

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**КАФЕДРА ФИЗИКИ**

# **ФРОНТАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ**

по дисциплине

**«Техническая термодинамика»**

**Часть 2**

**Реальный газ**

## **Методические указания**

для студентов специальности

**1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция**

**и охрана воздушного бассейна»**

**дневной и заочной форм обучения**

**Брест 2014**

УДК 620.1.016.7 (075.8)

Методические указания предназначены для студентов специальности 1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна» дневной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Техническая термодинамика». Содержат ряд фронтальных задач для решения на практических занятиях или для самостоятельной работы студентов. Часть 2 включает комплексные задания, которые обеспечивают изучение в соответствии с учебной программой дисциплины следующих тем: «Уравнение Ван-дер-Ваальса», «Уравнения состояния реальных газов», « $H-d$ -диаграмма влажного воздуха», « $H-s$ -диаграмма водяного пара».

Издаётся в 2-х частях. Часть 2.

Составитель: Т.Л. Кушнер, к. ф.-м. н., доцент

## Тема 8. Уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса

### Задание 8.1.

Газ массой  $m$ , состояние которого можно описать уравнением Ван-дер-Ваальса, находится в сосуде объемом  $V$  при температуре  $T$  и давлении  $p$ .

Определите для рассматриваемого газа:

- критические параметры и критический коэффициент;
- постоянные  $a$  и  $b$ ;
- давление газа, соответствующее заданным удельному объему и температуре;
- какую часть давления газа составляет давление, обусловленное силами взаимодействия между молекулами;
- какую часть удельного объема газа составляет удельный собственный объем его молекул.

При решении данной задачи используйте справочный материал приложений 1 и 2.

Номер вар-та	Газ	$\nu$ , м <sup>3</sup> /кг	$T$ , К
1	Гелий	0,3	300
2	Хлор	0,2	600
3	Этан	0,8	400
4	Этилен	0,7	500
5	Кислород	0,6	300
6	Неон	0,1	300
7	Окись углерода	0,1	500
8	Углекислый газ	0,1	600
9	Водяной пар	0,4	700
10	Криптон	0,2	400
11	Ксенон	0,05	500
12	Метан	0,2	400
13	Аргон	0,2	300
14	Водяной пар	0,3	700
15	Водород	0,8	500
16	Гелий	0,5	600
17	Водород	0,7	300
18	Азот	0,15	400
19	Аммиак	0,4	600
20	Аргон	0,1	400
21	Углекислый газ	0,9	400
22	Метан	0,2	300
23	Неон	0,2	500
24	Окись углерода	0,2	600
25	Азот	0,7	300
26	Криптон	0,3	400
27	Аргон	0,2	500
28	Ксенон	0,1	600

**Задание 8.2.**

Один моль газа в некотором состоянии имеет приведённые значения: давления  $p$ , удельного объёма  $\omega$  и температуры  $T$ .

Определите неизвестную величину согласно номеру варианта.

Номер вар-та	$\omega$	$T$	$p$
1	1,6	?	1,2
2	3,7	?	2,0
3	2,2	1,5	?
4	2,5	2,0	?
5	3,8	?	1,9
6	3,2	?	1,5
7	1,4	1,8	?
8	2,0	3,0	?
9	3,0	?	1,75
10	2,4	?	1,3
11	3,0	3,0	?
12	1,5	2,0	?
13	3,4	?	1,6
14	2,4	?	2,2
15	2,2	2,0	?
16	2,8	3,3	?
17	1,75	?	1,5
18	2,5	?	1,8
19	1,2	2,0	?
20	2,6	1,4	?
21	1,8	?	1,4
22	1,7	?	1,25
23	1,25	1,6	?
24	1,6	1,2	?
25	2,8	?	1,7
26	2,2	?	2,0
27	1,5	1,5	?
28	2,0	2,0	?

**Задание 8.3.**

Используя таблицу данных из задания 8.1, для газа, указанного в таблице, определите:

- а) значения постоянных  $a$  и  $b$  уравнения состояния Бертло и давление газа;  
б) значение постоянных  $a$ ,  $b$  и  $c$  уравнения состояния Воля и давление газа.

При решении данной задачи используйте справочный материал приложения 3.

## Тема 9. Водяной пар

### Задание 9.1.

Водяной пар с начальными параметрами, изменяет свое состояние по процессу, указанному в таблице, до одного из конечных значений параметров пара. Используя  $h$ - $s$ -диаграмму водяного пара, определите:

- состояние пара и неизвестные параметры в начале процесса;
- состояние пара и неизвестные параметры в конце процесса;
- работу и теплоту процесса;
- изменение внутренней энергии в процессе;
- изменение энтропии и энтальпии в процессе.

Процесс изменения состояния, точки, соответствующие начальному и конечному состоянию пара, нанесите на  $h$ - $s$ -диаграмму.

Номер вар-та	$h_1$ , кДж/кг	$s_1$ , кДж/(кг·К)	$x_1$	$t_1$ , °С	$p_1$ , МПа	$u_1$ , м <sup>3</sup> /кг	Постоянная величина	$h_2$ , кДж/кг	$x_2$	$t_2$ , °С
1	3250			400			$\nu = \text{const}$		0,9	
2		7,3	0,87				$s = \text{const}$			400
3				200	0,1		$s = \text{const}$	2500		
4			0,95	210			$\nu = \text{const}$			300
5	3000	6,55					$p = \text{const}$	2500		
6					1,0	0,25	$s = \text{const}$			400
7			0,82			1,0	$p = \text{const}$			350
8		6,85		200			$\nu = \text{const}$		0,91	
9	2400					2,0	$s = \text{const}$		1,0	
10		6,0			2,0		$p = \text{const}$	3200		
11	3400			500			$\nu = \text{const}$		0,9	
12	3200			400			$p = \text{const}$		0,89	
13	3000			300			$s = \text{const}$		0,95	
14	2900			220			$p = \text{const}$		0,79	
15		7,5	0,9				$s = \text{const}$			400
16		6,5	0,8				$s = \text{const}$			300
17		6,25	0,75				$s = \text{const}$			420
18		5,75	0,70				$s = \text{const}$			320
19		6,6	0,75				$s = \text{const}$			380
20	3600					1,6	$p = \text{const}$		0,95	
21	3700					1,0	$p = \text{const}$		0,93	
22	3900					0,9	$p = \text{const}$		0,94	
23	3200					0,8	$p = \text{const}$		0,97	
24		7,5			1,5		$s = \text{const}$	2400		
25		7,0			0,5		$s = \text{const}$	2200		
26		6,9	0,8				$s = \text{const}$			200
27			1,0		4,0		$T = \text{const}$	2900		
28		6,6	0,97				$s = \text{const}$			480

**Задание 9.2.**

В закрытом сосуде содержится  $V$  сухого насыщенного водяного пара при давлении  $p_1$ . Пар охладился до температуры  $t_2$ . Определите аналитическим методом:

- а) начальную температуру пара;
- б) степень сухости пара в конечном состоянии;
- в) количество отданного паром тепла при охлаждении.

При решении данной задачи используйте справочный материал приложений 5 и 6.

Номер вар-та	$V, \text{ м}^3$	$p_1, \text{ бар}$	$t_2, \text{ С}$
1	1,1	24	5
2	1,2	22	15
3	1,3	20	25
4	1,4	18	35
5	1,5	16	45
6	1,6	14	55
7	1,7	12	65
8	1,8	9	75
9	1,9	7	85
10	2,0	5	95
11	2,1	4,4	105
12	2,2	4,2	115
13	2,3	4,0	120
14	2,4	3,8	10
15	2,5	3,6	20
16	2,6	3,4	30
17	2,7	3,2	40
18	2,8	3,0	50
19	2,9	2,8	70
20	3,0	2,6	80
21	3,1	2,4	90
22	3,2	13	100
23	3,3	11	110
24	3,4	8	115
25	3,5	6	120
26	3,6	3,1	65
27	3,7	15	75
28	1,0	10	60

**Задание 9.3.**

В паровом котле находится масса  $m$  пароводяной смеси с паросодержанием  $x_1$  при давлении  $p_1$ . Сколько времени необходимо для поднятия давления в котле до величины  $p_2$  при закрытых вентилях, если смеси сообщается в минуту количество теплоты  $q$ ?

При решении данной задачи используйте справочный материал приложений 5 и 6.

Номер вар-та	$m$ , кг	$x_1$	$p_1$ , бар	$p_2$ , бар	$q$ , МДж/мин
1	10250	0,0020	2,4	7,0	10
2	9150	0,0025	2,9	12,0	11
3	6580	0,0030	3,0	13,0	12
4	7320	0,0035	3,5	18,0	13
5	9470	0,0020	3,6	19,0	14
6	8690	0,0025	4,1	24,0	15
7	8850	0,0030	4,2	8,0	16
8	10240	0,0035	6,0	11,0	17
9	7530	0,0020	3,3	14,0	18
10	9540	0,0025	2,5	17,0	19
11	6980	0,0030	2,8	20,0	20
12	10120	0,0035	3,1	23,0	10
13	8460	0,0020	3,4	9,0	11
14	9370	0,0025	3,7	15,0	12
15	7920	0,0030	4,3	16,0	13
16	8530	0,0035	5,0	21,0	14
17	10600	0,0020	2,6	7,0	15
18	7930	0,0025	2,7	19,0	16
19	9510	0,0030	3,2	8,0	17
20	8520	0,0035	3,3	20,0	18
21	7530	0,0020	3,8	11,0	19
22	9630	0,0025	3,9	8,0	20
23	8540	0,0030	4,4	9,0	10
24	7460	0,0035	4,5	13,0	11
25	10200	0,0020	3,9	18,0	12
26	9870	0,0025	4,3	11,0	13
27	8740	0,0030	2,5	22,0	14
28	8250	0,0015	4,0	10,0	18

## Тема 10. Влажный воздух

### Задание 10.1.

Воздух при давлении  $p = 101323,0 \text{ Па}$  имеет начальные параметры: температуру  $t_1$  и относительную влажность  $\phi_1$ . Воздух охлаждают до температуры  $t_2$  в первом процессе (и нагревают до температуры  $t_2$  – во втором процессе).

Используя  $h-d$ -диаграмму водяного пара, определите:

- а) влагосодержание воздуха в начальном и конечном состоянии;
- б) энтальпию влажного воздуха в начальном и конечном состоянии;
- в) парциальное давление водяного пара в начальном и конечном состоянии;
- г) плотность воздуха в начальном и конечном состоянии;
- д) температуру точки росы влажного воздуха с начальными параметрами  $t_1$  и  $\phi_1$ ;
- е) количество выпавшей влаги, приходящейся на 1 кг сухого воздуха в 1-м процессе.

Точки начального и конечного состояния воздуха нанесите на  $h-d$ -диаграмму.

Номер вар-та	1-й процесс – охлаждение			2-й процесс – нагревание (сушка)			
	$t_1, ^\circ\text{C}$	$\phi_1, \%$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$\phi_1, \%$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$
1	35	15	0				
2	25	35	5				
3	14	50	0				
4	20	85	10				
5	35	30	9				
6	43	20	0				
7	13	50	1				
8	40	15	5				
9	10	80	3				
10	45	35	15				
11	22	80	14				
12	33	53	10				
13	41	53	19				
14	29	60	15				
15	39	20	10				
16	27	80	20				
17	24	45	7				
18	12	60	1				
19	19	35	3				
20	23	30	4				
21	17	55	7				
22	21	50	10				
23	15	55	3				
24	18	35	0				
25	14	75	9				
26	15	45	0				
27	41	10	1				
28	32	70	15	20	40	80	35



### Задание 10.2.

По психрометру Августа зафиксированы температуры мокрого  $t_m$  и сухого  $t_c$  термометров. Определите по таблице относительную влажность воздуха.

При решении данной задачи используйте справочный материал приложения 7.

Номер вар-та	Исходные данные и результат			Номер вар-та	Исходные данные и результат		
	$t_m, ^\circ\text{C}$	$t_c, ^\circ\text{C}$	$\phi, \%$		$t_m, ^\circ\text{C}$	$t_c, ^\circ\text{C}$	$\phi, \%$
1	0	5		15	14	17	
2	25	33		16	11	13	
3	2	7		17	16	19	
4	23	25		18	9	11	
5	4	9		19	18	20	
6	21	26		20	7	11	
7	6	12		21	20	22	
8	19	21		22	5	11	
9	8	14		23	22	25	
10	17	20		24	3	5	
11	10	12		25	24	25	
12	15	20		26	1	5	
13	12	18		27	7	9	
14	13	16		28	9	14	

### Задание 10.3.

В сушильной установке производится подсушка топлива с помощью воздуха при атмосферном давлении. От начального состояния с температурой  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $\phi_1 = 40\%$  воздух предварительно подогревается до температуры  $t_2 = 80^\circ\text{C}$  и далее направляется в сушильную камеру, где в процессе высушивания топлива, воздух охлаждается до  $t_3 = 35^\circ\text{C}$ .

Считая, что тепловые потери отсутствуют, определите:

- а) необходимое количество тепла для нагревания 1 кг воздуха;
- б) параметры воздуха на выходе из сушильной камеры;
- в) количество воды, которое отбирает каждый килограмм воздуха от топлива;

Сформулируйте и решите аналогичную задачу, самостоятельно задав соответствующие параметры в таблице данных задания 10.1.

### Литература

1. Техническая термодинамика: учеб. – В 2-х ч. / Б.М. Хрусталева, А.П. Ненсенчук, В.Н. Романюк [и др.]. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – Ч. 1. – 474 с.
2. Сборник задач по термодинамике: учебное пособие / Т.Н. Андрианова [и др.]. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: Энергия, 1971. – 264 с.: ил.
3. Ветрова, В.Т. Сборник задач по физике: с инд. заданиями // учеб. пособие для вузов. – Мн.: Высшая школа, 1991. – 386 с.: ил.
4. Рабинович, О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – 4-е изд., перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1969. – 375 с.
5. Карминский, В.Д. Техническая термодинамика и теплопередача: курс лекций. – М.: Маршрут, 2005. – 224 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1 – Критические термодинамические параметры некоторых газов [1]

Газ	Химическое обозначение	$T_{кр}$ , К	$\rho_{кр}$ , МПа	$\rho_{кр}$ , кг/м <sup>3</sup>
Азот	N <sub>2</sub>	126	3,28	311
Аммиак	NH <sub>3</sub>	405,5	10,93	235
Аргон	Ar	150,7	4,71	531
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	561,0	4,67	62
Водяной пар*	H <sub>2</sub> O	647,3	22,13	307
Водород	H <sub>2</sub>	33,2	1,25	31
Воздух	—	132,6	3,77	313
Гелий	He	5,2	0,25	69,3
Кислород	O <sub>2</sub>	154,3	4,87	430
Криптон	Kr	210,6	5,31	780
Ксенон	Xe	290,0	5,69	1155
Метан	CH <sub>4</sub>	190,7	4,69	162
Неон	Ne	44,4	2,64	484
Оксид углерода	CO	134,4	3,398	311
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	304,1	7,38	460
Хлор	Cl <sub>2</sub>	419,0	7,45	573
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	305,2	4,78	210
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	282,7	5,0	220

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица 2 – Молекулярные массы ( $\mu$ ), молярные объемы ( $\mu\nu$ ), плотности ( $\rho$ ) и газовые постоянные ( $R$ ) некоторых газов при нормальных физических условиях  $p_0 = 101325$  Па,  $T_0 = 273,15$  К

Газ	Химическое обозначение	$\mu$ , 10 <sup>-3</sup> кг/моль	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu\nu$ , 10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup> /моль	$R$ , Дж/(кг·К)
Азот	N <sub>2</sub>	28,026	1,251	22,40	296,8
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,032	0,771	22,08	488,3
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	H <sub>2</sub>	2,016	0,090	22,43	4124,0
Водяной пар*	H <sub>2</sub> O	18,016	0,804	22,40	461,0
Воздух	—	28,96	1,293	22,40	287,0
Гелий	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Кислород	O <sub>2</sub>	32,000	1,429	22,39	259,8
Криптон	Kr	83,800	3,741	22,41	99,2
Ксенон	Xe	131,29	5,86	22,40	63,3
Метан	CH <sub>4</sub>	16,032	0,717	22,39	518,8
Неон	Ne	20,180	0,901	22,41	412,0
Оксид углерода	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Сернистый газ	SO <sub>2</sub>	64,06	2,926	21,89	129,8
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44,01	1,977	22,26	188,9
Хлор	Cl <sub>2</sub>	70,904	3,22	22,02	117,2
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,07	1,34	22,40	276,4
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,052	1,251	22,41	296,6

\*Нормальное состояние для пара считается условным

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Задача получения уравнения состояния, адекватно описывающего термодинамические свойства реального газа, состоит не только в том, чтобы достаточно точно описать  $p$ ,  $v$ ,  $T$ -зависимость, но и с помощью дифференциальных уравнений термодинамики вычислить с достаточной степенью точности такие калорические характеристики, как энтальпия и теплоемкость.

В настоящее время существует множество различных видов уравнения состояния реального газа. Все они были предложены различными учеными. Однако их объединяет определенное свойство: как правило, все уравнения являются двухпараметрическими, так как содержат две константы  $a$  и  $b$ . Эти постоянные определяются на основании результатов, полученных эмпирическим путем. Итак, приведем ряд уравнений:

Уравнение Бертло

$$\left( p + \frac{a}{Tv^2} \right) (v - b) = RT;$$

Первое уравнение Дитеричи

$$p(v - b) = RTe^{\frac{-a}{RTv}};$$

Второе уравнение Дитеричи

$$\left( p + \frac{a}{v^5} \right) (v - b) = RT;$$

Уравнение Редлиха-Квонга

$$\left( p + \frac{a}{\sqrt{Tv(v+b)}} \right) (v - b) = RT;$$

Уравнение Камерлинг-Оннеса

$$pv = A + \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \frac{D}{v^4} + \frac{E}{v^6} + \frac{F}{v^8},$$

в котором коэффициенты являются функциями от температуры и в свою очередь выражаются рядами:

$$A = RT; \quad B = b_1T + b_2 + \frac{b_3}{T} + \frac{b_4}{T^2} + \dots; \quad C = c_1T + c_2 + \frac{c_3}{T} + \frac{c_4}{T^2} + \dots \text{ и т.д.}$$

для D, E и F.

Одно из уравнений, справедливое в достаточно широкой области состояний реального газа, было предложено Майером и Боголюбовым. С помощью

методов статистической физики они показали, что наиболее общий вид уравнения может выглядеть следующим образом:

$$pV = RT \left( 1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k}{k+1} \frac{\beta_k}{V^k} \right),$$

где  $\beta_k$  – коэффициенты, являющиеся функциями только температуры (вириальные коэффициенты).

Рассмотрим одно из перечисленных выше уравнений – уравнение Бертло. Определить значения постоянных  $a$  и  $b$  можно из условий для критической точки

$$\left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_{T_{кр}} = 0 \quad \text{и} \quad \left( \frac{\partial^2 p}{\partial V^2} \right)_{T_{кр}} = 0.$$

Для уравнения Бертло искомые коэффициенты будут равны:

$$a = \frac{16}{3} p_{кр} \cdot V_{кр}^2 \quad \text{и} \quad b = \frac{V_{кр}}{4}.$$

Известно эмпирическое уравнение состояния Воля, которое выгодно отличается от уравнений с двумя постоянными тем, что трем условиям для критической точки (уравнение состояния и уравнения для первой и второй производных) соответствуют три постоянных  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Это позволяет избежать неоднозначности определения постоянных, т.е. повысить надежность уравнения.

Уравнение Воля имеет следующий вид:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{TV \cdot (V-b)} + \frac{c}{T^2 V^3}.$$

Постоянные данного уравнения связаны с критическими параметрами следующим образом:

$$a = c \cdot p_{кр} \cdot V_{кр}^2 \cdot T_{кр};$$

$$b = \frac{V_{кр}}{4};$$

$$c = 4 p_{кр} \cdot V_{кр}^3 \cdot T_{кр}^2.$$

Необходимо отметить, что сложность точных уравнений состояния реальных газов затрудняет их использование в учебных целях. Некоторые уравнения, по мнению ряда авторов, не имеют высокой практической ценности и не могут быть рекомендованы в качестве обязательного инструмента аналитического аппарата технической термодинамики. Решения уравнений состояния реальных газов возможно найти с помощью компьютера и соответствующих программных продуктов в зависимости от поставленной задачи.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Уравнения для вычисления давления насыщения водяного пара по температуре

Интервал температур, К	A	B	C	D	E
$p_H = \exp\{A + B(T_H - 273,15) + C \sin[D(T_H - E)]\}$					
0...15	6,4147	0,0684	0,015	12,0	273,15
15...35	6,5456	0,0597	0,024	9,0	288,15
35...70	6,9219	0,04893	0,055	5,143	308,15
70...100	7,6604	0,38657	0,020	7,2	348,15
100...150	8,4320	0,03094	0,059	3,6	373,15
150...200	9,5213	0,02368	0,040	3,6	423,15
200...250	10,5005	0,018783	0,026	3,6	473,15
250...300	11,3456	0,015402	0,018	3,6	523,15
300...350	12,03748	0,013096	0,012	3,6	573,15
623,15...647,5	$p_H = 2,31125(T_H - 273,15) - 1,8 \sin[7,5(T_H - 623,15)] - 643,568$				

Уравнение для вычисления температуры насыщения по известному давлению

Интервал давлений, Па	A	B	C	D	E
$t_H = A \ln p_H - B \sin[C(p_H - D)] - E$					
610,8...705,4	13,9080	0,00	0,00	0,00	89,22
705,4...871,8	14,167	0,00	0,00	0,00	90,92
871,8...1704,1	14,679	0,17	0,1197	200	94,22
1704,1...5622	16,755	0,43	0,046	1704	0,00
5622...31161	20,723	2,00	0,006	5622	143,9
31161...101325	25,342	0,71	0,0018	250000	192,09
101325...475970	32,162	1,80	0,00048	101325	270,69
475970...1555100	42,07	1,60	0,000195	475970	400
1555100...3977600	53,07	1,35	0,000081	1555100	556,56
3977600...8591700	64,75	1,07	0,000041	3977600	733,94
8591700...16537000	76,12	0,81	0,000024	8591700	915,36

Уравнения для вычисления удельного объема сухого насыщенного водяного пара

Интервал температур, К	Уравнение	A	B
273,15...373	$v'' = 462 \frac{T_H}{p_H} - \frac{A}{(T_H - 273,15)^B}$	0,6	0,673
373...473		2,84	1,011
473...573		1,81	0,927
573...623,15		0,285	0,593
623,15...643,15	$v'' = 0,07644 - 0,000193(T_H - 273,15)$		
643,15...646,15	$v'' = 1/[14,268(T_H - 273,15) - 4,6 \sin[60(T_H - 643,15)] - 5077,5]$		

Уравнения для вычисления теплоты парообразования водяного пара

Интервал температур, К	Уравнение
273,15...543,15	$r = \{249,115(647,26 - T_H)^{0,4} + 0,1047(647,26 - T_H)\} / \{1,0851 - 0,000314(T_H - 273,15)\}$
543,15...573,15	$r = \exp\{8,4464 - 0,004(T_H - 273,15) + 0,0145 \sin[3,6(T_H - 523,15)]\}$
573,15...643,15	$r = 249,11(647,27 - T_H)^{0,4} + 0,12(647,27 - T_H)$
643,15...646,15	$r = 249,11(647,27 - T_H)^{0,4} + 0,12(647,27 - T_H) + 3,0/(647,26 - T_H)$

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАНИЯ 9.2 ВАРИАНТА № 28

Из таблицы 3 «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям)» приложения 6 определяем начальную температуру пара. Она равна 179,88 С. Из этой же таблицы определяем удельный объем пара  $v_1'' = 0,1946 \text{ м}^3 / \text{кг}$ . Поскольку охлаждение пара происходит в закрытом сосуде, следовательно,  $v_1'' = v_1 = v_2$ . Из уравнения  $x_2 = \frac{v_1''}{v_2}$

определяем степень сухости пара в конечном состоянии. Удельный объем пара в конечном состоянии определяем из таблицы 4 «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам)» приложения 6. Итак,  $v_2'' = 7,678 \text{ м}^3 / \text{кг}$ ,

$$x_2 = \frac{0,1946}{7,678} = 0,0253.$$

Из таблицы 4 «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам)» приложения 6 определяем конечное давление пара. Оно составит  $p_2 = 0,19917 \text{ бар}$ .

Количество тепла в изохорном процессе определяется по формуле:

$$q_v = u_2 - u_1.$$

Определяем значение внутренней энергии пара в начальном состоянии.

$$u_1 = h_1'' - p_1 v_1 = 2778 \cdot 10^3 - 10 \cdot 10^5 \cdot 0,1946 = 2583,4 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Значение энтальпии в конечном состоянии определяем по формуле:

$$h_2 = h_2' + r x_2 = 2511,1 \cdot 10^3 + 2358,8 \cdot 10^3 \cdot 0,0253 = 310,8 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Тогда

$$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 310,8 \cdot 10^3 - 0,19917 \cdot 10^5 \cdot 0,1946 = 306,9 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Следовательно,

$$q_v = 306,9 \cdot 10^3 - 2583,4 \cdot 10^3 = -2276,5 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Из таблицы 3 «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям)» приложения 5 определяем плотность пара при давлении  $p_1$ . Она равна  $\rho'' = 5,139 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Тогда масса пара будет равна  $m = \rho'' V = 5,139 \text{ кг}$ . Следовательно, количество теплоты, выделенное данной массой пара:

$$Q = m \cdot q_v = 5,139 \cdot (-2276,5 \cdot 10^3) = -11699 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАНИЯ 9.3 ВАРИАНТА № 28

Находим удельный объём пароводяной смеси, соответствующий начальному паросодержанию  $x_1$ , из следующего уравнения:

$$v_x = v_1'' x_1 + (1 - x_1)v_1' = 0,4624 \cdot 0,0015 + 0,9985 \cdot 0,0010836 = 0,00177 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Паросодержание в конечном состоянии определяем из следующей формулы:

$$x_2 = \frac{v_x - v_2'}{v_2'' - v_2'} = \frac{0,00177 - 0,0011273}{0,1946 - 0,0011273} = 0,00332.$$

Так как изменение состояния пароводяной смеси происходит при постоянном объёме, то количество теплоты, необходимое для повышения давления, ищем по формуле:

$$Q_v = m \cdot (u_2 - u_1) = m \cdot [(h_2 - p_2 v) - (h_1 - p_1 v)].$$

Определяем энтальпию пара в начальном и конечном состоянии из формул:

$$h_1 = h_1' + r_1 x_1 = 604,7 \cdot 10^3 + 2133 \cdot 10^3 \cdot 0,0015 = 607,9 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

$$h_2 = h_2' + r_2 x_2 = 762,7 \cdot 10^3 + 2015 \cdot 10^3 \cdot 0,00332 = 769,4 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}.$$

Следовательно,

$$Q_v = 82500 \cdot [(769,4 \cdot 10^3 - 10 \cdot 10^5 \cdot 0,00177) - (607,9 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^5 \cdot 0,00177)] = 1328250 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

Время, необходимое для повышения давления в котле, находим из формулы:

$$\tau = \frac{Q_v}{q} = \frac{1328250 \cdot 10^3}{18 \cdot 10^6} = 73,8 \text{ мин}.$$



Таблица 3 – Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям)

$p$ , бар	$t_n$ , °C	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$S'$ , кДж/(кг·К)	$S''$ , кДж/(кг·К)
2,4	126,09	0,0010659	0,7465	1,340	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
2,6	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,040
2,7	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175	1,634	7,027
2,8	131,20	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
2,9	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2524	2167	1,660	7,003
3,0	133,54	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
3,1	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161	1,683	6,981
3,2	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
3,3	136,82	0,0010765	0,5539	1,805	575,7	2730	2154	1,706	6,961
3,4	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
3,6	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
3,7	140,84	0,0010807	0,4975	2,010	592,8	2735	2142	1,748	6,923
3,8	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1,758	6,914
3,9	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
4,0	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
4,1	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131	1,786	6,889
4,2	145,39	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881
4,3	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
4,4	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123	1,812	6,865
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
5,0	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
6,0	158,84	0,0011007	0,3156	3,169	670,5	2757	2086	1,931	6,761
7,0	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
8,0	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
9,0	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
10,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587



Продолжение таблицы 3

$p$ , бар	$t_n$ , °C	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$S'$ , кДж/(кг·К)	$S''$ , кДж/(кг·К)
11,0	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
12,0	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523
13,0	191,60	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
14,0	195,04	0,0011490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,284	6,469
15,0	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
16,0	201,36	0,0011586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,422
17,0	204,30	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400
18,0	207,10	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379
19,0	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
20,0	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
21,0	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880	2,470	6,322
22,0	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305
23,0	219,55	0,0011892	0,08679	11,52	941,5	2801	1860	2,514	6,288
24,0	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272

Таблица 4 – Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температурам)

$t_n$ , °C	$p$ , бар	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$S'$ , кДж/(кг·К)	$S''$ , кДж/(кг·К)
0,01	0,006108	0,0010002	206,3	0,004847	0	2501	2501	0	9,1544
5	0,008719	0,0010001	147,2	0,006793	21,05	2510	2489	0,0762	9,0241
10	0,012277	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519	2477	0,1510	8,8994
15	0,017041	0,0010010	77,97	0,01282	62,97	2528	2465	0,2244	8,7806
20	0,02337	0,0010018	57,84	0,01729	83,90	2537	2454	0,2964	8,6665
25	0,03166	0,0010030	43,40	0,02304	104,81	2547	2442	0,36672	8,5570
30	0,04241	0,0010044	32,93	0,03037	125,71	2556	2430	0,4366	8,4523
35	0,05622	0,0010061	25,24	0,03962	146,60	2565	2418	0,5049	8,3519
40	0,07375	0,0010079	19,55	0,05115	167,50	2574	2406	0,5723	8,2559
45	0,09584	0,0010099	15,28	0,06544	188,40	2582	2394	0,6384	8,1638
50	0,12335	0,0010121	12,04	0,08306	209,3	2592	2383	0,7038	8,0753
55	0,15740	0,0010145	9,578	0,1044	230,2	2600	2370	0,7679	7,9901

Продолжение таблицы 4

$t_n$ , °C	$\rho$ , бар	$\nu'$ , м <sup>3</sup> /кг	$\nu''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$S'$ , кДж/(кг·К)	$S''$ , кДж/(кг·К)
60	0,19917	0,0010171	7,678	0,1302	251,1	2609	2358	0,8311	7,9084
65	0,2501	0,0010199	6,201	0,1613	272,1	2617	2345	0,8934	7,8297
70	0,3117	0,0010228	5,045	0,1982	293,0	2626	2333	0,9549	7,7544
75	0,3855	0,0010258	4,133	0,2420	314,0	2635	2321	1,0157	7,6815
80	0,4736	0,0010290	3,408	0,2934	334,9	2643	2308	1,0753	7,6116
85	0,5781	0,0010324	2,828	0,3536	355,9	2651	2295	1,1342	7,5438
90	0,7011	0,0010359	2,361	0,4235	377,0	2659	2282	1,1925	7,4787
95	0,8451	0,0010396	1,982	0,5045	398,0	2668	2270	1,2502	7,4155
100	1,0132	0,0010435	1,673	0,5977	419,1	2676	2257	1,3071	7,3547
105	1,2079	0,0010474	1,419	0,7047	440,2	2683	2243	1,3632	7,2959
110	1,4326	0,0010515	1,210	0,8264	461,3	2691	2230	1,4184	7,2387
115	1,6905	0,0010559	1,036	0,9652	482,5	2698	2216	1,4733	7,1832
120	1,9854	0,0010603	0,8917	1,121	503,7	2706	2202	1,5277	7,1298
125	2,3208	0,0010649	0,7704	1,298	525,0	2713	2188	1,5814	7,0777
130	2,7011	0,0010697	0,6683	1,496	546,3	2721	2174	1,6345	7,0272
135	3,130	0,0010747	0,5820	1,718	567,5	2727	2159	1,6869	6,9781
140	3,614	0,0010798	0,5087	1,966	589,0	2734	2145	1,7392	6,9304
145	4,155	0,0010851	0,4461	2,242	610,5	2740	2130	1,7907	6,8839
150	4,760	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746	2114	1,8418	6,8383
155	5,433	0,0010962	0,3466	2,885	653,9	2753	2099	1,8924	6,7940
160	6,180	0,0011021	0,3068	3,258	675,5	2758	2082	1,9427	6,7508
165	7,008	0,0011081	0,2725	3,670	697,3	2763	2066	1,9924	6,7081
170	7,920	0,0011144	0,2426	4,122	719,2	2769	2050	2,0417	6,6666
175	8,925	0,0011208	0,2166	4,617	741,1	2773	2032	2,0909	6,6256
180	10,027	0,0011275	0,1939	5,157	763,1	2778	2015	2,1395	6,5858
185	11,234	0,0011344	0,1739	5,750	785,2	2782	1997	2,1876	6,5464
190	12,553	0,0011415	0,1564	6,394	807,5	2786	1979	2,2357	6,5074
195	13,989	0,0011489	0,1409	7,097	829,9	2790	1960	2,2834	6,4694
200	15,551	0,0011565	0,1272	7,862	852,4	2793	1941	2,3308	6,4318
205	17,245	0,0011644	0,1151	8,688	875,0	2796	1921	2,3777	6,3945

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Таблица 5 – Относительная влажность воздуха (по психрометру Августа)

Показания «мокрого» термометра, °С	Влажность в % при психрометрической разности температур, °С																				
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
0	100	90	81	73	64	57	50	43	36	31	26	20	16	11	7	3					
1	100	90	82	74	66	59	52	45	39	33	29	23	19	15	11	7					
2	100	90	83	75	67	61	54	47	42	36	31	26	23	18	14	10					
3	100	90	83	76	69	63	56	49	44	39	34	29	26	21	17	13	10				
4	100	91	84	77	70	64	57	51	46	41	36	32	28	24	20	16	14	11			
5	100	91	85	78	71	65	59	54	48	43	39	34	30	27	23	19	17	13	10		
6	100	92	85	78	72	66	61	56	50	45	41	35	33	29	26	22	19	16	13	10	
7	100	92	86	79	73	67	62	57	52	47	43	39	35	31	28	25	20	18	15	12	11
8	100	92	86	80	74	68	63	59	54	48	45	41	37	33	30	27	25	21	18	15	14
9	100	93	86	81	75	70	65	60	55	51	47	43	39	35	32	29	27	24	21	18	17
10	100	94	87	82	76	71	66	61	57	53	48	45	41	38	34	31	28	26	23	21	19
11	100	94	88	82	77	72	67	62	58	55	50	47	43	40	36	33	30	28	25	23	20
12	100	94	88	82	78	73	68	63	59	56	52	48	44	42	38	35	32	30	27	25	22
13	100	94	88	83	78	73	69	64	61	57	53	50	46	43	40	37	34	32	29	27	24
14	100	94	89	83	79	74	70	66	62	58	54	51	47	45	41	39	36	34	31	29	26
15	100	94	89	84	80	75	71	67	63	49	55	52	49	46	43	41	37	35	33	31	28
16	100	95	90	84	80	75	72	67	64	60	57	53	50	48	44	42	39	37	34	32	30
17	100	95	90	84	81	76	73	68	65	61	58	54	52	49	46	44	40	38	36	34	31
18	100	95	90	85	81	76	74	69	66	62	59	56	53	50	47	45	42	40	37	35	33
19	100	95	91	85	82	77	74	70	66	63	60	57	54	51	48	46	43	41	39	37	34
20	100	95	91	86	82	78	75	71	67	64	61	58	55	53	49	47	44	43	40	38	36
21	100	95	91	86	83	79	75	71	68	65	62	59	56	54	51	49	46	44	41	39	37
22	100	95	91	87	83	79	76	72	69	65	63	60	57	56	52	50	47	45	42	40	38
23	100	96	91	87	83	80	76	72	69	66	63	61	58	56	53	51	48	46	43	41	39
24	100	96	92	88	84	80	77	73	70	67	64	62	59	56	53	52	49	47	44	42	40
25	100	96	92	88	84	81	77	74	70	68	65	63	59	57	54	52	49	47	45	44	42

**Составители:**  
Кушнер Татьяна Леонидовна

# **ФРОНТАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ**

по дисциплине  
«Техническая термодинамика»  
Часть 2  
Реальный газ

## **Методические указания**

для студентов специальности  
1-70 04 02 «Теплогазоснабжение, вентиляция  
и охрана воздушного бассейна»  
дневной и заочной форм обучения

Ответственный за выпуск: Кушнер Т.Л.  
Редактор: Боровикова Е.А.  
Компьютерная верстка: Кармаш Е.Л.  
Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано к печати 31.07.2014 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Снегурочка».  
Усл. печ. л. 1,16. Уч. изд. л. 1,25. Заказ № 629. Тираж 50 экз.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.