

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**  
**Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего**  
**Профессионального Образования**  
**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»**  
**(МИИТ)**

Кафедра: «Теплоэнергетика и водоснабжение  
на железнодорожном транспорте»

## **ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Задание на контрольную работу №1 с методическими указаниями  
по дисциплине для студентов-специалистов 3 курса,  
специальности: «Подвижной состав железных дорог»

специализации: «Электрический транспорт железных дорог»

Москва, 2013 г.

## ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

Контрольная работа включает два вопроса и три задачи. Студент выбирает контрольные вопросы и задачи по таблице вариантов – Таблица 1 соответственно последней цифре своего учебного шифра. Числовые данные к задачам берутся по предпоследней цифре своего учебного шифра – из соответствующих таблиц, приведенных в конце каждого задания.

Таблица 1 - Варианты заданий

Задания на контрольную работу	Последняя цифра учебного шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номера контрольных вопросов	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Номера контрольных задач	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	15	14	13	12	11	12	13	14	14	16
	17	18	19	20	21	18	20	19	19	17

### ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Выполнению контрольных работ должно предшествовать тщательное изучение соответствующего раздела курса «Термодинамика и теплопередача». При их выполнении студент должен сначала письменно ответить на контрольные вопросы, а затем решить соответствующие задачи (контрольные вопросы и условия задач должны быть переписаны в пояснительную записку).

При подготовке к экзаменам студенту рекомендуется проработать все контрольные вопросы и задачи, предложенные в заданиях.

Ответы на контрольные вопросы должны быть четкими. Их необходимо сопровождать, формулами, графиками, схемами. При решении задач студент указывает, по какой формуле и в каких единицах измерения определяются величины, откуда взяты представленные в формулу значения (если они не содержатся в условиях задачи).

При использовании таблиц, программ, эмпирических формул и других справочных материалов надо сделать ссылку на литературный источник.

В приложениях к заданиям приведены справочные таблицы средних изобарных теплоемкостей некоторых газов, термодинамических свойств воды и водяного пара в состоянии насыщения, физических свойств воздуха и воды на линии насыщения.

Вычисления всех величин проводятся в развернутом виде. Если подставляемая в формулу величина определяется по какой либо расчетной зависимости, это промежуточное вычисление подробно записывается. Обозначения величин и терминология в пояснительной записке должны соответствовать принятым в учебниках.

Решения задач нужно иллюстрировать схемами и графиками, тщательно выполненными и подклеенными к пояснительной записке в соответствующих местах.

Пояснительная записка должна иметь поля для заметок рецензента.

При подготовке к экзаменам студенту рекомендуется проработать все контрольные вопросы и задачи, приведенные в заданиях.

## Контрольные вопросы

1. Напишите уравнение состояния идеального газа. Поясните физический смысл газовой постоянной. Как определяют ее значение для газов?
2. Какова связь между массовой, мольной и объемной теплоемкостями газа? Что такое истинная и средняя теплоемкости?
3. Дайте определение внутренней энергии реального и идеального газов. Как найти изменение внутренней энергии идеального газа?
4. Покажите, как определяется работа в обратимых термодинамических процессах аналитически и графически в  $PV$ -диаграмме.
5. Приведите формулировку Первого закона термодинамики. Напишите аналитическое выражение этого закона для основных термодинамических процессов.
6. Как изменяется температура газа при изобарном и адиабатном расширении? Ответ проиллюстрируйте графиками процессов в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.
7. Что такое энтальпия газа и как определяется изменение энтальпии идеального газа в каком-либо термодинамическом процессе?
8. Что называется энтропией рабочего тела? Как определяется изменение энтропии идеального газа в термодинамическом процессе?
9. Изобразите в  $pV$ - и  $Ts$ -координатах идеальный прямой цикл Карно. Дайте необходимые пояснения.
10. В чем состоит содержание Второго закона термодинамики? Приведите основные формулировки этого закона (достаточно привести две формулировки).
11. Опишите процесс парообразования в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.
12. Изобразите процесс адиабатного расширения и (условно) адиабатного дросселирования пара в  $is$ -диаграмме.
13. Дайте определение процесса истечения газов и паров. По каким формулам подсчитываются скорость и массовый расход рабочего тела при адиабатном истечении?
14. В чем сущность процесса дросселирования и как практически осуществляется этот процесс? Как условно изображается процесс дросселирования в  $is$ -диаграмме?
15. Что называется влажным воздухом? Дайте определение влагосодержания, относительной влажности воздуха и температуры точки росы.
16. Опишите  $Id$ -диаграмму влажного воздуха. Каковы простейшие случаи ее применения?
17. Изобразите в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах термодинамические процессы, протекающие в компрессорах. Почему изотермический процесс сжатия газа в процессах является энергетически более выгодным, чем политропный при  $n > 1$  ?
18. Назовите теоретические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания. Изобразите их в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах. Дайте необходимые пояснения.
19. От каких величин зависит термический КПД теоретического цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении? Изобразите этот цикл в  $pV$ - к  $Ts$ -диаграммах.
20. Каково влияние начальных и конечных параметров пара на термический КПД основного цикла паросиловых установок (цикла Ренкина)? Ответ иллюстрируйте в  $is$ -диаграмме.

## Задачи

1. В цилиндре 1 кг воздуха сжимается в одном случае по изотерме, а в другом — по политропе со средним показателем  $n = 1,2$  так, что объем уменьшается в  $\varepsilon$  раз. Определить конечные значения температуры, давления и плотности воздуха, а также работу, изменение энтропии в процессах сжатия. Начальные параметры:  $p_1 = 750$  мм рт. ст. и  $t_1$ . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.

2. Смесь идеальных газов заданного массового состава занимает объем  $V$  при постоянном абсолютном давлении  $p$  и температуре  $t$ . Требуется определить газовую постоянную смеси, среднюю молекулярную массу, массу смеси, объемный состав смеси, а также среднюю мольную, объемную и массовую теплоемкости смеси (при  $p = \text{const}$ ) для интервала температур  $0 - t$ .

3. Смесь идеальных газов заданного массового состава (см. задачу №2) расширяется при постоянной температуре  $t = 127^\circ$  так, что отношение конечного объема к начальному равно  $\square$ . Определить газовую постоянную, конечные параметры смеси  $p_2$  и  $V_2$ , работу расширения, количество теплоты и изменение удельной энтропии в процессе. Для смеси заданы масса  $G$  и начальное абсолютное давление  $p_1$ . Процесс изобразить в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.

4. Найти объемный состав смеси идеальных газов, заданный массовыми долями (см. задачу №2). Определить также парциальные давления компонентов смеси, если абсолютное давление смеси  $p$ .

5. В процессе политропного сжатия воздуха  $G$ , кг/с, в одноступенчатом поршневом компрессоре отводится теплота в количестве  $Q$ , кДж/с. При сжатии от начального абсолютного давления  $0,1$  МПа температура воздуха возрастает от  $15^\circ\text{C}$  до  $t_2$ . Определить показатель политропы процесса сжатия, конечное давление, удельную работу сжатия и техническую работу на получение сжатого воздуха, Дж/кг. Какова теоретически потребная мощность привода компрессора, кВт.

6. Определить показатель политропы сжатия воздуха в одноступенчатом поршневом компрессоре, если давление в процессе возрастает в  $\square$  раз, а температура газа изменяется от  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $t_2$ . Определить также теплоту процесса, работу процесса, изменение внутренней энергии и энтропии 1 кг газа.

7. Определить количество теплоты, отдаваемое каждым килограммом отработавших газов дизеля в утилизационном котле, где газы при постоянном давлении охлаждаются от температуры  $t_1$  до температуры  $t_2$ . Объемный состав отработавших газов:

$$r_{\text{CO}_2} = 0,08; r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,06; r_{\text{O}_2} = 0,10; r_{\text{N}_2} = 0,76.$$

8. Диаметр цилиндров тепловозного дизеля  $D = 318$  мм, ход поршней  $s = 330$  мм, степень сжатия  $\square = 12$ . Определить теоретическую работу политропного сжатия воздуха в одном цилиндре, изменения удельных значений внутренней энергии и энтропии в процессе. Абсолютное давление воздуха в начале сжатия  $p_1 = 95$  кПа, температура  $t_1 = 127^\circ\text{C}$ . Показатель политропы процесса сжатия  $n$  и теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.

9. Воздух, имея начальную температуру  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  и абсолютное давление  $p_1$ , изотермически расширяется до давления  $p_2 = 0,1$  МПа, а затем нагревается в изохорном процессе до тех пор, пока давление вновь не станет равным  $p_1$ . Требуется определить удельный объем воздуха в конце изотермического расширения и температуру в конце изохорного подвода теплоты, а также изменения удельных значений внутренней энергии, энтальпии и энтропии в изохорном процессе. Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры. Изобразить процессы в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.

10. 1 кг азота, имея начальную температуру  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ , расширяется при постоянном давлении  $p$ , при этом удельный объем его увеличивается в  $n$  раз. Определить удельный объем и

температуру азота в конце процесса, работу в процессе, изменения внутренней энергии и энтропии, а также подведенную теплоту. Средняя массовая теплоемкость азота имеет линейную зависимость от температуры,  $c_{pm} = 1,0258 + 0,00008382 t$  кДж/кг.

11. Определить параметры состояния 1 кг воздуха в конце его адиабатного расширения от давления  $p_1$  до  $p_2 = 0,1$  МПа. Определить также работу процесса и изменение внутренней энергии воздуха. Начальная температура  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ .

12. В установке по приготовлению дистиллированной воды для заправки системы охлаждения тепловозного дизеля насыщенный пар, имея абсолютное давление  $p_1$  и степень сухости  $x = 0,95$ , конденсируется и охлаждается до температуры  $t = 80^\circ\text{C}$  проточной водой. Какое количество воды требуется для приготовления дистиллята в сутки в количестве  $G$ , если температурный перепад проточной воды в теплообменнике установки составляет  $\Delta t_w$ ? Теплообменом рабочих тел установки с окружающей средой пренебречь.

13. В закрытом сосуде объемом  $10 \text{ м}^3$  находится влажный насыщенный водяной пар с абсолютным давлением  $p$ . В объеме пара содержится 30 кг жидкости. Определить массу парообразной фазы в сосуде и степень сухости пара.

14. Влажный насыщенный водяной пар со степенью сухости  $x$  перегревается при постоянном абсолютном давлении  $p$  до температуры  $t$ . На сколько градусов перегрет пар? Какое количество теплоты затрачивается на подсушку и перегрев пара?

15. 1 кг перегретого водяного пара, имея температуру  $t_1$  и энтропию  $s_1$ , охлаждается в процессе постоянного объема до состояния, когда энтальпия пара становится равной 2500 кДж/кг. Определить, состояние пара и его параметры в конце процесса, а также количество отведенной теплоты. Решение задачи иллюстрировать на  $is$ -диаграмме.

16. Влажный насыщенный водяной пар, имея начальные параметры  $t_1 = 139^\circ\text{C}$  и  $x = 0,94$ , сжимается в процессе без теплообмена с окружающей средой. При этом объем пара уменьшается в  $n$  раз. Определить состояние и параметры пара в конце процесса сжатия, а также изменение удельной энтальпии и работу 1 кг пара в процессе, изобразить процесс в  $is$ -диаграмме.

17. Какой должна быть площадь сечения отверстия предохранительного клапана парового котла, чтобы при внезапном прекращении отбора сухого насыщенного пара из него в количестве  $G$  абсолютное давление не превысило 1,4 МПа? Атмосферное давление  $B = 750$  мм. рт. ст. Потерей давления на мятие пара, теплообменом при прохождении отверстия и скоростью пара на входе в отверстие клапана пренебречь.

18. Определить основные размеры сопла Лавала, через которое вытекает воздух в количестве 0,5 кг/с в среду с давлением 0,1 МПа. Начальные параметры газа: абсолютное давление  $p_1$  и температура  $t_1$ . Истечение считать адиабатным. Потерями энергии на трение пренебречь. Изобразить в масштабе разрез сопла, приняв при этом угол конусности расширяющейся части равным  $10^\circ$ .

19. В дроссельном клапане парового двигателя водяной пар с начальными параметрами  $p_1$  и  $t_1$  дросселируется до давления 1 МПа, а затем адиабатно расширяется в цилиндре двигателя до давления 0,1 МПа. Определить потерю располагаемой работы пара вследствие дросселирования. Решение задачи проиллюстрировать в  $is$ -диаграмме.

20. Влажный насыщенный пар с абсолютным давлением  $p_1$  поступает в дроссельный калориметр для определения его влажности. После дросселирования до давления  $p_2 = 0,1$  МПа температура пара становится равной  $t_2$ . Какова влажность пара до дросселирования? Как возрастает удельная энтропия пара в дроссельном калориметре? Решение задачи проиллюстрировать в  $is$ -диаграмме.

21. В цилиндры двигателя внутреннего сгорания всасывается 200 кг атмосферного воздуха в час при давлении  $B = 745$  мм рт. ст., температуре  $t$  и относительной влажности  $\phi$ . Какое количество воды всасывается двигателем в час?

**Таблица 2 - Числовые данные к задачам контрольной работы**

Задача	Величина	Предпоследняя цифра учебного шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	$\varepsilon$	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	$t, C^0$	47	40	37	30	27	20	17	10	7	0
2	Массовый состав смеси, %										
	CO <sub>2</sub>	18	14	10	17	10	10	12	16	13	18
	H <sub>2</sub> O	1	15	6	5	4	7	14	7	12	10
	N <sub>2</sub>	65	45	76	70	80	60	47	62	54	46
	O <sub>2</sub>	16	26	8	8	6	18	27	15	21	26
	V, м <sup>3</sup>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	p, МПа	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
t, C <sup>0</sup>	200	300	400	500	600	600	500	500	300	200	
3	$\varepsilon$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	G, кг	20	19	18	17	16	15	14	13	12	10
	p, МПа	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
4	p, МПа	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
5	10 <sup>3</sup> G, кг/с	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
	Q, кДж/с	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7
	t <sub>2</sub> , C <sup>0</sup>	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75
6	$\beta$	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
	t <sub>2</sub> , C <sup>0</sup>	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
7	t <sub>1</sub> , °C	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
	t <sub>2</sub> , °C	230	235	240	245	250	260	270	280	290	300
8	n	1,22	1,24	1,26	1,28	1,3	1,29	1,27	1,25	1,23	1,2
9	p <sub>1</sub> , МПа	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
10	p, МПа	7	6	5	4	3	2	1	0,8	0,6	0,5
	$\varepsilon$	2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1
11	p <sub>1</sub> , МПа	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,5
12	p, МПа	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,35	0,4
	G, т/сут	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
	$\Delta t_w$ , К	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
13	p, МПа	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8
14	x	0,91	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	0,96	0,94	0,92	0,9
	p, МПа	1	1,5	2	3	4	5	6	7	7	10
	t, °C	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580
15	t <sub>1</sub> , °C	270	480	290	320	400	530	420	500	520	560
	s <sub>1</sub> , κДж/(кг-К)	7,7	8,2	7,4	7,5	7,7	8	7,3	7,5	6,7	7,3
16	$\varepsilon$	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15
17	G, кг/с	0,7	1,1	1,8	2,8	5,5	0,6	1,0	1,7	2,5	5
18	p <sub>1</sub> , МПа	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1	1,1	1,2	1
	t <sub>1</sub> , °C	200	220	240	260	280	300	320	340	460	480

Задача	Величина	Предпоследняя цифра учебного шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
19	$p_1$ , МПа	5	5	4	4	3,5	3,5	3	3	2	2
	$t_1$ , °С	300	350	400	350	300	350	400	350	300	400
20	$p_1$ , МПа	1,6	1,2	1,3	1,4	2,0	1,5	1,0	0,8	0,7	0,6
	$t_2$ , °С	140	131	121	115	110	118	120	125	122	110
21	$t_2$ , °С	12	12	14	16	18	20	22	24	26	28
	$\varphi$ , °С	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

### Задачи 1-11

Задачи составлены по следующим разделам технической термодинамики: уравнение состояния идеального газа, смесь идеальных газов, теплоемкость, первый закон термодинамики и основные термодинамические процессы.

При решении этих задач могут быть использованы следующие формулы и выражения.

Уравнения состояния идеального газа:

$$p\nu = RT \quad (\text{для } 1 \text{ кг газа}),$$

или

$$pV = GRT \quad (\text{для } G \text{ кг газа}),$$

где  $R = 8314/\mu$  - газовая постоянная, Дж/(кг К);

$\mu$  - масса 1 кмоль газа, кг (численно равна молекулярной массе газа).

Для газовых смесей вводят понятие о так называемой средней (кажущейся) молекулярной массе смеси, значение которой определяется по выражениям:

через объемные доли

$$\mu_{\text{см}} = \frac{\sum_1^n r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i},$$

через массовые доли

$$\mu_{\text{см}} = 1 / \sum m_i / \mu_i,$$

где  $\mu_i$  - молекулярная масса компонента, входящего в смесь;

$$m_i = \frac{G_i}{G}$$

- массовая доля газа в смеси (отношение массы этого газа, входящего в смесь, к массе всей смеси);

$$r_i = \frac{V_i}{V}$$

- объемная доля (отношение приведенного объема какого-либо газа, входящего в смесь, к объему всей смеси).

Формулы пересчета состава смеси:

$$r_i = m_i \mu_{\text{см}} / \mu_i; \quad m_i = r_i \mu_i / \mu_{\text{см}}.$$

Газовую постоянную смеси идеальных газов  $R$  можно определить или через газовые постоянные отдельных компонентов  $R_i$ , входящих в смесь,

$$R = \sum_1^n m_i R_i$$

или через среднюю молекулярную массу смеси:

$$R = 8314 / \mu_{\text{см}} \text{ Дж / (кгК)}.$$

Для определения парциального давления отдельного компонента  $p_i$ , входящего в смесь, служат формулы

$$p_i = r_i P \quad \text{и} \quad p_i = m_i P \frac{R_i}{R}$$

где  $p$  - общее давление смеси газов.

В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают мольную теплоемкость  $\mu c$ , кДж/(моль-К), массовую —  $c$ , кДж/(кг-К) и объемную —  $c'$ , кДж/(м<sup>3</sup>-К). Объемную теплоемкость относят к 1 м<sup>3</sup> при нормальных условиях ( $p_0 = 760$  мм рт. ст.,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ). Эти теплоемкости между собой связаны следующими зависимостями:

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = \frac{c'}{\rho_0} \quad \text{и} \quad c' = \frac{\mu c}{22.4} = c \rho_0$$

где  $\mu$  - молекулярная масса газа;

$\rho_0$  - плотность газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>.

Теплоемкости являются функциями термодинамического процесса.

Разность массовых теплоемкостей при постоянном давлении  $c_p$  и постоянном объеме  $c_v$ , равна газовой постоянной:

$$c_p - c_v = R$$

Отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме (показатель адиабаты) обозначают буквой  $k$ , т. е.

$$k = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\text{Следовательно, } c = \frac{R}{k-1}; \quad c_p = k c_v$$

Теплоемкость газа зависит от его температуры. В приближенных расчетах часто пренебрегают этой зависимостью, т.е. теплоемкость газов одинаковой атомности считают величиной постоянной.

Ниже приведены примерные значения мольных теплоемкостей и показателя адиабаты газов.

Газы	Теплоемкость, кДж/(кмоль-К)		$k$
	$\mu c_v$	$\mu c_p$	
Одноатомные	12,56	20,93	1,67
Двухатомные	20,93	29,31	1,40
Трех- и многоатомные	29,31	37,68	1,29

Зависимость теплоемкости газов от температуры имеет нелинейный характер. В прил.1 приведены средние теплоемкости некоторых газов в пределах от  $0^\circ\text{C}$  до  $t$ . При пользовании этой таблицей в необходимых случаях проводится интерполяция.

Для смесей идеальных газов массовая теплоемкость  $c_{см} = \sum_1^n m_i c_i$ , объемная теплоемкость  $c'_{см} = \sum_1^n r_i c'_i$ , и мольная теплоемкость  $\mu c_{см} = \sum_1^n r_i \mu c_i$

Для нахождения, например, средней теплоемкости в интервале температур  $t_1$  до  $t_2$  надо из соответствующей таблицы взять теплоемкость — соответственно в пределах  $0^\circ - t_1$  и  $0^\circ - t_2$  и по выражению

$$c_M = \frac{c_{m2}t_2 - c_{m1}t_1}{t_2 - t_1} \quad \text{определить искомую теплоемкость.}$$

Если в процессе участвуют  $G$  кг вещества, то количество теплоты в соответствующем процессе  $Q = G(c_{m2}t_2 - c_{m1}t_1)$ .

В  $pV$  - диаграмме линия, изображающая политропный процесс, имеет уравнение  $pV^n = \text{const}$ , где  $n$  — показатель политропы. Связь между основными параметрами рабочего тела в политропном процессе выражается следующими формулами:

$$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n; \quad T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1}; \quad T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{n-1}{n}}$$

Для адиабатного процесса в этих формулах показатель  $n$  заменяется показателем  $k = c_p/c_v$ .

Изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии не зависит от характера процесса и при постоянной теплоемкости для 1 кг идеального газа подсчитывается по формуле:

$$u_2 - u_1 = c_v (t_2 - t_1);$$

$$i_2 - i_1 = c_p (t_2 - t_1);$$

$$s_2 - s_1 = c \ln (T_2/T_1);$$

В последнем выражении  $c$  — теплоемкость газа в соответствующем процессе. Для политропного процесса

$$c_n = c_v \frac{n - k}{n - 1}$$

Удельная работа в политропном процессе, Дж/кг,

$$l = \frac{R}{n - 1} (T_1 - T_2)$$

или

$$l = \frac{1}{n - 1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

Для адиабатного процесса:  $n = k$ , для изобарного процесса:  $n = 0$ .

В адиабатном процессе удельная работа равна изменению внутренней энергии с обратным знаком:

$$l = -(u_2 - u_1) = c_v (t_2 - t_1)$$

В изотермическом процессе давление изменяется обратно пропорционально объему  $p_1/p_2 = V_2/V_1$ . Работа в этом процессе равна теплоте:

$$L = Q = GRT \ln(V_2/V_1)$$

Изменение удельной энтропии в изотермическом процессе, Дж/кг·К

$$S_2 - S_1 = R \ln(v_2/v_1)$$

Следует помнить, что

$$T \text{ } ^\circ\text{K} = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15$$

$$dT = dt, \text{ т.е. } \square \square = \square t, \text{ K.}$$

## Задачи 12 и 13

Количество проточной воды  $W$ , которое потребуется для охлаждения  $G$ , кг пара (задача 12) определится из уравнения теплового баланса  $G(i_x - i_{кд}) = Wc_{pm} \Delta t$  где энтальпия пара  $i_x = i' + gx$ , энтальпия конденсата  $i_{кд} = c_{pm}t$ .

В задаче 13 по заданному давлению надо в соответствующей таблице насыщенного пара найти значения удельных объемов кипящей жидкости  $v'$  и пара  $v''$ . Объем жидкости в сосуде  $V_{ж} = G_{ж}v'$ . Масса парообразной фазы  $G_n = V_n/v''$ .

### Задачи 14-16

Задачи решаются при помощи  $i_s$ -диаграммы водяного пара, практическая часть которой состоит из двух областей. Ниже пограничной кривой сухого насыщенного пара (степень сухости  $x = 1$ ) будет область влажного насыщенного пара ( $0 < x < 1$ ), выше — область перегретого пара. Поэтому, когда в задаче требуется определить состояние пара, то нужно показать, в какой области диаграммы находится точка данного состояния пара. В  $i_s$ -диаграмме в области влажного пара соответствующие изобара и изотерма совпадают и изображаются одной линией, так как в этой области определенному давлению соответствует определенная температура насыщения. В области перегретого пара изотермы отклоняются от изобар вправо, асимптотически приближаясь к горизонтальной линии.

Удельная внутренняя энергия пара  $u = i - pv$  (здесь необходимо обратить внимание на соответствие размерностей всех величин).

Удельная теплота в изобарном процессе равна изменению энтальпии в этом процессе, т.е.  $q = i_2 - i_1$ .

В обратимом адиабатном процессе изменения состояния пара, протекающем при постоянном значении энтропии, удельная работа процесса

$$l = u_1 - u_2 = (i_1 - p_1 v_1) - (i_2 - p_2 v_2).$$

### Задачи 17-20

Задачи составлены на процессы истечения и дросселирования газов и паров. Процесс истечения принимается без теплообмена, т.е. адиабатным, для которого в указаниях к задачам 1-11 приведены формулы, связывающие основные параметры идеального газа, и неразрывным (сплошным), когда соблюдается равенство (уравнение неразрывности).

$$G v = f c$$

где  $G$  - массовый расход газа или пара, кг/с;

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

$f$  - площадь данного сечения сопла, м<sup>2</sup>;

$c$  - скорость потока в рассматриваемом сечении, м/с.

Из этого равенства можно определить массовый расход или площадь данного сечения сопла.

Если адиабатное истечение газа или пара происходит при отношении давлений  $p_2/p_1$  больше критического значения  $(p_2/p_1)_{кр}$ , то применяют суживающееся сопло. В этом случае теоретическая скорость истечения определяется по формуле, м/с,

$$c_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( p_2 / p_1 \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

В этой формуле величины  $p$  и  $v$  имеют соответственно следующие единицы измерения: Па, м<sup>3</sup>/кг.

Для водяного пара скорость истечения определяют по формуле

$$c_2 = 44,76 \sqrt{i_1 - i_2},$$

где  $i_1$  и  $i_2$  - соответственно энтальпии, кДж/кг, пара в начале и конце адиабатного процесса истечения, определяемые по  $i_s$ -диаграмме.

Критическое отношение давлений  $(p_2/p_1)_{кр}$  для двухатомных газов, в том числе для воздуха ( $k=1,4$ ), равно 0,528, а для перегретого водяного пара — 0,546.

Если истечение происходит при  $(p_2/p_1) < (p_2/p_1)_{кр}$ , то применяют расширяющееся сопло Лавалья, где скорость в выходном сечении сопла достигает сверхкритических (сверхзвуковых) значений. В этом случае скорость на выходе из сопла определяется по приведенной выше формуле, а критическая скорость в минимальном сечении для двухатомных газов — по формуле

$$c_{кр} = 1,08 \sqrt{p_1 v_1}, \text{ или } c_{кр} = 1,08 \sqrt{RT_1}.$$

Для перегретого пара

$$c_{кр} = 44,76 \sqrt{i_1 - i_{кр}}$$

где  $i_{кр}$  - энтальпия пара в минимальном сечении сопла в конце адиабатного процесса расширения пара до критического давления  $p_{кр} = 0,546 p_1$  определяется по  $i_s$ -диаграмме.

Площадь минимального сечения сопла Лавалья может быть определена из уравнения неразрывности потока

$$f_{\min} = \frac{M v_{кр}}{c_{кр}}$$

где  $v_{кр} = v_1 (p_1/p_{кр})^{1/k}$  для газов. Для водяного пара величина  $v_{кр}$  может быть определена по  $i_s$ -диаграмме.

Так как в процессе адиабатного дросселирования газа его энтальпия не изменяется, то линия, изображающая условно этот процесс в  $i_s$ -диаграмме, будет параллельна оси  $s$ .

### Задача 21

Для решения указанных задач используется  $i_d$ -диаграмма влажного воздуха. По заданным значениям  $t$  и  $\phi$  в задаче 21 находится влагосодержание  $d$ , т.е. количество водяного пара, содержащееся в 1 кг сухого воздуха, а затем количество влаги, всасываемой в цилиндр

## ПРИЛОЖЕНИЯ

**Таблица 1 - Средние объемные теплоемкости газов при  $P=\text{const}$  в интервале температур  $0 \div t, ^\circ\text{C}$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К).**

$t, ^\circ\text{C}$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	Воздух
0	1,600	1,299	1,306	1,494	1,297
100	1,700	1,300	1,318	1,505	1,300
200	1,737	1,304	1,335	1,522	1,307
300	1,863	1,311	1,356	1,542	1,317
400	1,930	1,321	1,387	1,565	1,329
500	1,989	1,332	1,398	1,590	1,343
600	2,041	1,345	1,417	1,615	1,456
700	2,088	1,359	1,434	1,641	1,371
800	2,131	1,372	1,450	1,668	1,384
900	2,169	1,385	1,465	1,696	1,398
1000	2,204	1,397	1,478	1,723	1,410
1100	2,235	1,409	1,489	1,750	1,421
1200	2,264	1,420	1,501	1,777	1,433
1300	2,290	1,431	1,511	1,803	1,443
1400	2,314	1,441	1,520	1,828	1,453
1500	2,335	1,450	1,529	1,853	1,462
1600	2,356	1,459	1,538	1,876	1,471
1700	2,374	1,467	1,546	1,900	1,479
1800	2,392	1,475	1,554	1,921	1,487
1900	2,407	1,482	1,562	1,942	1,494
2000	2,422	1,489	1,569	1,963	1,501

**Таблица 2 - Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения  
(аргумент-давление)**

<b>p,</b> <b>МПа</b>	<b>t,</b> <b>°C</b>	<b>v',</b> <b>м<sup>3</sup>/кг</b>	<b>v'',</b> <b>м<sup>3</sup>/кг</b>	<b>i',</b> <b>кДж/кг</b>	<b>i'',</b> <b>кДж/кг</b>	<b>r,</b> <b>кДж/кг</b>	<b>S',</b> <b>кДж/(кг·К)</b>	<b>S'',</b> <b>кДж/(кг·К)</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
0,003	24,1	0,00100	45,67	101,0	2545	2444	0,354	8,578
0,004	28,98	0,00100	34,80	121,4	2554	2433	0,422	8,475
0,005	32,90	0,00101	28,19	137,8	2561	2423	0,476	8,395
0,10	99,63	0,00104	1,694	417,5	2676	2258	1,303	7,361
0,12	104,8	0,00105	1,429	439,4	2684	2244	1,361	7,299
0,14	109,3	0,00105	1,237	458,4	2691	2232	1,411	7,248
0,16	113,3	0,00105	1,092	475,4	2697	2221	1,455	7,203
0,18	116,9	0,00106	0,978	490,7	2702	2211	1,494	7,164
0,20	120,3	0,00106	0,886	504,7	2707	2202	1,530	7,128
0,40	143,6	0,00108	0,462	604,7	2738	2143	1,776	6,897
0,60	158,8	0,00110	0,315	670,4	2756	2086	2,931	6,760
0,80	170,4	0,00112	0,240	720,9	2768	2047	2,046	6,662
1,0	179,9	0,00113	0,194	762,6	2777	2014	2,138	6,585
1,2	187,9	0,00114	0,163	798,4	2783	1985	2,216	6,521
1,4	195,0	0,00115	0,141	830,1	2788	1958	2,284	6,466
1,6	201,4	0,00116	0,1237	858,6	2792	1934	2,344	6,419
1,8	207,1	0,00117	0,1103	884,6	2795	1910	2,398	6,376
2,0	212,4	0,00118	0,0995	908,6	2797	1889	2,446	6,337
2,2	217,2	0,00119	0,0906	930,9	2799	1868	2,492	6,302
2,4	221,8	0,00119	0,0832	951,9	2800	1848	2,533	6,269
2,6	226,0	0,00120	0,0769	971,7	2801	1829	2,574	6,239
2,8	230,0	0,00121	0,0714	990,5	2802	1811	2,611	6,210
3,0	233,8	0,00122	0,0666	1008,4	2802	1793	2,646	6,183
3,5	242,5	0,00123	0,0570	1049,8	2801	1751	2,725	6,122
4,0	250,3	0,00125	0,0494	1087,5	2799	1712	2,797	6,067
4,5	257,4	0,00127	0,0440	1122,2	2796	1674	2,861	6,017
5,0	263,9	0,00129	0,0394	1154,6	2793	1638	2,924	5,971

**Таблица 3 - Физические свойства сухого воздуха при давлении 760 мм рт.ст.**

$t,$ $^{\circ}\text{C}$	$\rho,$ $\text{кг/м}^3$	$c_{\text{ср.}}$ $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda$ $10^2, \text{Вт/(мК)}$	$A$ $10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu$ $10^6, \text{П}\cdot\text{с/м}^2$	$\gamma$ $10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$Pr$
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	11,61	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680

**Таблица 4 - Физические свойства воды на линии насыщения**

$\rho$ $10^{-5}, \text{Па}$	$\rho,$ $\text{кг/м}^3$	$I,$ $\text{кДж/кг}$	$c_p,$ $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\lambda,$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$a$ $10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu$ $10^6,$ $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$	$\nu$ $10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$Pr$
1,013	999,9	0	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	13,5
1,013	999,7	42,04	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	9,45
1,013	998,2	83,91	4,183	0,597	14,3	1004	1,006	7,03
1,013	995,7	125,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	5,45
1,013	992,2	167,5	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	4,36
1,013	988,1	209,3	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	3,59
1,013	983,1	251,1	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	3,03
1,013	977,8	293,0	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	2,58
1,013	971,8	335,0	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	2,23
1,013	965,3	377,0	4,203	0,676	16,5	314,9	0,326	1,97
1,013	958,4	419,1	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	1,75
1,98	943,1	503,7	4,250	0,686	17,1	237,4	0,252	1,47
3,61	926,1	589,1	4,287	0,685	17,2	201,4	0,217	1,26
6,18	907,4	657,4	4,346	0,681	17,8	173,6	0,191	1,10
10,03	886,9	763,3	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	1,03
15,55	863,0	852,5	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	0,932
23,20	840,3	943,7	4,614	0,640	16,5	124,6	0,148	0,898
33,48	813,6	1037,5	4,760	0,617	16,0	114,8	0,141	0,883
46,94	784,0	1135,7	4,980	0,593	15,2	105,9	0,135	0,892
64,19	750,7	1236,7	5,300	0,565	14,3	98,1	0,131	0,917
85,92	712,5	1344,9	5,760	0,532	13,0	91,2	0,128	0,986

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### *Основная:*

1. Штеренлихт А.Б. Гидравлика. Учебник. - М.: Колосс, 2009.
2. Кузьминский Р.А. Газодинамика. Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2011.
3. Давидсон В.Е. Основы газодинамики в примерах и задачах. Учебное пособие. - М.: Издательский центр «Академия», 2008.

### *Дополнительная:*

1. Бекнев В.С. и др. Сборник задач и упражнений по газовой динамике. - М.: Машиностроение, 1992.
2. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика. - М.: Стройиздат, 1987.
3. Бондарев Е.Н. и др. Аэрогидродинамика. - М.: Машиностроение, 1993.
4. Давидсон В.Е. Основы газовой динамики в задачах. - М.: Высшая школа, 1987.
5. Самойлович Г.С. Газодинамика. - М.: Машиностроение, 1990.
6. Большаков В.А., Константинов Ю.М. и др. Справочник по гидравлике. - Киев: Вища школа, 1977.
7. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. Справочное пособие. - М.: Стройиздат, 1987.
8. Журнал. Водоснабжение и санитарная техника.