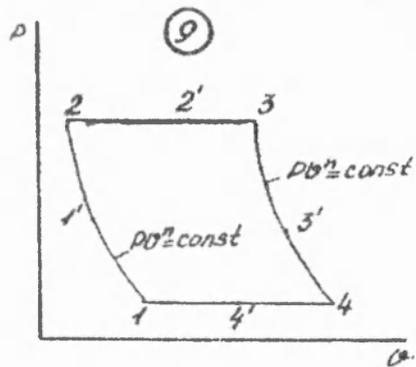
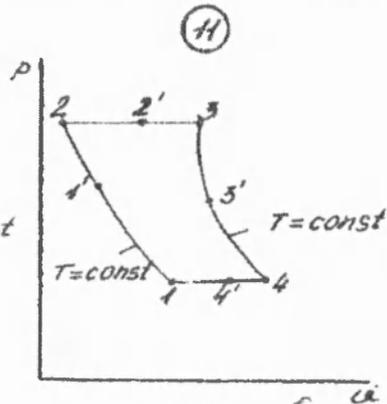
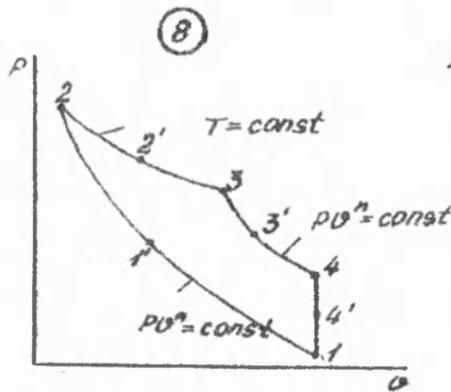
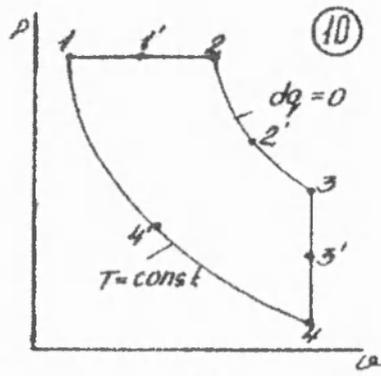
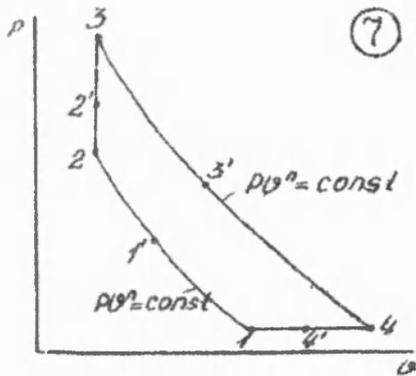
№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы								
	4								
	p_1	p_2	p_3	ν_1	ν_2	t_1	t_2	t_3	n
	МПа			м ³ /кг		°С			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,1	1,7	1,2	0,12					
2	1,5	0,3				300		17	
3	0,5	0,9		0,45				300	
4	3,8		2,2			210		300	1,2
5	0,4	0,6				0		200	1,3
6	0,3	2,0				30		200	1,2
7	0,6	2,2		0,5				150	1,2
8	3,8	6,0	4,5			30			1,1
9	0,6	1,7		0,3				300	1,3
10	2,3		0,9		0,12	240			
11	0,5	1,7				50		200	
12	0,3	1,3	0,6			100			
13	0,6	0,8				27		100	
14	1,5	2,7				100		200	
15	5,3	1,5	0,9			300			
16	1,0	1,7		0,12				200	
17	0,6	0,8				30		250	
18	0,7	0,9		0,3				300	
19	1,0		0,6		0,4	30			
20	0,6	0,7				25		250	
21	0,6	0,7		0,3				200	
22	1,5	1,8		0,08				500	
23		2,8		0,12		65		300	
24	1,5	5,7				50		320	
25	0,7	2,3				20		330	
26			3,2	0,35	0,1	50			
27	0,6		0,8	0,15				300	
28	2,5	1,0	0,8	0,05					

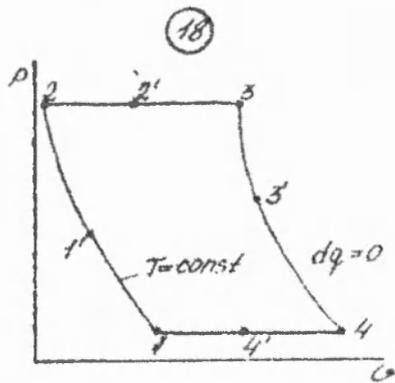
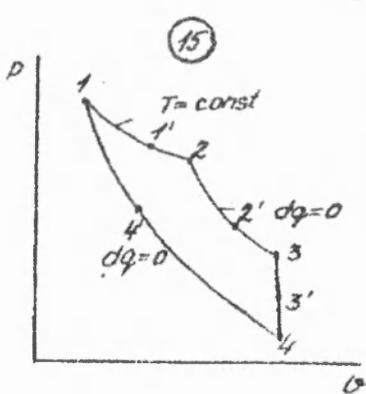
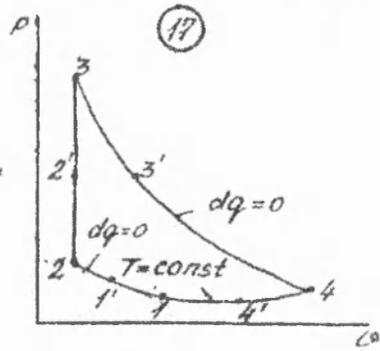
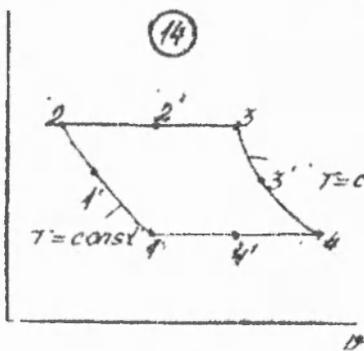
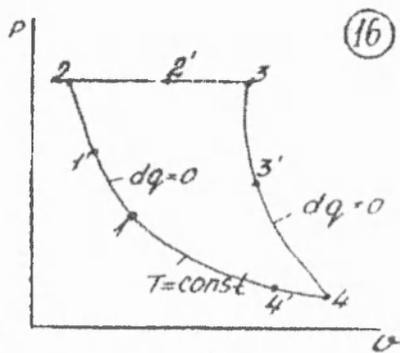
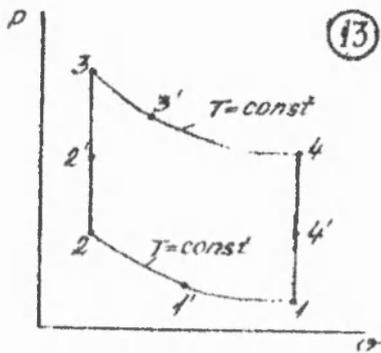
Окончание таблицы 1.3

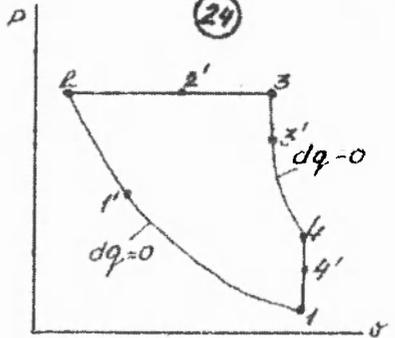
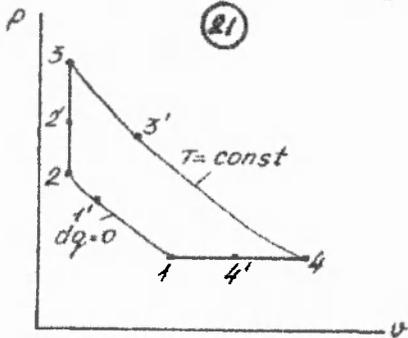
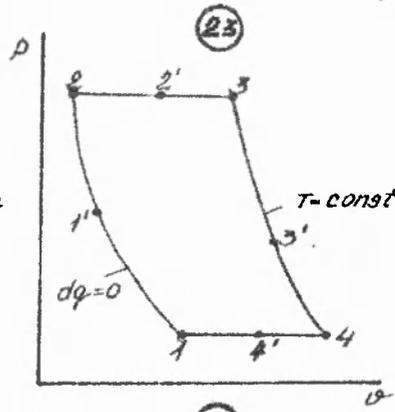
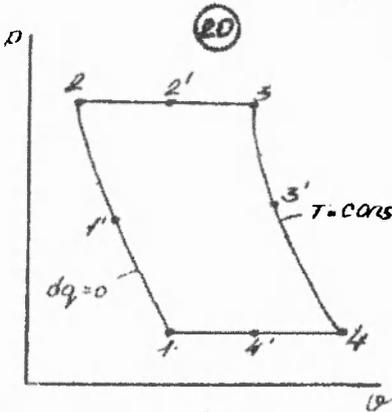
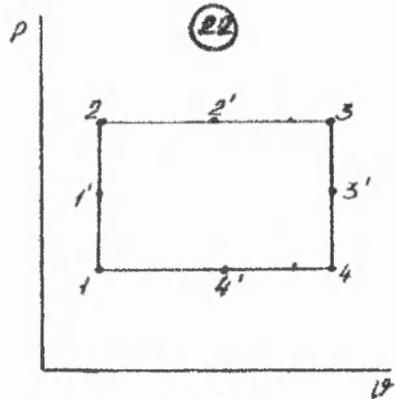
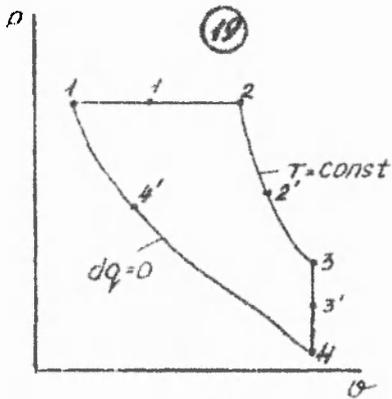
№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы								
	5								
	p_1	p_2	p_3	ν_1	ν_2	t_1	t_2	t_3	n
	МПа			м ² /кг		°С			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,7		0,9	0,12	0,08				
2	1,2	0,6				300		17	
3	0,5	1,1		0,45				300	
4	3,5		2,3			200		300	1,2
5	0,2	0,5				17		200	1,2
6	0,3	3,2				30		200	1,3
7	0,3	1,9		0,50				150	1,2
8	1,8	3,8	3,0	0,50		30			1,2
9	0,6	2,0		0,30				300	1,2
10	2,4		1,4		0,10	220			
11	0,6	0,9				0		200	
12	0,2	1,6	0,6			100			
13	0,4		0,7		0,11	27			
14	0,4	0,8				27			
15	3,5		1,2		0,09	300			
16	0,5				0,11	30		200	
17	0,5		1,2		0,09	30			
18	0,5			0,30	0,10			500	
19			0,5	0,08	0,12	10			
20	0,4	0,8		0,25				600	
21	0,4	0,6	1,0			75			
22		1,2		0,10		5		300	
23				0,12	0,08	5		700	
24	0,6	1,2		0,25				600	
25	0,4	1,8		0,25				330	
26	0,6	1,1			0,03			200	
27	0,4	0,8				20		300	
28	2,5	0,45	0,3		0,05				

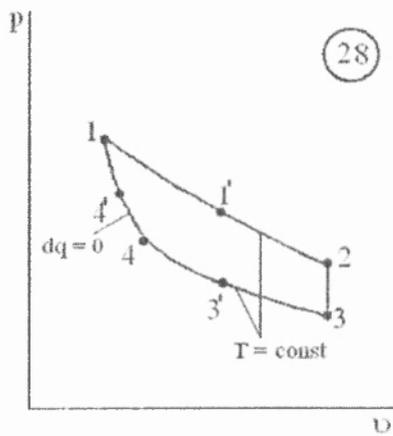
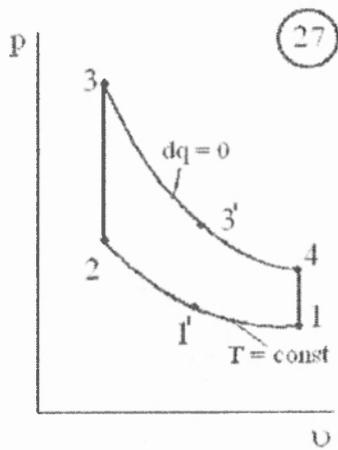
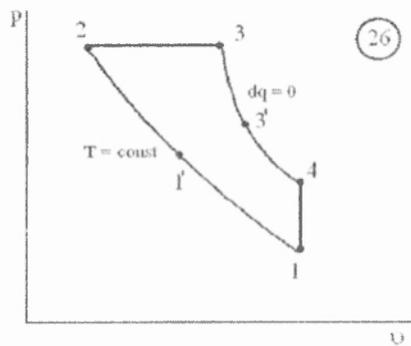
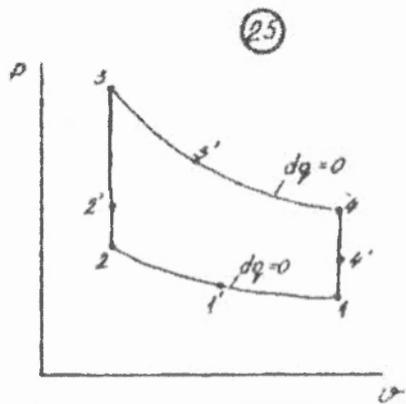
Варианты рисунков цикла











ЗАДАНИЕ №2

Расчет термодинамических процессов изменения состояния водяного пара

Дано: водяной пар с начальными параметрами, указанными в таблице 2.1, изменяет свое состояние по процессу, указанному в той же таблице, до одного из конечных значений параметров пара (h_2 , x_2 или t_2).

Требуется:

- 1) определить состояние пара в начале и конце процесса и все недостающие параметры (по h - s -диаграмме водяного пара);
- 2) определить работу и теплоту процесса;
- 3) найти изменение внутренней энергии (Δu), энтальпии (Δh) и энтропии (Δs) в процессе.

Процесс изменения состояния и параметры пара нанести на выкопировку из h - s -диаграммы.

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения представлены в приложениях 1 и 2.

Таблица 2.1 – Варианты задания

№ ва- ри- ан- та	Предпоследняя цифра номера группы									
	I									
	Начальные параметры							Конечные параметры		
	h_1 , кДж/кг	s_1 , кДж/(кг·К)	x_1	t_1 , °С	p_1 , МПа	v_1 , м ³ /кг	процесс	h_2 , кДж/кг	x_2	t_2 , °С
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	3500			510			$v = \text{const}$	0,9		
2		7	0,85				$dq = 0$			450
3				150	0,1		$dq = 0$	2600		
4			0,95	210			$v = \text{const}$		0,82	
5	3000	6,55					$p = \text{const}$	2500		
6					1,0	0,25	$dq = 0$			400
7			0,92			1,0	$p = \text{const}$			350
8		6,88		200			$v = \text{const}$		0,91	
9	2300					1,0	$dq = 0$		1,0	
10		6,0			2,0		$p = \text{const}$	2900		
11	3400			500			$v = \text{const}$		0,85	
12	3200			400			$p = \text{const}$		0,8	
13	3000			300			$dq = 0$		0,95	
14	2800			100			$p = \text{const}$		0,79	
15		7,5	0,9				$dq = 0$			400
16		6,5	0,8				$dq = 0$			300
17		6,25	0,75				$dq = 0$			425
18		5,75	0,70				$dq = 0$			325
19		5,52	0,65				$dq = 0$			400
20	3800					1,6	$p = \text{const}$		0,95	
21	3600					1,0	$p = \text{const}$		0,93	
22	4000					0,9	$p = \text{const}$		0,94	
23	3200					0,8	$p = \text{const}$		0,97	
24		7,5			1,5		$dq = 0$	2400		
25		7,0			0,5		$dq = 0$	2200		
26		5,5	0,7				$dq = 0$			300
27			1,0		2,0		$t = \text{const}$	2900		
28		6,6	0,97				$dq = 0$			280

Продолжение таблицы 2.1

№ ва- ри- ан- та	Предпоследняя цифра номера группы									
	2									
	Пачальные параметры							Конечные параметры		
	h_1 , кДж/кг	s_1 , кДж/(кг·К)	x_1	t_1 , °С	p_1 , МПа	v_1 , м ³ /кг	процесс	h_2 , кДж/кг	x_2	t_2 , °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		7,4			1,4		$dq = 0$	2350		
2	3100					0,75	$p = \text{const}$		0,96	
3	3900					0,81	$p = \text{const}$		0,93	
4	3500					0,9	$p = \text{const}$		0,92	
5	3900					1,5	$p = \text{const}$		0,94	
6		5,55	0,66				$dq = 0$			350
7		5,70	0,69				$dq = 0$			330
8		6,24	0,74				$dq = 0$			420
9		6,4	0,73				$dq = 0$			290
10		7,4	0,89				$dq = 0$			330
11	2700			180			$p = \text{const}$		0,74	
12	2900			280			$v = \text{const}$		0,90	
13	2900			290			$v = \text{const}$		0,94	
14	3100			450			$p = \text{const}$		0,81	
15	3350			450			$dq = 0$		0,84	
16		5,9			1,9		$p = \text{const}$	2850		
17	2400					1,1	$dq = 0$		0,95	
18		6,7		190			$v = \text{const}$		0,89	
19			0,90			1,1	$p = \text{const}$			350
20					0,9	0,25	$dq = 0$			390
21	2900	6,5					$p = \text{const}$	2500		
22			0,93	210			$v = \text{const}$		0,81	
23				140			$dq = 0$	2500		
24		7,25	0,83				$dq = 0$			450
25	3400			510			$v = \text{const}$		0,90	
26				310		0,9	$v = \text{const}$		0,87	
27	2500		0,91				$v = \text{const}$			350
28	2250				0,1		$p = \text{const}$		1,0	

Продолжение таблицы 2.1

№ Ва- ри- ан- та	Предпоследняя цифра номера группы									
	3									
	Начальные параметры							Конечные параметры		
h_1 , кДж/кг	s_1 , кДж/(кг·К)	x_1	t_1 , °С	p_1 , МПа	v_1 , м ³ /кг	процесс	h_2 , кДж/кг	x_2	t_2 , °С	
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	3700					1,5	$p = \text{const}$		0,94	
2	3500					0,9	$p = \text{const}$		0,9	
3	3900					0,8	$p = \text{const}$		0,97	
4	3950					0,7	$p = \text{const}$		0,91	
5		7,4			1,4		$dq = 0$	2300		
6		6,9			0,4		$dq = 0$	2100		
7	3300			430			$v = \text{const}$		0,8	
8		7,1	0,84				$dq = 0$			430
9				140	0,15		$dq = 0$	2300		
10			0,91	200			$p = \text{const}$		0,79	
11	2900	6,5					$p = \text{const}$	2400		
12			0,95		0,9		$dq = 0$			350
13			0,93			1,5	$p = \text{const}$			340
14		6,4		150			$v = \text{const}$		0,72	
15	3200					0,8	$dq = 0$		0,85	
16		5,9			1,8		$p = \text{const}$	2800		
17	3300			450			$dq = 0$		0,87	
18	3100			350			$p = \text{const}$		0,75	
19	2900			290			$v = \text{const}$		0,91	
20	2700			150			$p = \text{const}$		0,70	
21		7,1	0,8				$dq = 0$			390
22		6,0	0,7				$dq = 0$			290
23		6,5	0,8				$dq = 0$			425
24		5,5	0,6				$dq = 0$			300
25		5,75	0,7				$dq = 0$			350
26			0,86	100			$dq = 0$	3050		
27	2350	6,5					$p = \text{const}$	2850		
28	3000	8,1					$t = \text{const}$		1,0	

Продолжение таблицы 2.1

№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы									
	4									
	Начальные параметры							Конечные параметры		
h_1 , кДж/кг	s_1 , кДж/(кг·К)	x_1	t_1 , °С	p_1 , МПа	v_1 , м ³ /кг	процесс	h_2 , кДж/кг	x_2	t_2 , °С	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		7,0			0,5		$dq = 0$	2000		
2		8,0			1,4		$dq = 0$	2350		
3	3950					0,7	$v = \text{const}$		0,95	
4	3800					1,5	$p = \text{const}$		0,9	
5	3400			500			$v = \text{const}$		0,85	
6		7,5	0,85				$dq = 0$			400
7					0,1		$dq = 0$	3600		
8			0,90	200			$v = \text{const}$		0,82	
9	2800	6,5					$p = \text{const}$	2200		
10	3100				0,8		$dq = 0$			300
11			0,8			1,0	$p = \text{const}$			400
12		6,0		200			$v = \text{const}$		0,90	
13	2000					1,0	$dq = 0$		1,0	
14		6,0			1,0		$p = \text{const}$	2800		
15	3200			400			$dq = 0$		0,8	
16	3000			350			$p = \text{const}$		0,9	
17	2800			280			$v = \text{const}$		0,8	
18	2600			180			$p = \text{const}$		0,75	
19		7,0	0,9				$dq = 0$			400
20		6,8	0,8				$dq = 0$			300
21		6,0	0,75				$dq = 0$			425
22		6,25	0,7				$dq = 0$			325
23		5,7	0,65				$dq = 0$			380
24	3700					1,5	$p = \text{const}$		0,95	
25	3500					1,0	$p = \text{const}$		0,90	
26					0,5	0,4	$dq = 0$		0,82	
27	2250	6,1					$v = \text{const}$	3050		
28				160		5,0	$t = \text{const}$		0,91	

Окончание таблицы 2.1

№ вари- анта	Предпоследняя цифра номера группы									
	5									
	Начальные параметры							Конечные параметры		
h_1 , кДж/кг	s_1 , кДж/(кг К)	x_1	t_1 , °С	p_1 , МПа	v_1 , м ³ /кг	процесс	h_2 , кДж/кг	x_2	t_2 , °С	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		5,5	0,64				$p = \text{const}$		1,0	
2	2200	5,5					$p = \text{const}$			240
3	2350					1,0	$v = \text{const}$			240
4				240	0,1		$t = \text{const}$		0,84	
5		8,1				6,0	$t = \text{const}$		0,84	
6	2250					0,5	$v = \text{const}$			210
7		6,1				0,5	$v = \text{const}$			290
8		7,6		490			$p = \text{const}$	2400		
9			1,0		0,5		$p = \text{const}$			470
10			0,8			5,0	$dq = 0$		1,0	
11	2520					0,5	$dq = 0$			
12	2150					3,0	$v = \text{const}$			180
13		6,6	0,84				$dq = 0$			250
14	2000					1,5	$dq = 0$	31870		
15		6,0			1,0		$p = \text{const}$			340
16	2400	6,7					$p = \text{const}$			190
17	3700					1,5	$v = \text{const}$		1,0	
18				350		1,5	$v = \text{const}$	2300		
19		6,5	0,81				$v = \text{const}$	2750		
20	3500					0,9	$v = \text{const}$		0,91	
21		7,4			1,4		$dq = 0$	2300		
22		7,1	0,81				$dq = 0$	3550		
23	2400					0,5	$v = \text{const}$	3250		290
24	3100				1,0		$dq = 0$		0,86	
25	2800	8,1					$t = \text{const}$	2450		
26	2800					5,0	$t = \text{const}$		0,79	
27		5,65	0,71				$p = \text{const}$			180
28		6,0				0,5	$p = \text{const}$			200

ЗАДАНИЕ № 3

Расчет термодинамических процессов во влажном воздухе

Дано: в воздухоохладитель производительностью G ($\text{м}^3/\text{ч}$) при давлении p (Па) поступает воздух с начальными параметрами: температура t_1 ($^{\circ}\text{C}$), относительная влажность ϕ_1 (%) и охлаждается до температуры t_2 ($^{\circ}\text{C}$).

Требуется рассчитать:

- 1) парциальное давление водяного пара на входе и выходе из воздухоохладителя;
- 2) влагосодержание воздуха на входе и выходе;
- 3) энтальпию влажного воздуха на входе и выходе;
- 4) газовую постоянную влажного воздуха на входе и выходе;
- 5) плотность сухого воздуха;
- 6) плотность влажного воздуха на входе в охладитель;
- 7) количество выпавшей влаги (Δd), приходящейся на 1 кг сухого воздуха;
- 8) количество сухого воздуха, проходящего через воздухоохладитель;
- 9) количество теплоты, отводимое от всего воздуха, проходящего через охладитель в 1 секунду;
- 10) количество влаги, выпавшей на поверхности охладителя;
- 11) температуру точки росы влажного воздуха с исходными параметрами t_1 и ϕ_1 .

Процесс построить на hd -диаграмме. Расчетные параметры воздуха сравнить с данными, полученными по диаграмме.

Вариант задания выбрать по таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Варианты задания

№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы														
	1			2			3			4			5		
	Производительность установки G , м ³ /ч														
	20000			41000			72000			13000			32000		
	Давление влажного воздуха P , Па														
	101323,0			99900,0			99323,4			97990,2			97323,6		
Параметры влажного воздуха															
	t_1	φ_1	t_2	t_1	φ_1	t_2	t_1	φ_1	t_2	t_1	φ_1	t_2	t_1	φ_1	t_2
1	35	15	0	21	55	8	23	50	8	15	80	7	41	55	23
2	25	35	5	15	60	4	13	65	5	23	60	12	35	25	0
3	14	50	0	10	90	5	25	80	6	21	70	10	23	70	8
4	20	85	10	30	20	3	39	45	0	18	85	6	39	50	20
5	35	30	9	41	40	20	21	65	7	25	95	0	40	25	2
6	43	20	0	25	40	5	19	45	1	13	70	5	21	85	15
7	13	50	1	19	40	0	15	70	5	25	48	2	25	35	7
8	40	15	5	35	40	15	25	20	2	12	70	0	15	85	6
9	10	80	3	18	55	7	11	80	3	19	40	2	45	40	13
10	45	35	15	14	60	2	29	75	15	22	55	3	12	90	6
11	22	80	14	45	25	10	41	45	10	20	35	1	19	45	5
12	33	35	10	13	65	3	35	65	20	39	40	3	13	85	3
13	41	35	19	40	20	10	22	70	3	29	65	10	22	50	8
14	29	60	15	22	75	8	45	20	15	45	10	0	19	35	1
15	39	20	10	43	30	11	14	80	5	11	85	4	29	20	0
16	27	80	20	27	65	1	18	60	8	35	50	10	24	70	17
17	24	45	7	17	50	3	43	40	25	41	40	21	10	85	0
18	12	60	1	20	75	12	40	35	15	20	50	0	33	60	10
19	19	35	3	39	25	15	17	60	5	17	70	9	15	60	1
20	23	30	4	12	75	3	27	90	15	43	30	18	20	45	3
21	17	55	7	24	40	3	24	60	14	40	50	15	17	45	10
22	21	50	10	33	45	5	33	55	7	24	70	16	18	85	14
23	15	55	3	14	85	3	20	70	8	27	40	0	43	25	10
24	18	35	0	29	80	19	14	90	10	14	85	1	14	75	2
25	14	75	9	23	40	6	12	85	5	33	65	22	27	75	10
26	15	45	0	15	75	3	18	45	5	42	15	5	26	10	2
27	41	10	1	39	30	7	36	55	10	40	40	10	37	35	3
28	32	70	15	23	75	7	29	65	8	36	30	0	23	75	6

ЗАДАНИЕ № 4

Расчет сопла Лавалия

Дано: влажный воздух, имеющий начальные параметры: давление p_1 (МПа), температура t_1 (°С), относительная влажность φ_1 (%) (таблица 4.1), истекает из сопла Лавалия, имеющего угол конусности α (градус) (рисунок 2.1), в среду с давлением $p_c = 0,1$ МПа; секундный расход воздуха – m (кг/с), ψ – скоростной коэффициент сопла (см. таблица 4.1). Состав сухого воздуха выбрать в таблице 4.1.

Требуется:

- 1) определить скорость и термодинамические параметры воздуха на входе, в самой узкой части и на выходе из сопла (T , v , ω);
- 2) рассчитать размеры сопла Лавалия (d_{\min} , d_1 , l_2);
- 3) показать качественную картину изменения давления, скорости и удельного объема воздуха по длине сопла;
- 4) изобразить в T - s – координатах процесс адиабатного расширения воздуха в сопле с учетом трения.

Значения исходных величин для решения задания выбираются из таблиц 4.1 и 4.2 по предпоследней цифре номера группы, номер варианта – по последней цифре. В приложении 4 приведены молекулярные массы идеальных газов, входящих в состав сухого воздуха.

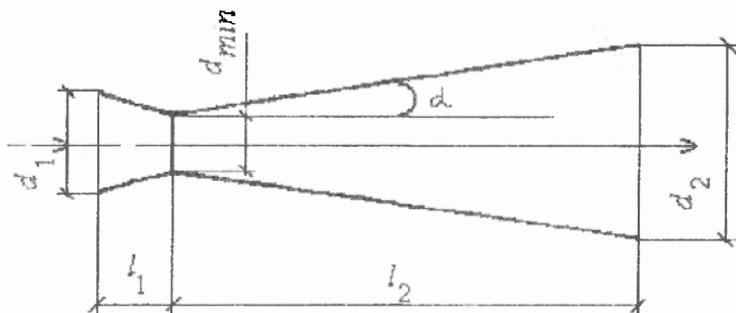


Рисунок 2.1. Схема сопла Лавалия

Таблица 4.1 – Варианты задания

№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы					
	1					
	m , кг/с	p_1 , МПа	t_1 , °С	ϕ_1 , %	α , градус	ψ
1	2	3	4	5	6	7
1	3,2	4,3	55	50	11	0,94
2	2,8	3,0	61	47		
3	4,2	4,7	68	43		
4	3,0	4,6	66	48		
5	2,1	3,5	60	55		
6	1,9	3,4	59	44		
7	4,0	4,5	63	58		
8	1,5	3,0	56	53		
9	2,9	3,2	62	49		
10	3,5	4,2	64	51		
11	2,5	3,1	50	45		
12	1,7	3,6	66	42		
13	3,9	4,6	59	50		
14	1,8	3,4	57	40		
15	2,3	4,4	63	44		
16	2,7	4,1	52	46		
17	3,8	4,2	61	55		
18	4,1	4,7	62	43		
19	3,4	3,8	58	54		
20	1,6	3,2	55	50		
21	2,4	3,3	60	58		
22	2,2	4,0	58	41		
23	2,5	3,4	42	51		
24	2,1	3,5	49	43		
25	2,7	4,0	35	60		
26	2,8	3,5	60	30		
27	2,5	4,2	24	36		
28	2,3	4,3	20	50		

Продолжение таблицы 4.1

№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы					
	2					
	m , кг/с	p_1 , МПа	t_1 , °С	ϕ_1 , %	α , градус	ψ
1	2	3	4	5	6	7
1	1,8	3,4	61	56	10	0,94
2	2,3	4,0	36	70		
3	2,7	4,2	40	30		
4	3,6	4,4	18	70		
5	3,4	3,8	26	50		
6	1,6	3,2	32	60		
7	2,4	3,3	36	50		
8	1,5	3,7	14	60		
9	1,7	3,9	20	40		
10	2,3	4,4	30	50		
11	2,7	4,1	34	30		
12	1,9	3,5	28	40		
13	1,8	3,4	30	70		
14	2,9	3,2	26	80		
15	2,8	4,3	40	50		
16	1,6	3,2	38	60		
17	2,5	3,1	36	20		
18	3,4	3,8	32	40		
19	3,0	4,6	18	60		
20	2,9	3,0	20	50		
21	1,9	2,9	16	80		
22	2,1	4,4	18	70		
23	3,2	4,3	14	60		
24	1,5	3,7	25	70		
25	4,0	4,5	16	40		
26	3,0	4,6	63	41		
27	3,2	4,3	50	47		
28	2,8	3,0	57	50		

Продолжение таблицы 4.1

№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы					
	3					
	m , кг/с	p_1 , МПа	t_1 , °C	ϕ_1 , %	α , градус	ψ
1	2	3	4	5	6	7
1	3,2	4,3	14	60	12	0,93
2	1,5	3,7	16	60		
3	4,0	4,5	16	40		
4	2,1	4,4	18	80		
5	1,5	3,0	20	40		
6	2,5	4,2	30	30		
7	2,3	4,3	22	30		
8	1,9	3,4	26	40		
9	1,8	3,2	26	60		
10	2,3	4,4	36	50		
11	1,7	3,6	36	70		
12	3,4	4,5	24	20		
13	3,3	4,3	24	30		
14	3,9	4,6	24	50		
15	2,4	3,3	12	50		
16	2,9	3,0	14	40		
17	2,7	4,1	16	20		
18	1,6	3,2	34	30		
19	4,0	4,7	38	30		
20	2,8	3,0	40	30		
21	1,9	3,4	44	40		
22	4,1	4,8	46	10		
23	3,2	4,3	50	48		
24	2,8	3,0	60	49		
25	4,2	4,7	65	44		
26	3,0	4,6	63	41		
27	1,8	3,4	61	70		
28	2,3	4,0	59	66		

Продолжение таблицы 4.1

№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы					
	4					
	m , кг/с	p_1 , МПа	t_1 , °С	φ_1 , %	α , градус	ψ
1	2	3	4	5	6	7
1	2,7	4,2	36	40	11	0,95
2	3,6	3,8	32	58		
3	4,2	4,1	61	48		
4	2,1	3,6	59	52		
5	1,9	3,4	26	50		
6	1,8	3,2	28	56		
7	3,2	4,1	55	50		
8	3,0	3,2	58	45		
9	1,8	3,5	61	50		
10	1,9	3,2	58	60		
11	2,8	3,4	49	50		
12	2,5	3,8	28	35		
13	1,9	3,4	28	45		
14	3,8	4,0	59	55		
15	4,1	4,5	61	45		
16	2,2	3,4	32	35		
17	2,5	3,8	26	45		
18	3,9	4,4	56	50		
19	1,9	3,5	49	45		
20	2,2	3,4	28	35		
21	2,4	3,6	61	60		
22	1,8	3,5	24	40		
23	1,7	3,6	19	25		
24	2,8	3,2	61	45		
25	2,3	3,9	59	65		
26	1,6	3,8	29	45		
27	1,5	3,6	22	60		
28	4,0	4,5	36	35		

Продолжение таблицы 4.1

№ варианта	Предпоследняя цифра номера группы					
	5					
	m, кг/с	p_1 , МПа	t_1 , °C	φ_1 , %	α , градус	ψ
1	2	3	4	5	6	7
1	3,8	3,8	50	55	13	0,96
2	3,2	4,2	61	45		
3	4,2	4,5	68	50		
4	4,1	4,2	52	45		
5	1,9	2,9	24	36		
6	1,8	3,2	56	40		
7	2,5	4,0	46	45		
8	2,2	3,8	56	50		
9	3,0	4,6	26	45		
10	2,8	4,0	36	70		
11	4,0	4,5	24	50		
12	3,8	4,2	26	70		
13	2,1	3,8	22	60		
14	2,0	3,4	19	75		
15	1,9	3,2	18	70		
16	1,6	4,0	14	35		
17	3,7	4,0	38	30		
18	3,6	4,4	42	35		
19	1,8	3,0	46	15		
20	1,7	2,9	29	40		
21	4,2	3,9	30	35		
22	4,4	4,6	36	70		
23	4,0	4,7	24	35		
24	3,2	4,5	26	50		
25	3,4	4,4	18	25		
26	2,2	3,6	23	35		
27	2,4	3,0	59	60		
28	2,6	4,2	61	65		

Таблица 4.2 – Состав сухого воздуха по объему в %

Компоненты	Предпоследняя цифра номера группы				
	1	2	3	4	5
	Состав воздуха по объему, %				
N2	78,09	77,81	76,93	77,52	78,01
O2	20,90	20,18	21,07	20,43	20,32
H2	0,93	1,16	0,97	1,38	0,95
CO2	0,03	0,825	0,46	0,37	0,61
SO2	0,05	—	—	0,30	—
Ar	—	0,025	0,57	—	0,11

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

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

P , МПа	$t_{\text{нр}}$, °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ , кг/м ³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,001	6,936	0,0010001	130,04	0,00789	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,002	17,486	0,0010014	67,24	0,01487	73,40	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,0025	21,071	0,0010021	54,42	0,01838	88,36	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424
0,003	24,078	0,0010028	45,77	0,02185	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784
0,004	29,95	0,0010042	34,93	0,02863	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,005	32,89	0,0010054	28,24	0,03541	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,006	36,17	0,0010065	23,77	0,04208	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,007	41,53	0,0010085	18,13	0,05516	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2263
0,010	45,82	0,0010102	14,70	0,06805	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,014	52,57	0,0010132	10,69	0,09353	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,018	57,82	0,0010159	8,448	0,1184	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,020	60,08	0,010171	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,025	64,99	0,0010198	6,201	0,1613	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,8300
0,030	69,12	0,0010223	5,232	0,1911	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,040	75,87	0,0010264	3,999	0,2501	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,050	81,33	0,0010299	3,243	0,3083	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923

Продолжение таблицы

P , МПа	$t_{нв}$, °С	V' , м ³ /кг	V'' , м ³ /кг	ρ , кг/м ³	H' , кДж/кг	H'' , кДж/кг	r , кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
0,060	85,94	0,0010330	2,734	0,3658	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,080	93,50	0,0010385	2,089	0,4787	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,100	99,62	0,0010432	1,696	0,5896	417,47	2674,9	2257,9	1,3026	7,3579
0,120	104,80	0,0010472	1,430	0,6992	439,34	2683,6	2243,6	1,3610	7,2972
0,160	113,31	0,0010543	1,092	0,916	475,41	2696,3	2220,8	1,4550	7,2017
0,200	120,23	0,0010606	0,8860	1,129	504,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
0,260	128,73	0,0010684	0,6929	1,443	541,2	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
0,300	133,54	0,0010733	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,9	1,6716	6,9922
0,400	143,62	0,0010836	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,500	151,84	0,0010927	0,3749	2,667	640,1	2748,8	2108,7	1,8605	6,8221
0,600	158,84	0,0011009	0,3156	3,169	670,6	2756,	2086,3	1,9311	6,7609
0,800	170,41	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
1,000	179,88	0,0011273	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
1,200	187,95	0,0011385	0,1633	6,125	798,4	2784,6	1986,2	2,2156	6,5244
1,400	195,04	0,0011488	0,1408	7,102	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
1,600	201,36	0,0011587	0,1238	8,080	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
1,800	207,10	0,0011678	0,1104	9,055	884,2	2796,5	1912,3	2,3975	6,3794
2,000	212,37	0,0011768	0,09961	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411

P , МПа	$t_{\text{нб}}$, °С	ν' , м ³ /кг	ν'' , м ³ /кг	ρ , кг/м ³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	S , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
2,400	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,2	2801,8	1850,8	2,5346	6,2727
2,800	230,04	0,0012088	0,07142	14,00	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
3,000	233,82	0,0012164	0,06663	15,01	1008,4	2803,5	1794,7	2,6456	6,1859
3,500	242,54	0,0012344	0,05706	17,53	1049,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1242
4,000	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5,000	263,91	0,0012858	0,03943	25,36	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,9739
6,000	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
7,000	285,80	0,0013510	0,02738	36,53	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
8,000	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
9,000	303,31	0,0014174	0,02049	48,80	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
10,00	310,96	0,0014522	0,01803	55,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
11,00	318,04	0,0014886	0,01597	62,62	1450,2	2705,2	1255,0	3,4297	5,5528
12,00	324,64	0,001527	0,01426	70,15	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
13,00	330,81	0,001568	0,01278	78,22	1531,3	2662,9	1131,1	3,5606	5,4333
14,00	336,63	0,001611	0,01149	87,04	1570,8	2637,9	1067,0	3,6244	5,3731
16,00	347,32	0,001710	0,009319	107,3	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
18,00	356,96	0,001839	0,007505	133,2	1732,2	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
20,00	365,72	0,002030	0,00586	170,5	1826,8	2410,3	583,44	4,0147	4,9280
22,00	373,71	0,002690	0,00378	265	2009,7	2195,6	185,9	4,2943	4,5815

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

$t_{\text{нас}}$, °C	$P_{\text{нп}}$, МПа	ρ' , м ³ /кг	ρ'' , м ³ /кг	ρ , кг/м ³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	h , кДж/кг	r , кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)	S , кДж/(кг·К)	10
1												
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0,00	2500,8	2500,8	2500,8	0,	0,	0,	9,1544
5	0,0008718	0,0010001	147,2	0,006793	21,06	2510,0	2489,0	2489,0	0,0762	0,0762	0,0762	9,0242
10	0,0012271	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519,2	2477,3	2477,3	0,1511	0,1511	0,1511	8,8995
15	0,0017040	0,0010010	77,97	0,012820	62,97	2528,4	2465,4	2465,4	0,2244	0,2244	0,2244	8,7806
20	0,0023370	0,0010018	57,84	0,0172900	83,90	2537,2	2453,4	2453,4	0,2964	0,2964	0,2964	8,6663
25	0,0031670	0,0010039	43,40	0,023040	104,80	2546,4	2441,7	2441,7	0,3672	0,3672	0,3672	8,5570
30	0,0042410	0,0010044	32,93	0,030360	125,69	2555,6	2430,0	2430,0	0,4367	0,4367	0,4367	8,4523
35	0,0056220	0,0010060	25,25	0,039600	146,58	2564,8	2418,3	2418,3	0,5049	0,5049	0,5049	8,3518
40	0,0073750	0,0010079	19,55	0,051150	167,51	2573,6	2406,1	2406,1	0,5723	0,5723	0,5723	8,2560
45	0,0095820	0,0010099	15,28	0,065450	188,41	2582,4	2394,0	2394,0	0,6385	0,6385	0,6385	8,1638
50	0,0123350	0,0010121	12,05	0,083020	209,30	2591,6	2382,3	2382,3	0,7038	0,7038	0,7038	8,0751
55	0,0157410	0,0010145	9,758	0,104400	230,19	2600,4	2370,1	2370,1	0,7679	0,7679	0,7679	7,9901
60	0,0199200	0,0010171	7,678	0,130200	251,12	2609,2	2358,0	2358,0	0,8311	0,8311	0,8311	7,9084
65	0,0250100	0,0010199	6,201	0,161300	272,06	2617,6	2345,4	2345,4	0,8935	0,8935	0,8935	7,8297
70	0,0311600	0,0010228	5,045	0,198200	292,99	2626,4	2333,3	2333,3	0,9550	0,9550	0,9550	7,7544
80	0,04736	0,0010290	3,409	0,2933	334,94	2643,1	2308,2	2308,2	1,0752	1,0752	1,0752	7,6116
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	376,98	2659,5	2282,5	2282,5	1,1924	1,1924	1,1924	7,4785

36 Продолжение таблицы

100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,10	2675,8	2256,7	1,3071	7,3545
110	0,14327	0,0010515	1,210	0,8263	461,34	2691,3	2230,0	1,4185	7,2386
115									
120	0,19845	0,0010603	0,89917	1,122	503,7	2706,3	2202,7	1,5278	7,1289
130	0,27011	0,0010697	0,6683	1,496	546,4	2720,6	2174,2	1,6345	7,0271
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,1	2734,0	2144,9	1,7392	6,9304
150	0,4760	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746,5	2114,3	1,8418	6,8383
160	0,6180	0,0011021	0,3068	3,629	675,3	2757,8	2082,5	1,9427	6,7508
165									
170	0,7920	0,0011144	0,2426	4,122	719,3	2768,7	2049,4	2,0419	6,6666
175									
180	1,0027	0,0011275	0,1939	5,157	763,3	2778,4	2015,1	2,1395	6,5858
185									
190	1,2553	0,0011415	0,1564	6,395	807,6	2786,3	1978,7	2,2358	6,5057
195									
200	1,5550	0,0011565	0,1272	7,863	852,4	2793,4	1940,6	2,3308	6,4318
210	1,9080	0,0011726	0,1044	9,578	897,6	2798,0	1900,4	2,4246	6,3577

Окончание таблицы

220	2,3202	0,0011900	0,8606	11,62	943,7	2801,4	1857,7	2,5179	6,2848
230	2,7979	0,0012087	0,07147	13,99	990,2	2803,1	1812,9	2,6101	6,2132
240	3,3480	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803,1	1765,6	2,7022	6,1425
250	3,978	0,0012512	0,05005	19,98	1086,1	2801,0	1714,9	2,7934	6,0721
260	4,694	0,0012755	0,04215	23,72	1135,0	2796,4	1661,3	2,8851	6,0014
270	5,505	0,0013023	0,03560	28,09	1185,3	2789,7	1604,4	2,9764	5,9298
280	6,419	0,0013321	0,03013	33,19	1236,8	2779,6	1542,8	3,0685	5,8573
290	7,445	0,0013655	0,02553	39,17	1290,0	2766,2	1476,3	3,1610	5,7049
300	8,592	0,0014036	0,02164	46,21	1344,8	2749,1	1404,3	3,2548	5,7049

Физические свойства сухого воздуха
 ($B = 760$ мм рт. ст $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Па)

t , °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8
0	1,2930	1,005	2,440	18,80	17,20	13,280	0,70638
1	1,2884	1,005	2,447	18,92	17,24	13,368	0,70655
2	1,2338	1,005	2,454	19,04	17,28	13,456	0,70672
3	1,2792	1,005	2,461	19,16	17,32	13,544	0,70689
4	1,2746	1,005	2,468	19,28	17,36	13,632	0,70705
5	1,2700	1,005	2,475	19,40	17,40	13,720	0,70722
6	1,2654	1,005	2,482	19,52	17,44	13,808	0,70738
7	1,2608	1,005	2,489	19,64	17,48	13,896	0,70554
8	1,2562	1,005	2,496	19,76	17,52	13,984	0,70785
9	1,2516	1,005	2,503	19,88	17,56	14,072	0,7052
10	1,2470	1,005	2,510	20,00	17,60	14,160	0,70800
11	1,2428	1,005	2,518	20,14	17,65	14,250	0,70755
12	1,2386	1,005	2,562	20,28	17,70	14,340	0,70710
13	1,2344	1,005	2,534	20,42	17,75	14,430	0,70666
14	1,2302	1,005	2,542	20,56	17,80	14,520	0,70623
15	1,2260	1,005	2,550	20,70	17,85	14,610	0,70580
16	1,2217	1,005	2,560	20,84	17,90	14,700	0,70537
17	1,2176	1,005	2,566	20,98	17,95	14,790	0,70496
18	1,2134	1,005	2,574	21,12	18,00	14,880	0,70455
19	1,2092	1,005	2,582	21,26	18,05	14,970	0,70414
20	1,2050	1,005	2,590	21,40	18,10	15,060	0,70374
21	1,2010	1,005	2,598	21,55	18,15	15,154	0,70320
22	1,1970	1,005	2,606	21,70	18,20	15,248	0,70267
23	1,1930	1,005	2,614	21,85	18,25	15,342	0,70215
24	1,1890	1,005	2,622	22,00	18,30	15,436	0,701642
25	1,1850	1,005	2,630	22,15	18,35	15,530	0,70113

Продолженис таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
26	1,1810	1,005	2,638	22,30	18,40	15,624	0,70063
27	1,1770	1,005	2,646	22,45	18,45	15,718	0,70013
28	1,1730	1,005	2,634	22,60	18,50	15,812	0,69965
29	1,1690	1,005	2,662	22,75	18,55	15,906	0,69916
30	1,1650	1,005	2,670	22,90	18,60	16,000	0,69869
31	1,1613	1,005	2,679	23,04	18,65	16,096	0,69861
32	1,1576	1,005	2,688	23,18	18,70	16,192	0,69853
33	1,1539	1,005	2,697	23,32	18,75	16,288	0,69846
34	1,1502	1,005	2,706	23,46	18,80	16,384	0,69838
35	1,1465	1,005	2,715	23,60	18,85	16,480	0,69831
36	1,1428	1,005	2,724	23,74	18,90	16,576	0,69823
37	1,1391	1,005	2,739	23,88	18,95	16,672	0,69816
38	1,1354	1,005	2,742	24,02	19,00	16,768	0,69808
39	1,1370	1,005	2,751	24,16	19,05	16,864	0,69801
40	1,1280	1,005	2,760	24,30	19,10	16,960	0,69794
41	1,1245	1,005	2,767	24,44	19,15	17,059	0,69800
42	1,1210	1,005	2,774	24,58	19,20	17,158	0,69805
43	1,1175	1,005	2,781	24,72	19,25	17,257	0,69810
44	1,1140	1,005	2,788	24,86	19,30	17,356	0,69815
45	1,1105	1,005	2,795	25,00	19,35	17,455	0,69820
46	1,1070	1,005	2,802	25,14	19,40	17,554	0,69825
47	1,1035	1,005	2,809	25,28	19,45	17,653	0,69830
48	1,1000	1,005	2,816	25,42	19,50	17,752	0,69835
49	1,0965	1,005	2,823	25,56	19,55	17,851	0,69840
50	1,0930	1,005	2,830	25,70	19,60	17,950	0,69844
51	1,0897	1,005	2,837	25,75	19,65	18,052	0,70105
52	1,0864	1,005	2844	25,80	19,70	18,154	0,70364
53	1,0831	1,005	2,851	25,85	19,75	18,256	0,70623
54	1,0798	1,005	2,858	25,90	19,80	18,358	0,70880
55	1,0765	1,005	2,865	25,95	19,85	18,460	0,71137
56	1,0732	1,005	2,872	26,00	19,90	18,562	0,71392

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
57	1,0699	1,005	2,879	26,05	19,95	18,664	0,71647
58	1,0666	1,005	2,886	26,10	20,00	18,766	0,71900
59	1,0633	1,005	2,893	26,15	20,05	18,868	0,72153
60	1,0600	1,005	2,900	26,20	20,10	18,970	0,72405
61	1,0569	1,0054	2,906	26,44	20,15	19,075	0,72144
62	1,0538	1,0058	2,912	26,68	20,20	19,800	0,74213
63	1,0507	1,0062	2,918	26,92	20,25	19,285	0,71638
64	1,0476	1,0066	2,924	27,16	20,30	19,390	0,71392
65	1,0445	1,0070	2,930	27,40	20,35	19,495	0,71150
66	1,0414	1,0074	2,936	27,64	20,40	19,600	0,70912
67	1,0383	1,0078	2,942	27,88	20,45	19,705	0,70678
68	1,0352	1,0082	2,948	28,12	20,50	19,810	0,70448
69	1,0321	1,0086	2,954	28,36	20,55	19,915	0,70222
70	1,0290	1,0090	2,960	28,60	20,60	20,020	0,70000
71	1,0261	1,0090	2,969	28,76	20,65	20,127	0,69983
72	1,0232	1,0090	2,978	28,92	20,70	20,234	0,69965
73	1,0203	1,0090	2,987	29,08	20,75	20,341	0,69948
74	1,0174	1,0090	2,996	29,24	20,80	20,448	0,69932
75	1,0145	1,0090	3,005	29,40	20,85	20,555	0,69915
76	1,0116	1,0090	3,014	29,56	20,90	20,662	0,69899
77	1,0087	1,0090	3,023	29,72	20,95	20,769	0,69882
78	1,0058	1,0090	3,032	29,88	21,00	20,876	0,69866
79	1,0029	1,0090	3,041	30,04	21,05	20,983	0,69850
80	1,0000	1,0090	3,050	30,20	21,10	21,090	0,69834

Окончание таблицы

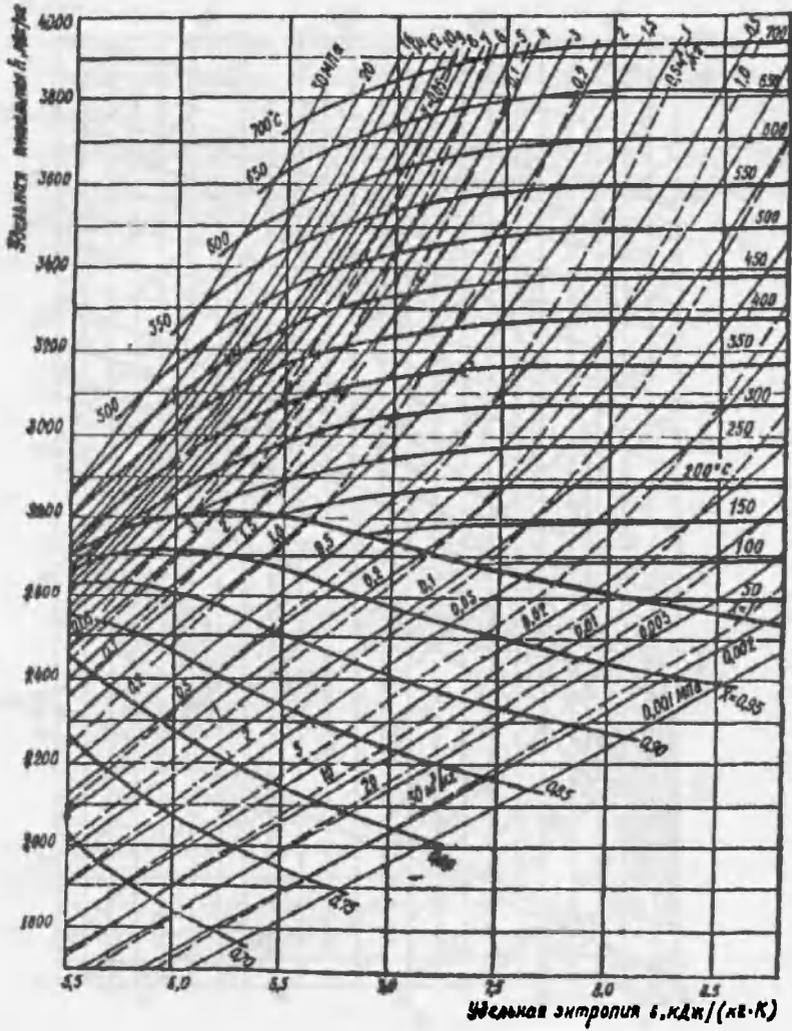
1	2	3	4	5	6	7	8
81	0,9972	1,0090	3,058	30,37	21,14	21,191	0,69776
82	0,9944	1,0090	3,066	30,54	21,18	21,292	0,69718
83	0,9916	1,0090	3,074	30,71	21,22	21,393	0,69661
84	0,9888	1,0090	3,082	30,88	21,26	21,494	0,69605
85	0,9860	1,0090	3,090	31,05	21,30	21,595	0,69549
86	0,9832	1,0090	3,098	31,22	21,34	21,696	0,69494
87	0,9804	1,0090	3,106	31,39	21,38	21,797	0,69439
88	0,9776	1,0090	3,114	31,56	21,42	21,898	0,69385
89	0,9748	1,0090	3,122	31,73	21,46	21,999	0,69332
90	0,9720	1,0090	3,130	31,90	21,50	22,100	0,69279
91	0,9694	1,0090	3,138	32,07	21,54	22,203	0,69233
92	0,9668	1,0090	3,146	32,24	21,58	22,306	0,69187
93	0,9642	1,0090	3,154	32,41	21,62	22,109	0,68217
94	0,9616	1,0090	3,162	32,58	21,66	22,512	0,69098
95	0,9590	1,0090	3,170	32,75	21,70	22,615	0,69053
96	0,9564	1,0090	3,178	32,92	21,74	22,718	0,69010
97	0,9538	1,0090	3,186	33,09	21,78	22,821	0,68966
98	0,9512	1,0090	3,194	33,26	21,82	22,924	0,68924
99	0,9486	1,0090	3,202	33,43	21,86	23,027	0,68881
100	0,9460	1,0090	3,210	33,60	21,90	23,130	0,68839

Молекулярные массы, плотности, объемы киломолей при нормальных физических условиях и газовые постоянные некоторых газов

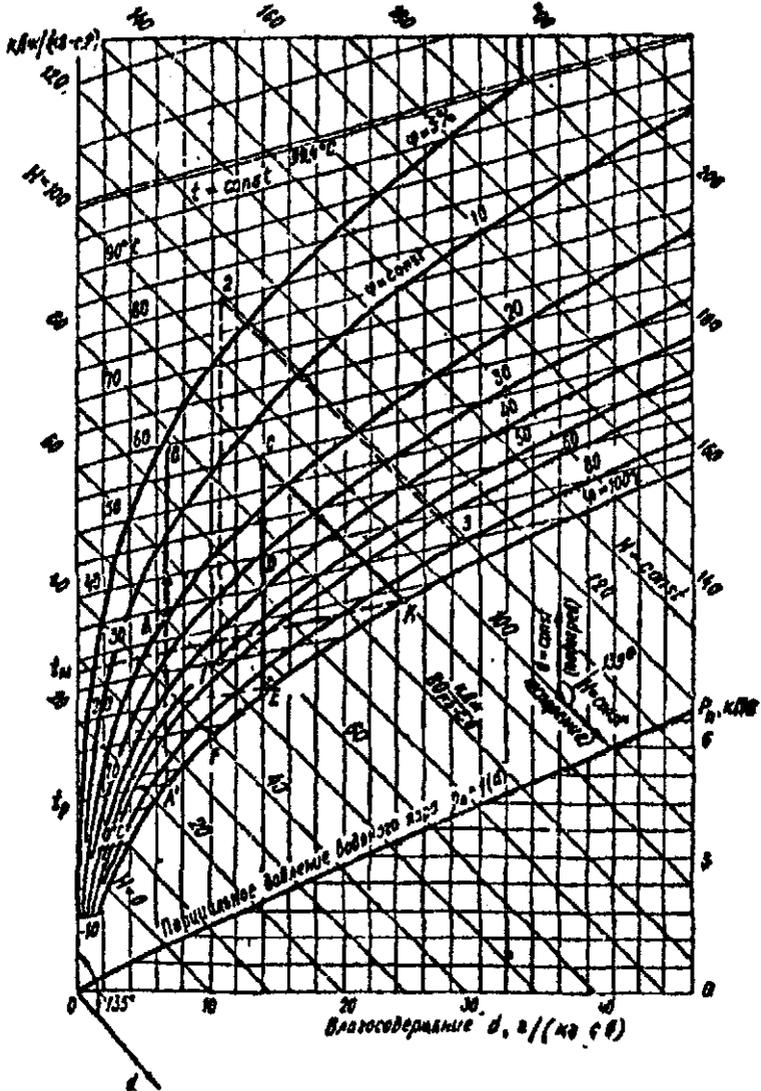
Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса μ , кг/кмоль	Плотность ρ , кг/м ³	Объем киломоля $\mu_{об}$, м ³ /кмоль	Газовая постоянная, Дж/(кг·К)
Воздух	—	28,96	1,293	22,40	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	22,40	296,8
Атмосферный азот ¹	N ₂	28,16	(1,257)	(22,40)	(295,3)
Гелий	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	H ₂	2,016	0,090	22,43	4124,0
Оксид углерода	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Двуокись углерода	CO ₂	44,01	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	—	11,50	0,515	22,33	721,0
Аммиак	NH ₃	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяной пар ²	H ₂ O	18,016	(0,804)	(22,40)	(461)

1. Атмосферный азот – условный газ, состоящий из азота воздуха с двуокисью углерода и редкими газами, содержащимися в воздухе.

2. Приведение водяного пара к нормальному состоянию является условным.



h - s -диаграмма водяного пара



h - d -диаграмма влажного воздуха

Список использованной литературы

1. Хрусталеv, Б.М., Несенчук, А.П., Романюк, В.Н. Техническая термодинамика. – Минск: УП «Технопринт», 2004.
2. Техническая термодинамика / Под ред. В.И. Крутова. – М.: Высшая школа, – 1991.
3. Техническая термодинамика: лабораторный практикум для студентов специальности 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна». – Минск: БНТУ, 2006.

Учебное издание

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания
к индивидуальным заданиям
для студентов специальности 1-70 04 02
«Теплогазоснабжение, вентиляция
и охрана воздушного бассейна»

Составители:

СТАНЕЦКАЯ Ирина Ивановна
КАЛИНИЧЕНКО Екатерина Сергеевна
АКЕЛЬБЕВ Валерий Дмитриевич

Редактор Л.Н. Шалаева

Компьютерная верстка А.Г. Гармазы

Подписано в печать 17.10.2007.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 2,67. Уч.-изд. л. 2,09. Тираж 100. Заказ 826.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.