

МПС СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ ЗАОЧНЫЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

ПОДЛЕЖИТ ВОЗВРАТУ

Одобрено кафедрой
Теплотехники

**Решения задач размещены
на сайте zadachi24.ru**

ТЕПЛОТЕХНИКА

Задания на контрольные работы № 1 и 2
с методическими указаниями
для студентов IV курса

специальности

ТЕПЛОВОЗЫ И ТЕПЛОВОЗНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Часть I

Москва — 1987

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Выполнению контрольных работ должно предшествовать тщательное изучение соответствующего раздела курса «Теплотехника». 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 краткими. Их необходимо сопровождать формулами, графиками, схемами и эскизами конструкций. При решении задач студент указывает, по какой формуле и в каких единицах измерения определяются величины, откуда взяты подставленные в формулу значения (если они не содержатся в условиях задачи). Результаты решения сводятся в таблицу.

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

В приложениях к заданиям (часть II) приведены справочные таблицы средних изобарных теплоемкостей некоторых газов, термодинамических свойств воды и водяного пара в состоянии насыщения, физических свойств сухого 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. На графиках необходимо показать все нужные числовые данные (значения давления, температуры и пр.). При решении задач числовые расчеты нужно выполнять в единицах системы СИ.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теплотехника / Под ред. И. Н. Сушкина. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. М.: Металлургия, 1973. 479 с.
2. Теплотехника / Под ред. Г. А. Матвеева. Учебное пособие для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1981. 480 с.
3. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1977. 344 с.
4. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике. Изд. 5-е. М.: Машиностроение, 1973. 344 с.
5. Краснощеков Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. Учебное пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. М.: Энергия, 1980. 288 с.
6. Панкратов Г. П. Сборник задач по теплотехнике. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 248 с.

Таблица вариантов

Задание № 1 и № 2	Последняя цифра шифра студента									
	1	2	3	(4)	5	6	7	(8)	9	0
Номер контрольных вопросов	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
Номер контрольных задач	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	12	11	13	14	15	16	12	14	15	16
	21	17	18	19	20	17	18	19	20	22
	23	30	24	25	26	27	28	29	25	30

Студент выбирает контрольные вопросы и задачи из таблицы вариантов, а числовые данные к задачам по предпоследней цифре шифра — из соответствующих таблиц каждой задачи, которые приведены в конце задания.

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ № 1

по разделу

«ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА»

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Напишите уравнение состояния идеального газа. Поясните физический смысл газовой постоянной. Как определяется 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 для любого термодинамического процесса?
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 энталпия газа и как определяется изменение энталпии 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 идеальной 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 -диagramмах.
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. Какова сущность процесса дросселирования и каково практическое применение этого процесса? Как условно изображается процесс дросселирования в is -диаграмме?
15. Что называется влажным воздухом? Дайте определение относительной влажности воздуха, влагосодержания 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 компрессоре является энергетически выгодным?

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 - и 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 $t=127^\circ\text{C}$ так, что отношение конечного объема к начальному равно ε . 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 -диagramмах.

4. Требуется 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 , $\frac{\text{кДж}}{\text{с}}$. При сжатии от начального абсолютно го давления 0,1 МПа температура воздуха возрастает от 15°C

до t_2 . Определить показатель политропы процесса сжатия, конечное давление, затраченную работу, а также изменение в процессе удельной энтропии газа.

6. Определить показатель политропы сжатия воздуха в одноступенчатом поршневом компрессоре, если давление в процессе возрастает в β 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. Требуется 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:

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

8. Диаметр цилиндров тепловозного дизеля $D = 318$ мм, ход поршней $s = 330$ мм, степень сжатия $\varepsilon = 12$.

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 . 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 ε 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. $c_{pm} = 1,0258 + 0,00008382t$ 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 газа $t_1 = 27^\circ\text{C}$.

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 энталпия 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 e раз. Определить состояние и параметры пара в конце процесса сжатия, а также изменение удельной энталпии 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 $1,4 \text{ МПа}$? Атмосферное давление $B = 750 \text{ мм рт. ст.}$ Потерей давления на мяtingе пара, теплообменом при прохождении отверстия и скоростью пара на входе в отверстие клапана пренебречь.

18. Определить основные размеры сопла Лаваля, через которое вытекает воздух в количестве $0,5 \text{ кг/с}$ в среду с давлением $0,1 \text{ МПа}$. Начальные параметры газа: абсолютное давление p_1 и температура t_1 . Истечение считать адиабатным. Потерями энергии на трение и скорость воздуха на входе в сопло 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 $0,1 \text{ МПа}$. 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 $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ 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. Для окисления топлива в цилиндры двигателя внутреннего сгорания всасывается 200 кг атмосферного воздуха в час при давлении $B = 745 \text{ мм рт. ст.}$, температуре t и относительной влажности φ . Какое количество воды всасывается двигателем в час?

22. Какое количество воздуха необходимо пропустить через сушильную камеру, чтобы от материала, помещенного в нее, отвести 1 т воды? Наружный воздух при барометрическом давлении $B = 745 \text{ мм рт. ст.}$, имея температуру $t_1 = 10^\circ\text{C}$ и относительную влажность $\varphi_1 = 50\%$, в калорифере подогревается до температуры t_2 , а затем воздух поступает в сушильную камеру и выходит из нее при относительной влажности $\varphi_2 = 90\%$. Решение задачи проиллюстрировать в Id -диаграмме.

23. 1 кг сухого воздуха в прямом обратимом цикле Карно совершает полезную работу I_0 . Начальное абсолютное давление воздуха 10 МПа , начальная абсолютная температура 1200 К . В цикле к газу подводится теплота q_1 . Минимальное давление в цикле $0,1 \text{ МПа}$. Определить термический КПД и основные параметры во всех переходных точках цикла. Вычертить цикл в pv - и Ts -координатах.

24. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме определить степень сжатия, основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, полезную работу, подведенную и отведенную теплоту, если повышение давления в процессе сжатия β и понижение температуры в процессе отвода теплоты составляет Δt . Рабочее тело (1 кг сухого воздуха) в начальной точке цикла имеет давление $0,1$

МПа и температуру 67°C . Изобразить цикл в pv - и Ts -координатах.

25. Поршневой двигатель внутреннего сгорания работает по идеальному циклу с подводом q_1 теплоты при постоянном давлении. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, его термический КПД и полезную работу, если начальное абсолютное давление $0,1 \text{ МПа}$, начальная температура 80°C и степень сжатия ε . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры. Рабочее тело 1 кг сухого воздуха. Изобразить цикл в pv - и Ts -координатах.

26. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты, а также степень сжатия, термический КПД и полезную работу, если заданы характеристики цикла λ и ρ . В начальной точке цикла $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и $t_1 = 67^{\circ}\text{C}$. Температура в конце адиабатного процесса сжатия рабочего тела равна 600°C . Рабочее тело — 1 кг сухого воздуха. Изобразить цикл в pv - и Ts -координатах.

27. Степень повышения давления в компрессоре газотурбинной установки (ГТУ) равна λ , температура рабочего тела

(для $k = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$) перед соплами турбины равна 800°C . В

идеальном цикле ГТУ теплота подводится при постоянном давлении. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, удельную полезную работу цикла, а также изменение удельной энтропии в процессе подвода теплоты, приняв теплоемкость рабочего тела не зависящей от температуры. Начальные параметры цикла $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и $t_1 = 27^{\circ}\text{C}$. Цикл представить в pv - и Ts -координатах.

28. Теоретический одноступенчатый поршневой компрессор (без объема вредного пространства) имеет подачу воздуха V_1 при давлении $0,1 \text{ МПа}$ и температуре 17°C . Определить температуру и объем воздуха в конце политропного ($n=1,3$) процесса сжатия до абсолютного давления p_2 . Определить также теоретическую мощность привода компрессора и сравнить ее с мощностью изотермического сжатия.

29. Вычислить и показать графически зависимость термического КПД цикла Ренкина паросиловой установки от начальной температуры пара, приняв ее равной $400, 450, 500, 550$ и 600°C при одинаковых значениях начального абсолютного p_1 и конечного $p_2 = 5 \text{ кПа}$ давления. Показать также влияние повышения начальной температуры пара в цикле на из-

Таблица

Числовые данные к задачам контрольной работы № 1

Номер задачи	Величины	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	8 47	9 40	10 37	11 30	12 27	13 20	14 17	15 10	16 7	17 0
2	Массовый состав смеси, %:										
	CO_2	18	14	10	17	10	15	12	16	13	18
	H_2O	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
	$V, \text{ м}^3$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	$p, \text{ МПа}$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
	$t, ^{\circ}\text{C}$	200	300	400	500	600	600	500	400	300	200
3	ε	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	$G, \text{ кг}$	20	19	18	17	16	15	14	13	12	10
	$p_1, \text{ МПа}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
4	$p, \text{ МПа}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
5	$10^3 G, \text{ кг/с}$	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
	$Q, \text{ кДж/с}$	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7
	$t_2, ^{\circ}\text{C}$	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
	$t_2, ^{\circ}\text{C}$	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
7	$t_1, ^{\circ}\text{C}$	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
	$t_2, ^{\circ}\text{C}$	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	$p_1, \text{ МПа}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
10	$p, \text{ МПа}$	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	$p_1, \text{ МПа}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,5

Продолжение табл.

Номер задачи	Величина	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
12	p , МПа	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,35	0,4
	G , г/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 , °С	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580
15	t_1 , °С	270	480	290	320	400	530	420	500	520	560
	s_1 , кДж/(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 , °С	200	220	240	260	280	300	320	340	460	48
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 , °С	12	12	14	16	18	20	22	24	26	28
	φ , %	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
22	t_2 , °С	60	62	64	66	68	70	72	74	76	80
23	q_1 , кДж/кг	30	31	32	33	34	35	34	33	32	30
	l_0 , кДж/кг	20	20	20	22	24	25	26	23	22	21
24	β	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5
	Δt , К	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
25	q_1 , кДж/кг	1000	950	900	850	800	750	700	650	600	600
	ϵ	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5
26	λ	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
	ρ	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,5	1,5	1,5
27	λ	6	6,2	6,4	6,6	6,8	7	7,2	7,4	7,6	7,8
28	V_1 , м³/мин	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
	p_2 , бар.	7	6,5	6	5,5	5	4,8	4,6	4,4	4,2	4
29	p_1 , бар.	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
30	p_1 , бар.	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
	t_1 , °С	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580
	p_2 , бар.	10	10	10	15	15	20	20	30	40	50

менение степени влажности пара, выходящего из парового двигателя. Решение задачи проиллюстрировать на *is*-диаграмме.

30. Определить, как при понижении начального давления путем дросселирования изменяется располагаемый теплоперепад и термический КПД цикла Ренкина паросиловой установки, если начальное абсолютное давление пара p_1 , температура t_1 , а давление в конденсаторе установки 5 кПа. Давление, до которого дросселируется пар, равно p_2 . Решение задачи проиллюстрировать на *is*-диаграмме.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 1

Задачи 1—11

Задачи составлены по 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.

Уравнение состояния идеального газа:

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

или

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

где $R = 8314 / \mu$ — газовая постоянная, Дж/(кг·К);
 μ — масса 1 кмоля 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

$$\mu_{\text{см}} = \sum_i r_i \mu_i \quad \text{и через массовые доли} \quad \mu_{\text{см}} = 1 / \sum_i^n m_i / \mu_i,$$

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 $R = 8314 / \mu_{\text{см}}$, Дж/(кг·К).

Для определения парциального давления отдельного компонента ρ_i , входящего в смесь, служат формулы $\rho_i = r_i p$ и $\rho_i = m_i \frac{R_t}{R} p$, где p — общее давление смеси газов.

В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают мольную теплоемкость μc , кДж/(кмоль·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.

Мольная, массовая и объемная теплоемкости могут быть при постоянном давлении и при постоянном объеме.

Разность массовых теплоемкостей при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v равна газовой постоянной: $c_p - c_v = R$ (уравнение Майера).

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, $c_v = \frac{R}{k-1}$; $c_p = kc_v$.

Теплоемкость газа зависит от его температуры. В приближенных расчетах часто пренебрегают этой зависимостью, т. е. теплоемкость газов одинаковой атомности считают величиной постоянной. Значения мольных теплоемкостей и показатель адиабаты приведены в таблице:

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 во II части задания приведены средние мольные теплоемкости некоторых газов в пределах от 0° до t . При пользовании этой таблицей в необходимых случаях производится интерполяция.

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

и мольная теплоемкость $\mu c_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \mu c_i$.

Для нахождения, например, средней мольной теплоемкости в пределах температур от t_1 до t_2 надо из соответствующей таблицы взять теплоемкость μc_{m1} и μc_{m2} — соответственно в пределах 0° — t_1 и 0° — t_2 (средние теплоемкости сопровождаются индексом « m »). Затем по выражению

$$\mu c_m = \frac{\mu c_{m2} t_2 - \mu c_{m1} t_1}{t_2 - t_1} \quad \text{определенить искомую теплоемкость.}$$

По аналогичным формулам определяются c и c' .

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, энталпии и энтропии не зависит от характера процесса и при постоянной теплоемко-

сти 1 кг идеального газа подсчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} u_2 - u_1 &= c_v (t_2 - t_1); \\ i_2 - i_1 &= c_p (t_2 - t_1); \\ s_2 - s_1 &= c \ln T_2/T_1. \end{aligned}$$

В последнем выражении c — теплоемкость соответствующего процесса. Для политропного процесса теплоемкость

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

Удельная работа политропного процесса:

$$l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

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:

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

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

$$L = Q = GRT \ln V_2/V_1.$$

Изменение удельной энтропии в изотермическом процессе

$$s_2 - s_1 = R \ln V_2/V_1.$$

Следует помнить, что

$$TK = t^\circ C + 273,15,$$

но $dT = dt$, т. е. $\Delta T = \Delta t$, К.

Задачи 12 и 13

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

В задаче 13 по заданному давлению надо в соответствующей таблице насыщенного пара найти значения удельных объемов капящей жидкости v' и пара v'' . Объем жидкости в сосуде $V_k = G_k v'$. Масса парообразной фазы $G_n = V_n/v''$.

Задачи 14—16

Задачи решаются при помощи *is*-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 *is*-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 теплопередачи, 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)

$$Gv = fc,$$

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 $(p_2/p_1)_{kp}$, то применяют суживающееся сопло. В этом случае теоретическая скорость истечения определяется по формуле, м/с,

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

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 энталпии, кДж/кг, пара в начале и конце адиабатного процесса истечения, определяемые по *is*-диаграмме (рис. 1).

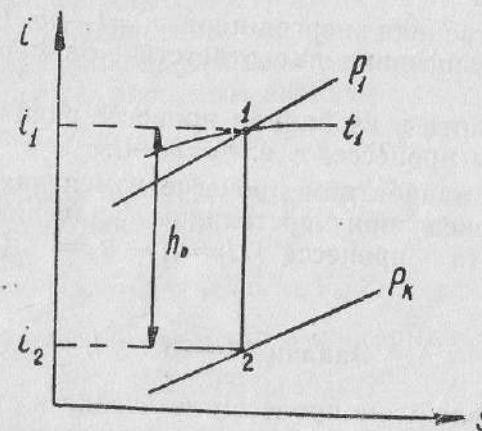


Рис. 1

Критическое отношение давлений $(p_2/p_1)_{kp}$ 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 $p_2/p_1 < (p_2/p_1)_{kp}$, 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 критиче-

ская скорость в минимальном сечении для двухатомных газов — по формуле $c_{kp} = 1,08 \sqrt{p_1 v_1}$, или $c_{kp} = 1,08 \sqrt{RT_1}$. Для перегретого пара $c_{kp} = 44,76 \sqrt{i_1 - i_{kp}}$, где i_{kp} — энталпия пара в минимальном сечении сопла в конце адиабатного процесса расширения пара до критического давления $p_{kp} = 0,546 p_1$ определяется по *is*-диаграмме. Площадь минимального сечения сопла Лаваля может быть определена из

уравнения неразрывности потока $f_{min} = \frac{Mv_{kp}}{c_{kp}}$, где $v_{kp} = v_1 (\rho_1 / \rho_{kp})^{1/k}$ для газов. Для водяного пара величина v_{kp} может быть определена по *is*-диаграмме. Так как в процессе адиабатного дросселирования газа или пара энталпия не изменяется, то линия, изображающая условно этот процесс в *is*-диаграмме, будет параллельна оси *s*.

Задачи 21—22

Для решения указанных задач используется *Id*-диаграмма влажного воздуха. По заданным значениям *t* и *φ* в задаче 21 находится влагосодержание *d*, т. е. сколько водяного пара содержится в 1 кг сухого воздуха, а затем количество влаги, всасываемой в цилиндр двигателя с 200 кг воздуха в час. В задаче 22 количество воздуха в кг для испарения 1 кг влаги в сушильной камере равно $1000/(d_2 - d_1)$, где *d*₁ и *d*₂ — соответственно влагосодержания в г/кг сухого воздуха на входе его в сушильную камеру и на выходе из нее.

Задачи 23—27

Вычерчивается цикл в *pv*- и *Ts*-диаграммах с обозначением всех переходных точек цикла. Цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат. Неизвестное значение удельного объема в конце изотермического расширения может быть определено из формулы теплоты этого процесса.

Так как в теоретических циклах поршневых двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установках процессы сжатия и расширения с понижением давления являются адиабатными, то основные параметры в точках этих процессов могут быть определены из зависимостей между начальными и конечными параметрами адиабатного процесса (см. указания к задачам 1—11).

В задаче 25 неизвестное значение температуры в соответствующей точке процесса определяется из формулы теплоты данного процесса. В ряде точек цикла неизвестный пара-

метр состояния рабочего тела находится из уравнения состояния идеального газа. Если в данной задаче определены термический КПД η_t и удельная полезная работа I_0 , то удельное количество подведенной теплоты в цикле $q_1 = I_0/\eta_t$, а отведенной — $q_2 = q_1 - I_0$.

Задача 28

Если объем всасываемого газа — V_1 , м³/с, то теоретическая секундная работа (мощность) процесса сжатия политропного

$$L_{\text{сж}} = \frac{1}{n-1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right].$$

При политропном сжатии теоретическая мощность привода компрессора в n раз больше мощности процесса сжатия.

Теоретическая работа привода компрессора при изотермическом сжатии равна работе процесса сжатия:

$$L = p_1 V_1 \ln(p_2/p_1).$$

Задачи 29, 30

Термический КПД теоретического паросилового цикла (цикла Ренкина)

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2},$$

где i_1 — энталпия пара в начале адиабатного процесса расширения пара в паровом двигателе (точка 1). Значение i_1 определяется по *is*-диаграмме по заданным начальным параметрам пара (см. рис. 1);

i_2 — энталпия пара в конце адиабатного процесса расширения пара (точка 2) находится на пересечении линии расширения $s_1 = \text{const}$ с изобарой p_2 заданного давления в конденсаторе, рис. 1;

i'_2 — энталпия кипящей жидкости (конденсата) при заданном давлении в конденсаторе. Значение i'_2 берется из табл. 2 приложения в конце II части задания.

Процесс дросселирования пара условно изображается линией постоянной энталпии.

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ № 2

по разделу

«ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ»

Студент выбирает контрольные вопросы и задачи из таблицы вариантов (см. с. 2), а числовые данные к задачам — из соответствующих таблиц, которые приведены в конце задания.

Контрольные вопросы

- Объясните физическую сущность трех основных способов переноса теплоты.
- Сформулируйте закон теплопроводности Фурье. Дайте пояснения к понятиям «плотность теплового потока» и «температурный градиент».
- Изобразите графически характер распределения температуры по толщине плоской трехслойной стенки для стационарного теплового режима при следующих соотношениях между коэффициентами теплопроводности материала каждого слоя:

$$\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3; \\ \lambda_1 > \lambda_2 = \lambda_3.$$

Напишите соответствующие соотношения для перепадов температур Δt_i в отдельных слоях, приняв их толщины δ_i одинаковыми.

- Дайте определение коэффициентов теплопроводности, теплоотдачи и теплопередачи.
- Стенка теплообменной поверхности парового котла омыается с одной стороны горячими газами, а с другой — кипящей водой. Почему температура поверхности со стороны воды значительно меньше отличается от температуры воды, чем от температуры газов?
- Что такое термическое сопротивление цилиндрической стенки и как оно определяется для многослойной стенки?
- Какую роль играет вязкостный подслой в конвективном теплообмене при турбулентном течении жидкости около стенки?
- В чем сущность подобия физических процессов? Приведите основные критерии теплового подобия.
- Для определения коэффициента теплопередачи при турбулентном течении жидкости в трубах используется следующая критериальная формула

$$N_{u_k} = 0,021 Re_k^{0,8} Rr_k^{0,43} (Pr_k/Pr_{ct})^{0,25} C_l.$$

Используя указанную формулу, поясните, как изменится коэффициент теплоотдачи, если при заданном расходе теплоносителя трубу с внутренним диаметром d заменить двумя трубами вдвое меньшего диаметра. Прочие условия оставить неизменными.

10. Для определения коэффициента теплоотдачи при ламинарном течении жидкости в каналах используется следующая критериальная формула:

$$Nu_{jk} = 0,15 Re_{jk}^{0,33} Pr_{jk}^{0,43} Gr_{jk}^{0,1} (Pr_{jk}/Pr_{cr})^{0,25} C_L$$

Поясните, влияние какого фактора на теплообмен учитывается в этой формуле критерии Gr_{jk} и Pr_{cr} .

11. Среднее значение критерия Нуссельта при поперечном обтекании газами коридорного пучка труб определяется (при $Re > 4 \cdot 10^3$) по следующей критериальной формуле:

$$Nu = 0,177 Re^{0,84} C_z$$

Поясните, используя указанную формулу, каково влияние скорости и диаметра труб на средний коэффициент теплоотдачи. Что учитывает в формуле коэффициент C_z ?

12. Средний коэффициент конвективной теплоотдачи при свободном движении теплоносителя около горизонтальной трубы определяется на основании следующей критериальной зависимости:

$$Nu = 0,51 (Gr_{jk} Pr_{jk})^{0,25} (Pr_{jk}/Pr_{cr})^{0,25}$$

Поясните критерии, входящие в указанную зависимость. Влияние какого фактора учитывается сомножителем $(Pr_{jk}/Pr_{cr})^{0,25}$? В каком виде можно представить эту формулу для воздуха?

13. Каково влияние отдельных факторов на коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации пара на горизонтальных и вертикальных трубах?

14. Плотность теплового потока q , Вт/м², при пузырчатом кипении воды в большом объеме (для $p < 3 \cdot 10^6$ Па) в условиях свободной конвекции можно определить по следующей формуле:

$$q = 0,145 \Delta t^{2,33} p^{0,5},$$

где Δt — температурный напор; $\Delta t = t_h - t_{cr}$;
 p — давление, Па.

Напишите формулу, связывающую коэффициент теплоотдачи α с плотностью теплового потока q и давлением p .

15. В чем заключается опасность наступления пленочного режима кипения?

16. В чем особенности излучения и поглощения лучистой энергии газами?

17. Дайте определение рекуперативного, регенеративного и смесительного теплообменников.

18. В каком случае изменение температуры греющего теплоносителя в теплообменнике будет больше, чем нагреваемого, и в каком меньше?

19. Укажите преимущества и недостатки противоточной и прямоточной схем движения теплоносителей в теплообменниках.

20. На каких основных уравнениях базируется тепловой расчет теплообменных аппаратов? В чем сущность проектного и поверочного тепловых расчетов?

ЗАДАЧИ

1. Стенка холодильника, состоящая из наружного слоя изоляционного кирпича толщиной $\delta_1 = 250$ мм и внутреннего слоя совелита толщиной $\delta_2 = 200$ мм, имеет температуру наружной поверхности t_1^{cr} и внутренней t_3^{cr} . Коэффициенты теплопроводности материала слоев соответственно равны: $\lambda_1 = 0,24$ Вт/(м·К) и $\lambda_2 = 0,09$ Вт/(м·К). Определить плотность теплового потока через стенку и температурные градиенты в отдельных слоях. Представить графически распределение температуры по толщине стенки.

2. По стальному паропроводу с внутренним диаметром d_1 и толщиной стенки $\delta_1 = 8$ мм протекает перегретый пар с температурой t_1 . Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной δ_2 , коэффициент теплопроводности которой $\lambda_2 = 0,1$ Вт/(м·К). Температура окружающего воздуха $t_2 = 25^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплоотдачи со стороны пара и окружающего воздуха соответственно равны: $\alpha_1 = 250$ Вт/(м²·К), $\alpha_2 = 12$ Вт/(м²·К). Определить потери тепла g_e на 1 пог. м паропровода, а также температуру наружной поверхности изоляции. Коэффициент теплопроводности стали λ_1 принять равным 35 Вт/(м·К).

3. Коэффициент теплопередачи через наружное ограждение (стену) помещения k , коэффициент теплоотдачи от воздуха внутри помещения к поверхности стены α_1 . Определить на сколько градусов изменится температура внутренней поверхности стены, если температура наружного воздуха понизится на 25°C , а температура воздуха внутри помещения уменьшится на 5°C .

4. Теплопровод покрыт двумя слоями изоляции, имеющими одинаковую толщину δ . Средний диаметр второго слоя d_{m2}

в n раз больше среднего диаметра первого слоя $d_{\text{ср}}$, а коэффициент теплопроводности изоляции второго слоя в n раз меньше коэффициента теплопроводности первого слоя. На сколько процентов изменится потеря тепла (линейная плотность теплового потока q , Вт/пог. м), если при неизменных температурах наружной и внутренней поверхностей слои изоляции поменять местами?

5. До какого предельного значения можно понизить температуру воздуха в помещении, чтобы температура внутренней поверхности стены осталась не ниже $t_1^{\text{ср}}$ при температуре наружного воздуха $t_2 = -35^\circ\text{C}$, если толщина стены $\delta_{\text{ср}}$, коэффициент теплопроводности материала стены $\lambda_{\text{ср}}$, а коэффициенты теплоотдачи с внутренней и наружной сторон соответственно $\alpha_1 = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и $\alpha_2 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$?

6. По стальному неизолированному трубопроводу диаметром 80×5 мм течет холодильный агент, температура которого $t_2 = -20^\circ\text{C}$. Температура воздуха в помещении, где проходит трубопровод, $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха $\alpha_1 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, со стороны холодильного агента $\alpha_2 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. На сколько процентов снизится потеря холода, если трубопровод покрыть слоем изоляции с коэффициентом теплопроводности λ_2 толщиной δ_2 ?

7. Определить потери тепла через кладку камеры сгорания толщиной $\delta_{\text{ср}} = 0,45$ м, площадью $F = 8 \text{ м}^2$. Кладка выполнена в виде плоской стенки из шамотного кирпича, коэффициент теплопроводности которого $\lambda_{\text{ср}} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, связан с температурой зависимостью $\lambda_{\text{ср}} = 0,84 + 0,0006t$.

Температура газов в камере сгорания t_1 , температура холодного воздуха $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплоотдачи со стороны газов и воздуха соответственно α_1 и α_2 .

8. Какова толщина слоя изоляции паропровода, если при температуре внутренней ее поверхности $t_1^{\text{ср}}$ наружная поверхность диаметром d_2 имеет температуру $t_2^{\text{ср}} = 50^\circ\text{C}$? Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху $\alpha_2 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура воздуха $t_2 = 20^\circ\text{C}$.

9. Плоская стальная стенка толщиной $\delta_{\text{ср}} = 10$ мм омывается с одной стороны дымовыми газами с температурой $t_1 = 950^\circ\text{C}$, а с другой стороны — водой с температурой $t_2 = 250^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплопередачи со стороны газов и со стороны воды соответственно α_1 и α_2 . Коэффициент теплопроводности материала стенки $\lambda_{\text{ср}} = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Определить плотность теплового потока через стенку и температуру ее по-

верхностей со стороны газов и воды для случая чистой стеки, а также для случая, когда она покрыта слоем накипи с коэффициентом теплопроводности $\lambda_n = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ толщиной δ_n . Для обоих случаев показать графически распределение температуры по толщине стеки.

10. Голый металлический провод диаметром $d = 4$ мм имеет температуру поверхности $t_{\text{ср}} = 95^\circ\text{C}$. Активное электрическое сопротивление провода $r = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}/\text{м}$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности провода к окружающему воздуху α . Температура воздуха $t_{\text{в}}$. Какой будет температура поверхности этого провода $t'_{\text{ср}}$ под слоем изоляции толщиной $\delta = 3$ мм с коэффициентом теплопроводности λ при неизменном токе и прочих равных условиях? Определить также максимальное значение тока в изолированном проводе, если первоначальную температуру провода считать предельно допустимой. Дайте объяснение полученным результатам.

11. Определить требуемые значения кинематического коэффициента вязкости v_m и скорости течения жидкости w_m в модели, в которой исследуется теплообмен при вынужденной конвекции. Коэффициент температуропроводности жидкости в модели $a_m = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. В образце, представляющем собой канал с эквивалентным диаметром d_0 , протекает воздух со средней скоростью w_0 . Определяющая температура воздуха t_0 , давление $p_0 = 0,3 \text{ МПа}$. Геометрические размеры модели в шесть раз меньше размеров образца.

12. Определить значение коэффициента теплоотдачи при течении воздуха по цилиндрической трубе диаметром $d = 40$ мм. Средняя температура воздуха $t_{\text{в}}$, давление $p = 0,3 \text{ МПа}$, расход G . Относительная длина трубы $l/d > 50$.

13. По трубе с внутренним диаметром $d = 50$ мм течет вода со средней скоростью w . Средняя температура воды t_w , температура стенки трубы $t'_{\text{ср}}$ постоянна. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи и количество передаваемого в единицу времени тепла (линейную плотность теплового потока, Вт/м), если относительная длина трубы $l/d = 10$.

14. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании пучка коридорно расположенных труб диаметром $d = 20$ мм, если средняя определяющая скорость воздуха в пучке w , средняя температура воздуха $t_{\text{в}}$. Какова средняя линейная плотность теплового потока в пучке q_l , если температура поверхности трубы $t_{\text{ср}}$ постоянна и равна 200°C ? Поправкой на число рядов труб пренебречь.

15. По трубе диаметром $d = 40$ мм движется воздух при давлении $p = 0,1 \text{ МПа}$. Расход воздуха G , температура воздуха на входе $t'_{\text{в}}$. Какой должна быть длина трубы, имею-

щей температуру стенки $t_{cr} = 100^\circ\text{C}$, чтобы температура воздуха на выходе была t''_w ?

16. По цилиндрическому каналу диаметром $d = 14$ мм движется вода. Расход воды G , ее температура на входе t' . На каком расстоянии от входа средняя по сечению температура воды достигнет t'' , если температура внутренней поверхности канала $t_{cr} = 100^\circ\text{C}$ постоянна?

17. Найти среднее значение коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации сухого насыщенного водяного пара давлением p около горизонтальной трубы (диаметром $d = 0,03$ м и длиной $l = 0,8$ м), имеющей температуру поверхности t_{cr} . Какое количество указанных трубок потребуется для конденсации 500 кг пара в час?

18. Горизонтальный трубопровод с наружным диаметром $d = 0,25$ м, длиной $l = 20$ м имеет температуру поверхности t_{cr} степень черноты поверхности $\varepsilon_1 = 0,72$. Определить количество тепла, которое отдает трубопровод в окружающую среду излучением и конвекцией, кВт (в условиях свободного движения воздуха), если температура воздуха $t_w = 23^\circ\text{C}$. Как изменится суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением (отношение суммарного удельного теплового потока к разности температур поверхности и среды), если при прочих неизменных условиях путем специального покрытия уменьшить степень черноты поверхности до ε_2 ?

19. Трубопровод диаметром $d_1 = 150$ мм, имеющий температуру поверхности t_1 и степень черноты $\varepsilon = 0,75$, окружен цилиндрическим экраном диаметром d_2 , обе поверхности которого имеют степень черноты ε_2 .

Определить потери тепла излучением на 1 пог. м трубопровода при температуре окружающей среды $t_2 = 27^\circ\text{C}$, приняв ее поглощательную способность равной единице. На сколько процентов будут больше указанные потери при тех же условиях для трубопровода без экрана?

20. Для измерения температуры движущегося с относительно небольшой скоростью горячего воздуха в канале установлен термопара, показание которой t_r . Какова действительная температура воздуха, если коэффициент теплоотдачи от потока воздуха к спаю α , степень черноты спая $\varepsilon = 0,82$, а температура стенок канала t_{cr} ?

21. Определить температуру поверхности трубы с наружным диаметром d , если линейная плотность результирующего потока излучением от нее составляет q_i , а интегральная степень черноты поверхности ε . Температура окружающего воздуха $t_w = 17^\circ\text{C}$.

22. Определить расход греющего пара и требуемую площадь теплообменной поверхности пароводяного подогревателя для подогрева воды $t_w = 10^\circ\text{C}$ до $t''_w = 80^\circ\text{C}$. Давление греющего пара p , степень сухости x . Поверхность нагрева теплообменника состоит из стальных труб: $d_n = 30$ мм; $d_{bh} = 24$ мм; $\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к стене $a_1 = 6000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, от стенки к воде $a_2 = 5500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температуру конденсата на выходе из теплообменника принять равной температуре насыщения, соответствующей давлению p . Тепловыми потерями пренебречь.

23. Определить температуру масла t''_m на выходе из масляного холодильника тепловоза на основании следующих данных:

площадь теплообменной поверхности холодильника $F = 80 \text{ м}^2$;

расход охлаждаемого масла $G_m = 20 \text{ кг}/\text{с}$;

расход охлаждающей воды $G_w = 30 \text{ кг}/\text{с}$;

температура воды на входе в холодильник t'_w ;

температура масла на входе в холодильник $t'_m = 85^\circ\text{C}$;

коэффициент теплопередачи k ;

удельная теплоемкость масла $c_m = 2,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Схема движения теплоносителей противоточная.

24. Определить требуемую площадь теплообменной поверхности охладителя наддувочного воздуха дизеля на основании следующих данных:

температура воздуха на входе в охладитель $t'_n = 115^\circ\text{C}$;

температура воздуха на выходе из охладителя $t''_n = 65^\circ\text{C}$;

расход воздуха G_v :

температура охлаждающей воды на входе в охладитель t'_w ;

расход охлаждающей воды $G_w = 1,25 \text{ кг}/\text{с}$;

коэффициент теплопередачи $k = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Схемы движения теплоносителей:

а) противоточная;

б) прямоточная.

25. В рекуперативном прямоточном теплообменнике температура греющего и нагреваемого теплоносителей равна:

а) на входе в теплообменник $t'_1 = 200^\circ\text{C}$, $t'_2 = 20^\circ\text{C}$; б) на выходе из теплообменника t''_1 , t''_2 . Расход греющего теплоносителя G_1 , теплоемкость $c_1 = 4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Площадь теплообменной поверхности теплообменника $F = 25 \text{ м}^2$. Определить средний коэффициент теплопередачи k при заданной схеме движения теплоносителей. На сколько процентов увеличится количество передаваемого тепла, если при неизменных температурах теплоносителей на входе в теплообменник его пло-

щадь поверхности теплообмена будет в два раза больше, т. е. 50 м^2 ? Значение коэффициента теплопередачи считать неизменным.

26. Определить плотность теплового потока через плоскую стенку нагревательной печи, состоящую из двух слоев кладки: шамотного кирпича толщиной $d_1 = 0,56 \text{ м}$ и диатомитового кирпича $d_2 = 0,24 \text{ м}$, если температура внутренней поверхности кладки равна $t_1^{\text{ст}}$, а температура наружного воздуха $t_0 = 25^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности внутреннего слоя кладки $\lambda_1 = 0,95 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, наружного слоя $\lambda_2 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Коэффициент теплоотдачи конвекцией со стороны наружной поверхности $\alpha_k = 8,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, а ее степень черноты ε .

27. Между двумя вертикальными плоскими пластинами размером $0,5 \times 0,5 \text{ м}$ помещен электрический нагреватель с равномерно распределенной плотностью тепловыделения. Степень черноты поверхностей ε . Какова должна быть мощность электрического нагревателя, чтобы при температуре окружающего воздуха t_b поддерживать температуру поверхности пластин $t_{\text{ст}}$, если коэффициент теплоотдачи конвекцией к воздуху определяется соотношением:

$$\alpha_k = 2,65(t_{\text{ст}} - t_b)^{0,25}$$

(Теплоотдачу с торцов пластин не учитывать.)

28. Средняя температура поверхности токоведущей шины равна $t_{\text{ст}}$, а ее интегральная степень черноты ε .

Температура окружающего воздуха $t_b = 20^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи конвекцией связан с температурой поверхности $t_{\text{ст}}$ соотношением:

$$\alpha_k = 2,65(t_{\text{ст}} - t_b)^{0,25}.$$

В результате покрытия шин тонким слоем лака интегральная степень черноты поверхности стала равна $\varepsilon' = 0,9$. Какова теперь будет средняя температура поверхности шин $t'_{\text{ст}}$ при том же значении тока и прочих неизменных условиях?

29. В рекуперативном теплообменнике жидкость нагревается насыщенным паром (при $p = \text{const}$) от начальной температуры $t'_{\text{жк}}$ до конечной $t''_{\text{жк}}$. Во сколько раз изменится тепловая мощность теплообменника, если разность температур жидкости и пара на входе в теплообменник ($\Delta t_6 = t'_{\text{жк}} - t_{\text{ж}}$) уменьшится в n раз?

Коэффициент теплопередачи и прочие условия считать неизменными.

30. В пароводяном теплообменнике вода нагревается насыщенным паром (при $p = 0,6 \text{ МПа}$) от температуры $t'_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$ до $t''_{\text{в}} = 50^\circ\text{C}$. В результате интенсификации тепло-

обмена конечная температура подогрева воды повысилась до $t''_{\text{в2}}$ при неизменном расходе $G = 1 \text{ кг/с}$. Определить, во сколько раз увеличился коэффициент теплопередачи.

5152020 ТАБЛИЦЫ

числовых данных к задачам контрольной работы № 2

Задача	Величина	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	$t_1^{\text{ст}}, \text{ }^\circ\text{C}$ $t_3^{\text{ст}}, \text{ }^\circ\text{C}$	30 -8	29 -7	28 -6	27 -5	26 -4	25 -3	24 -2	23 -1	22 0	21 0
2	$d_1, \text{ мм}$ $d_2, \text{ мм}$ $t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	250 150 450	240 140 440	230 130 430	220 120 420	210 110 410	200 100 400	190 90 350	180 80 300	170 70 250	160 60 200
3	$k, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ $\alpha_1, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	0,80 6,9	0,90 7,2	0,94 7,6	1,00 8,0	1,20 9,6	1,24 10,0	1,30 10,4	1,34 10,8	1,40 11,2	1,60 12,8
4	n	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3
5	$t_1^{\text{ст}}, \text{ }^\circ\text{C}$ $d_{\text{ст}}, \text{ мм}$ $\lambda_{\text{ст}}, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	5 0,37 1,10	6 0,41 1,04	7 0,40 0,87	8 0,50 0,92	9 0,39 0,58	10 0,42 0,50	11 0,48 0,44	12 0,61 0,40	13 0,70 0,30	14 0,92 0,19
6	$\lambda_2, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ $d_2, \text{ мм}$	0,05 50	0,06 55	0,07 60	0,08 65	0,09 70	0,10 75	0,11 80	0,12 85	0,13 90	0,14 95
7	$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$ $\alpha_1, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ $\alpha_2, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	1400 50 28	1350 55 27	1300 60 26	1250 65 25	1200 70 24	1150 75 23	1100 80 22	1050 85 21	1000 90 20	950 100 19
8	$t_1^{\text{ст}}, \text{ }^\circ\text{C}$ $d_2, \text{ мм}$	150 250	200 275	250 300	275 325	300 350	325 400	350 400	400 500	450 550	500 600
9	$\alpha_1, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ $\alpha_2, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ $d_{\text{ж}}, \text{ мм}$	80 2800 2	75 2750 3	70 2700 4	65 2650 5	60 2600 6	55 2550 7	50 2500 8	45 2450 6	40 2400 5	35 2350 4
10	$t_b, \text{ }^\circ\text{C}$ $\alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ $\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	12 20 0,25	14 19 0,24	16 18 0,23	18 17 0,22	20 16 0,21	22 15 0,20	24 14 0,18	26 13 0,17	28 12 0,16	30 11 0,15
11	$w_0, \text{ м}/\text{с}$ $t_0, \text{ }^\circ\text{C}$ $d_0, \text{ мм}$	10 80 100	11 90 120	12 100 140	13 120 160	14 140 180	15 160 200	16 180 220	17 200 240	18 225 260	19 250 280

Продолжение табл.

Задача	Величина	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
12	$t_b, {}^{\circ}\text{C}$	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
	$G, \text{ кг/ч}$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
13	$w, \text{ м/с}$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
	$t_{\text{ж}}, {}^{\circ}\text{C}$	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25
	$t_{\text{ст}}, {}^{\circ}\text{C}$	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55
14	$w, \text{ м/с}$	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10	11
	$t_b, {}^{\circ}\text{C}$	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
15	$G \cdot 10^3, \text{ кг/с}$	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
	$t'_b, {}^{\circ}\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	$t''_b, {}^{\circ}\text{C}$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
16	$G, \text{ кг/ч}$	420	460	500	550	600	650	700	750	800	850
	$t', {}^{\circ}\text{C}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
	$t'', {}^{\circ}\text{C}$	85	85	90	85	80	75	80	85	90	95
17	$p, \text{ МПа}$	0,005	0,010	0,025	0,050	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	$t_{\text{ст}}, {}^{\circ}\text{C}$	10	15	20	22	25	30	35	40	45	50
18	$t_{\text{ст}}, {}^{\circ}\text{C}$	300	290	280	270	260	250	240	230	220	210
	ε_2	0,30	0,28	0,26	0,25	0,24	0,22	0,20	0,16	0,12	0,10
19	$t_1, {}^{\circ}\text{C}$	400	420	450	480	500	520	540	560	580	600
	$d_2, \text{ мм}$	300	280	260	240	220	200	190	180	170	160
	ε_3	0,30	0,28	0,26	0,24	0,22	0,20	0,18	0,15	0,12	0,10
20	$t_{\text{т}}, {}^{\circ}\text{C}$	250	270	300	320	350	370	400	420	450	470
	$t_{\text{ст}}, {}^{\circ}\text{C}$	110	140	150	180	190	200	220	250	270	300
	$\alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	25	28	35	37	40	45	48	50	52	55
21	$d, \text{ м}$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,38	0,32	0,28	0,22	0,18
	$q_l, \text{ кВт/ног.м}$	3,90	5,70	7,82	10,3	13,0	14,3	12,4	11,8	10,1	8,78
	ε	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
22	$G_w, \text{ т/ч}$	8	9	10	12	14	15	16	17	18	19
	$p, \text{ МПа}$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60
	x	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00
23	$t'w, {}^{\circ}\text{C}$	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
	$k, \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45
24	$G_b, \text{ кг/с}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	$t''w, {}^{\circ}\text{C}$	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20
25	$t''_1, {}^{\circ}\text{C}$	40	42	44	46	48	50	52	56	58	60
	$t''_2, {}^{\circ}\text{C}$	26	30	32	36	38	40	42	44	46	50
	$G_1, \text{ кг/с}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
26	$t_1^{\text{ст}}, {}^{\circ}\text{C}$	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250
	ε	0,60	0,62	0,64	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8

Задача	Величина	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
27	$t, {}^{\circ}\text{C}$	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
	$t_b, {}^{\circ}\text{C}$	30	27	25	22	20	17	15	10	5	0
	$t_{\text{ст}}, {}^{\circ}\text{C}$	350	320	300	280	250	220	200	180	150	120
28	$t_{\text{ст}}, {}^{\circ}\text{C}$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	ε	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
29	n	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
30	$t''w_2, {}^{\circ}\text{C}$	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110

Методические указания к выполнению контрольной работы № 2

Для определения плотности теплового потока q , $\text{Вт}/\text{м}^2$, через плоскую стенку и линейной плотности теплового потока q_l , $\text{Вт}/\text{м}$ через цилиндрическую стенку при известных температурах граничных поверхностей $t_1^{\text{ст}}$ и $t_{n+1}^{\text{ст}}$ используются формулы, полученные на основании закона Фурье:

$$q = \frac{t_1^{\text{ст}} - t_{n+1}^{\text{ст}}}{\sum_{i=1}^n \delta_i \lambda_i}; \quad (1)$$

$$q_l = \frac{2\pi(t_1^{\text{ст}} - t_{n+1}^{\text{ст}})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln d_{i+1}/d_i}, \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

n — число отдельных слоев в стенке;

δ_i — толщина каждого слоя стенки, м;

λ_i — коэффициент теплопроводности каждого слоя, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Для сравнения линейной плотности тепловых потоков при перемене мест тепловой изоляции трубы в задаче 4 воспользоваться приближенной формулой

$$q_l = \frac{\pi(t_1^{\text{ст}} - t_3^{\text{ст}})}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} d_{m1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} d_{m2}}, \quad (3)$$

где d_{m1} и d_{m2} — средние диаметры первого и второго цилиндрических слоев, м.

Относительное изменение линейной плотности теплового потока при перемене слоев изоляции местами

$$\Delta \% = \frac{q_t^{\text{II}} - q_t^{\text{I}}}{q_t^{\text{I}}} \cdot 100.$$

В задачах 3, 5, 7 и 9 для расчета плотности теплового потока через плоскую стенку можно использовать следующие формулы:

$$q = \alpha_1 (t_1 - t_1^{\text{ст}}); \quad (4)$$

$$q = \alpha_2 (t_2^{\text{ст}} - t_2); \quad (5)$$

$$q = k (t_1 - t_2), \quad (6)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи со стороны горячей и холодной жидкостей, омывающих стенку, Вт/(м²·К);
 t_1 и t_2 — температуры жидкостей, омывающих стенку;

$t_1^{\text{ст}}$ и $t_2^{\text{ст}}$ — температуры поверхностей стенки со стороны горячей и холодной жидкостей;

k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (7)$$

Для учета зависимости коэффициента теплопроводности материала стенки от ее температуры (задача 7) последней следует предварительно задаться. Например, $I_{\text{ст}}^{\text{cp}} \approx 0,5 (t_1 + t_2)$.

После определения коэффициента теплопередачи (7) и плотности теплового потока по уравнению (6) найти температуры поверхностей стенок из уравнений (4) и (5) и проверить значение средней температуры стенки. В случае существенно-го расхождения расчет следует повторить.

Расчетная формула для определения линейной плотности теплового потока q_t через многослойную цилиндрическую стенку (задачи 2 и 6) базируется на основе совместного решения уравнений теплоотдачи (8) и (9) и теплопроводности (2):

$$q_t = \alpha_1 (t_1 - t_1^{\text{ст}}) \pi d_1; \quad (8)$$

$$q_t = \alpha_2 (t_{n+1}^{\text{ст}} - t_2) \pi d_2. \quad (9)$$

Исключая неизвестные величины $t_i^{\text{ст}}$, получим

$$q_t = \frac{\pi (t_1 - t_2)}{1/\alpha_1 d_1 + \sum_1^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + 1/\alpha_2 d_2}, \quad (10)$$

где n — число слоев в цилиндрической стенке.

Для нахождения толщины слоя изоляции трубы в задаче 8 следует сначала определить линейную плотность теплового потока (по заданным величинам α_2 , $t_1^{\text{ст}}$, t_2 и d_2) и требуемое термическое сопротивление изоляции (см. формулу 2):

$$R_t = 1/2\pi\lambda \ln d_2/d_1. \quad (11)$$

Линейная плотность теплового потока q_t и ток I в электрическом проводе (задача 10) могут быть найдены из уравнения теплового баланса

$$q_t = \alpha (t_{\text{ст}} - t_b) \pi d_1 = I^2 r, \quad (12)$$

где r — активное электрическое сопротивление провода, Ом/м.

Для определения искомой температуры поверхности $t_1^{\text{ст}}$ изолированного провода при том же значении тока, т. е. при $q_t = \text{idem}$, следует воспользоваться формулой (2) при $n=1$, предварительно найдя температуру наружной поверхности изоляции $t_{\text{из}}$ из уравнения:

$$q_t = \alpha (t_{\text{из}} - t_b) \pi d_2. \quad (13)$$

Максимальный ток определяется по предельно-допустимой температуре $t_{\text{ст}}^{\text{max}}$ из уравнения

$$q_t^{\text{max}} = \frac{\pi (t_{\text{ст}}^{\text{max}} - t_b)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d + 2\delta}{d} + 1/\alpha_2 d_2}. \quad (14)$$

Требуемые значения кинематического коэффициента вязкости v_m и скорости w_m течения жидкости в модели (задача 11) определяются из условия подобия процессов в модели и образце, а именно из условия равенства критериев Re и Pr , т. е.

$$\frac{w_m d_m}{v_m} = \frac{w_0 d_0}{v_0}; \quad \frac{v_m}{a_m} = \frac{v_0}{a_0}.$$

Для нахождения значений коэффициентов конвективной теплоотдачи в задачах 12, 13, 14, 15, 16 и 18 рекомендуется

воспользоваться формулами, приведенными в контрольных вопросах 9—12. В формулах индекс «ж» указывает, что величины отнесены к определенной температуре $t_{\text{ж}}$, т. е. средней температуре жидкости (среды).

Средний коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, при пленочной конденсации пара на поверхности горизонтальной трубы может быть определен по зависимости 8—3 [5] или по формуле

$$x = 0,72 (A/d\Delta t)^{0,25}, \quad (15)$$

где $A = 5400 \lambda^3 \rho g/v$;

$$\Delta t = t_{\text{n}} - t_{\text{ст}};$$

r — теплота парообразования (конденсации), $\text{кДж}/\text{кг}$.

Значения коэффициента теплопроводности λ , плотности ρ и коэффициента кинематической вязкости v конденсата здесь отнесены к средней температуре пленки $t_{\text{cp}} = 0,5(t_{\text{n}} + t_{\text{ст}})$.

Температура насыщения t_{n} определяется по заданному давлению пара из таблиц насыщенного водяного пара. Из этих же таблиц находят значение теплоты парообразования.

Для нахождения коэффициента теплоотдачи конвекцией в условиях свободного движения воздуха около горизонтальной трубы (задача 18) следует использовать критериальную формулу, приведенную в вопросе 12. Тепловой поток излучением может быть найден по закону Стефана—Больцмана

$$Q_a = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{n}}}{100} \right)^4 \right] \pi d l, \quad (16)$$

где $C_0 = 5,67$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_a = \frac{Q_a}{\pi d l (t_{\text{ст}} - t_{\text{n}})}. \quad (17)$$

Потери тепла излучением от цилиндрической поверхности $F_1 = \pi d_1 l$, окруженной цилиндрическим экраном $F_2 = \pi d_2 l$ (задача 19), можно найти, определив предварительно температуру экрана T_s из уравнения теплового баланса:

$$C_{1-9} \left[\left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right] F_1 = C_{9-2} \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{n}}}{100} \right)^4 \right] F_2, \quad (18)$$

$$\text{где } C_{1-9} = \frac{C_0}{1/\varepsilon_0 + F_1/F_2(1/\varepsilon_0 - 1)};$$

$$C_{9-2} = \varepsilon_2 C_0.$$

Для нахождения действительной температуры потока по показанию термометра (задача 20) следует использовать уравнение теплового баланса в виде

$$\alpha(t_{\text{в}} - t_{\text{т}}) = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{т}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right]. \quad (19)$$

Температура излучающей поверхности (задача 21) может быть найдена из уравнения (16).

Задачи 22, 23, 24 и 25, связанные с тепловым расчетом рекуперативных теплообменников, решаются на основе использования уравнения теплового баланса

$$Q = G_1 c_1 (t'_1 - t''_1) = G_2 c_2 (t''_2 - t'_2) \quad (20)$$

и уравнения теплопередачи

$$Q = kF\Delta t_{\text{cp}}, \quad (21)$$

где G_1 и G_2 — расходы греющего и нагреваемого теплоносителей, $\text{кг}/\text{с}$;

c_1 и c_2 — средние массовые теплоемкости теплоносителей в интервалах температур соответственно $t'_1 \div t''_1$ и $t'_2 \div t''_2$, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

t'_1 и t'_2 — температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на входе в теплообменник;

t''_1 и t''_2 — температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на выходе из теплообменника;

k — коэффициент теплопередачи, $(\text{кВт}/\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

F — площадь теплообменной поверхности, м^2 ;

Δt_{cp} — средний температурный напор.

При прямотоке и противотоке

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \Delta t_6 / \Delta t_m},$$

где Δt_6 и Δt_m — соответственно наибольшая и наименьшая разности температур теплоносителей в теплообменнике.

Если $\Delta t_6 / \Delta t_m < 1,7$, то с достаточной для практических расчетов точностью

$$\Delta t_{\text{cp}} = 0,5 (\Delta t_6 + \Delta t_m).$$

При сложном теплообмене (конвекцией и излучением) в задачах 27, 28 результирующая плотность теплового потока определяется как сумма конвективной и лучистой составляющих:

$$q = \alpha_k (t_{ct} - t_b) + \varepsilon C_0 [(0,01t_{ct} + 2,73)^4 - (0,01t_b + 2,73)^4],$$

где $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) — коэффициент излучения абсолютно черной поверхности.

Кандидаты техн. наук, доценты К. Ф. АКСЕНОВ
В. С. СОРОКИН

ТЕПЛОТЕХНИКА

Задания на контрольные работы № 1 и 2

Редактор Г. В. Тимченко
Техн. редактор О. Б. Вешкина
Корректор Т. Д. Венедиктова

Сдано в набор 28.04. 1987. Подписано в печать 7.01. 1988. Тираж 3000.

Гарнитура литературная.

Печать высокая

Формат 60×90^{1/16}

Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,25. Тип. зак. 764. Изд. зак. 230. Бесплатно.

Редакционно-издат. отдел, типография ВЗИИТА,
125808, Москва, ГСП-47, ул. Часовая, 22/2