

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»

Решения задач размещены на сайте zadachi24.ru

ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Задание на контрольную работу №1 с методическими указаниями
по дисциплине для студентов-специалистов 3 курса,
специальности: «Наземные транспортно-технологические средства»

специализации: «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и
оборудование»

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 ε 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°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 Δt_w ? Теплообменом рабочих тел установки с окружающей средой пренебречь.

13. В закрытом сосуде объемом 10 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 λ 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° .

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 ϕ . 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 | ε | 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 ₂ | 18 | 14 | 10 | 17 | 10 | 10 | 12 | 16 | 13 | 18 |
| | H ₂ O | 1 | 15 | 6 | 5 | 4 | 7 | 14 | 7 | 12 | 10 |
| | N ₂ | 65 | 45 | 76 | 70 | 80 | 60 | 47 | 62 | 54 | 46 |
| | O ₂ | 16 | 26 | 8 | 8 | 6 | 18 | 27 | 15 | 21 | 26 |
| | V, м ³ | 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 ⁰ | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 600 | 500 | 500 | 300 | 200 | |
| 3 | ε | 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 ³ 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 ₂ , C ⁰ | 120 | 115 | 110 | 105 | 100 | 95 | 90 | 85 | 80 | 75 |
| 6 | β | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 6,5 | 7 | 7,5 |
| | t ₂ , C ⁰ | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 | 105 | 110 | 115 | 120 |
| 7 | t ₁ , C ⁰ | 410 | 420 | 430 | 440 | 450 | 460 | 470 | 480 | 490 | 500 |
| | t ₂ , C ⁰ | 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 ₁ , 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 |
| | ε | 2 | 2,2 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 3,0 | 3,1 |
| 11 | p ₁ , 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 |
| | Δt_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 ⁰ | 400 | 420 | 440 | 460 | 480 | 500 | 520 | 540 | 560 | 580 |
| 15 | t ₁ , C ⁰ | 270 | 480 | 290 | 320 | 400 | 530 | 420 | 500 | 520 | 560 |
| | s ₁ , κДж/(кг-К) | 7,7 | 8,2 | 7,4 | 7,5 | 7,7 | 8 | 7,3 | 7,5 | 6,7 | 7,3 |
| 16 | ε | 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 ₁ , МПа | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1 | 1,1 | 1,2 | 1 |
| | t ₁ , C ⁰ | 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 | $p_1, \text{МПа}$ | 5 | 5 | 4 | 4 | 3,5 | 3,5 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| | $t_1, ^\circ\text{C}$ | 300 | 350 | 400 | 350 | 300 | 350 | 400 | 350 | 300 | 400 |
| 20 | $p_1, \text{МПа}$ | 1,6 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| | $t_2, ^\circ\text{C}$ | 140 | 131 | 121 | 115 | 110 | 118 | 120 | 125 | 122 | 110 |
| 21 | $t_2, ^\circ\text{C}$ | 12 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 |
| | $\varphi, ^\circ\text{C}$ | 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:

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

или

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

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

μ - масса 1 кмольа 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 μ_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

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

где p - общее давление смеси газов.

В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают мольную теплоемкость μc , кДж/(моль·К), массовую — c , кДж/(кг·К) и объемную — c' , кДж/(м³·К). Объемную теплоемкость относят к 1 м³ 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 μ - молекулярная масса газа;

ρ_0 - плотность газа при нормальных условиях, кг/м³.

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.

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

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

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 |
|----------------------|-----------------------------|-----------|------|
| | μc_v | μc_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°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 -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 -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, м³/кг;

f - площадь данного сечения сопла, м²;

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, м³/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 Лаваля, 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 Лаваля 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 ϕ 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/(м³·К).

| $t, ^\circ\text{C}$ | CO_2 | N_2 | O_2 | H_2O | 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)**

| p, МПа | t, °C | v', м³/кг | v'', м³/кг | i', кДж/кг | i'', кДж/кг | r, кДж/кг | S', кДж/(кг·К) | S'', кДж/(кг·К) |
|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 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

| ρ $10^{-5}, \text{Па}$ | ρ , кг/м^3 | I , кДж/кг | c_p , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ | λ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ | a $10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | μ 10^6 , $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ | ν $10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | 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.