

ПОДЛЕЖИТ ВОЗВРАТУ

Одобрено кафедрой  
Теплотехники

# ТЕПЛОТЕХНИКА

Задания на контрольные работы № 1 и 2

с методическими указаниями

для студентов IV курса

специальности

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Часть 1

При изучении курса «Теплотехника» студент-заочник руководствуется учебной программой по данной дисциплине, утвержденной Минвузом СССР.

Каждый студент-заочник обязан самостоятельно выполнить по теплотехнике три контрольные работы, отработать цикл лабораторных занятий и получить по ним зачет. По выполненным контрольным работам проводится собеседование с преподавателем.

Сначала студент должен письменно ответить на контрольные вопросы, а затем решить соответствующие задачи. Ответы на контрольные вопросы должны быть краткими, но исчерпывающими. Их необходимо сопровождать формулами, графиками, схемами и эскизами конструкций. При решении задач нужно указывать, по какой формуле определяется величина и в каких единицах измерения, откуда взяты подставленные в формулу величины (если они не содержатся в условии задачи).

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

Вычисления необходимо делать в развернутом виде. Обозначения величин и терминология в пояснительной записке должны соответствовать принятым в учебниках. Решение задач должно сопровождаться тщательно выполненными схемами и графиками. При затруднениях, встречающихся в ходе выполнения контрольных работ, полезно обращаться к аналогичным задачам, имеющимся в учебниках.

После получения из института проверенной работы студент должен исправить ошибки с учетом сделанных указаний. Исправления, выполненные на отдельных листах, следует вклеить в соответствующие места отрецензированной работы. Отдельно от работы исправления не рассматриваются. Студент обязан сохранить все выполненные контрольные работы, имеющие пометку рецензента «допущен к зачету».

При решении задач вычисления следует производить с точностью до трех-четырех значащих цифр независимо от местоположения запятой.

В соответствии с ГОСТом 9867-61 числовые расчеты в решениях задач рекомендуется выполнять в единицах СИ.

### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуккин А. А., Шуккин И. Н., Зах Р. Г. и др. Теплотехника. Учебник. Изд. 2-е, перераб. М.: Металлургия, 1973, 479 с.
2. Теплотехника / Под ред. А. П. Баскакова. Учебник. М.: Энергоиздат, 1982, 264 с.
3. Теплотехника / Под ред. Г. А. Матвеева. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1981, 480 с.
4. Теплотехника / Под общ. ред. В. И. Крутова. Учебник. М.: Машиностроение, 1986, 432 с.
5. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977, 344 с.
6. Рабянович О. М. Сборник задач по технической термодинамике. М.: Машиностроение, 1973, 344 с.
7. Краснощекоев Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. Учебное пособие для вузов. 4-е изд., перераб. М.: Энергия, 1980, 288 с.
8. Панкратов Г. П. Сборник задач по теплотехнике. Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1986, 248 с.

### ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ № 1

по разделу

#### ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

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.

Таблица вариантов

Задание	Последняя цифра 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	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
	23	30	29	28	27	26	25	24	23	22

### Контрольные вопросы

1. Какие параметры состояния рабочего тела называют основными, в каких единицах они измеряются?
2. Напишите уравнение состояния идеального газа. Чем отличается реальный газ от идеального?
3. Дайте определение удельной теплоемкости. К каким единицам количества рабочего тела принято относить теплоемкость?
4. Покажите связь между теплоемкостями при постоянном объеме и при постоянном давлении.
5. Как можно выразить изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в произвольном термодинамическом процессе?
6. В каком процессе изменения состояния вся подведенная теплота к рабочему телу расходуется на изменение его внутренней энергии?
7. Докажите, что в изобарном процессе изменения состояния подведенная к рабочему телу теплота равна изменению его энтальпии.
8. Чему равен показатель политропы для основных термодинамических процессов изменения состояния идеальных газов?
9. Какой величиной оценивается эффективность прямого термодинамического цикла?
10. Опишите прямой обратимый цикл Карно. Приведите формулировку Второго закона термодинамики.
11. Изобразите  $p-v$ -диаграмму водяного пара и покажите в ней характерные линии и области.
12. Изобразите  $Ts$ -диаграмму водяного пара и покажите в ней теплоту жидкости, парообразования и перегрева. Какая площадь  $Ts$ -диаграммы при определенном давлении и температуре перегретого пара будет эквивалентна его энтальпии?
13. Что называется располагаемой работой потока в процессе истечения и чему она эквивалентна?
14. Какой процесс называют дросселированием? При каких условиях протекает процесс адиабатного дросселирования?
15. Какой процесс сжатия в поршневом компрессоре является наиболее энергетически выгодным?
16. Изобразите в  $p-v$ - и  $Ts$ -диаграммах идеальные циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = \text{const}$ , при  $p = \text{const}$  и смешанный цикл. Дайте необходимые пояснения.
17. Как влияет величина степени сжатия на термический КПД идеального цикла поршневого двигателя внутреннего



сгорания с подводом теплоты в процессе  $v = \text{const}$ ? Что ограничивает увеличение степени сжатия в двигателях, работающих по этому циклу?

18. Пользуясь  $Ts$ -диаграммой, сравните термические КПД идеальных циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания при одинаковых значениях абсолютных давлений и температур в конце подвода теплоты и других прочих условиях.

19. От каких величин зависит термический КПД идеального цикла газотурбинной установки с подводом теплоты к рабочему телу в процессе  $p = \text{const}$ ?

20. Изобразите в  $Ts$ -диаграмме основной цикл паросиловой установки (цикл Ренкина) и покажите площади, эквивалентные подведенной теплоте и полезно использованной теплоте в цикле.

### Задачи

1. В цилиндре с поршнем сжимается газ при постоянной температуре до давления (по манометру)  $p_2$ . Определить, во сколько раз уменьшится объем газа, если перед сжатием в цилиндре было разрежение  $p_{\text{вак}}$ . Барометрическое давление  $B = 750$  мм рт. ст. Плотность ртути в приборах считать  $\rho = 13590$  кг/м<sup>3</sup>. Изобразить процесс в  $pV$ -координатах.

√ 2. Определить массу азота и кислорода, если каждый из этих газов находится в баллоне объемом 350 л под давлением (по манометру)  $p$  при температуре  $t$ . Определить также плотность этих газов в заданном состоянии и при нормальных условиях. Барометрическое давление  $B = 750$  мм рт. ст.

3. Анализ продуктов сгорания показал следующий объемный состав:  $\text{CO}_2$  — 12,3%,  $\text{O}_2$  — 7,2%,  $\text{N}_2$  — 80,5%. Определить среднюю (кажущуюся) молекулярную массу и массовый состав продуктов сгорания, а также удельный объем и плотность смеси при температуре  $t$  и давлении 100 кПа.

4. Для продуктов сгорания, объемный состав которых приведен в задаче 3, найти значения средних молярной, массовой и объемной изобарных теплоемкостей в интервале температур  $t_1 = 200^\circ\text{C} \div t_2$ .

5. Определить газовую постоянную, среднюю (кажущуюся) молекулярную массу и объемный состав смеси идеальных газов, если задан ее массовый состав. Определить также парциальные давления компонентов, если давление смеси 100 кПа.

6. Какое количество теплоты надо отвести при охлаждении от начальной температуры  $t_1$  до  $t_2 = 200^\circ\text{C}$  от 1 кг смеси идеальных газов при постоянном давлении. Массовый состав

приведен в задаче 5. Массовые теплоемкости газов считать зависящими от температуры.

7.  $G$ , кг, азота имеют начальное абсолютное давление  $p$  и  $t_1 = 17^\circ\text{C}$ . В результате изобарного расширения температура газа повысилась до  $t_2$ . Определить объем азота в конце расширения, подведенную теплоту, работу процесса, а также удельные значения изменений внутренней энергии, энтальпии и энтропии в процессе. Теплоемкость газа принять не зависящей от температуры. Представить процесс в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.

8. В результате нагревания при постоянном объеме  $V$  температура воздуха повысилась до  $t_2$ . Определить подведенную теплоту, конечное давление, а также удельные значения изменений энтальпии и энтропии в процессе, если начальные параметры воздуха  $p_1 = 100$  кПа и  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ . Теплоемкость газа принять не зависящей от температуры. Процесс изобразить в  $pV$ - и  $Ts$ -координатах.

9. В процессе расширения при постоянной температуре, равной  $127^\circ\text{C}$ , давление 1 кг воздуха снизилось от  $p_1$  до  $p_2$ . Какое количество теплоты в этом процессе было подведено к газу? Определить объем газа в начале и конце расширения, а также изменение его энтропии в процессе.

10. Определить массу и конечные параметры ( $p_2$ ,  $V_2$ ,  $T_2$ ) углекислого газа, если в процессе адиабатного расширения газа его внутренняя энергия уменьшилась на  $\Delta U = 500$  кДж. Начальные параметры углекислого газа  $p_1$ ,  $V_1 = 0,3$  м<sup>3</sup> и  $t_1 = 527^\circ\text{C}$ . Теплоемкость газа принять не зависящей от температуры. Процесс изобразить в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.

11. Азот расширяется в политропном процессе от начального объема  $V_1 = 4$  м<sup>3</sup> и от начального абсолютного давления  $p_1$  и температуры  $t_1 = 127^\circ\text{C}$  до давления  $p_2$ . В конце расширения газ занимает объем  $V_2$ . Определить показатель политропы, массу азота, произведенную газом работу и теплоту процесса. Процесс изобразить в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.

√ 12. В начальном состоянии 1 кг водяного пара имеет абсолютное давление  $p_1$  и удельный объем  $v_1$ . В процессе адиабатного расширения давление пара снизилось до  $p_2$ . Определить состояние пара и его параметры в конце процесса, а также изменение энтальпии и работу расширения. Решение задачи иллюстрировать в  $is$ -диаграмме.

13. В пароперегревателе котла водяной пар при постоянном давлении  $p$  перегревается до температуры  $t_2$ . Определить состояние пара и его параметры перед пароперегревателем, если известно, что в перегревателе к 1 кг пара подводится теплота в количестве  $q$ . Решение задачи иллюстрировать в

*i*s-диаграмме.

14. Определить количество теплоты, необходимое для перегрева 1 кг пара в пароперегревателе котла до температуры  $t$  при постоянном давлении  $p$ . Определить также работу пара, связанную с увеличением его объема в процессе подсушки и перегрева. До поступления в перегреватель пар был влажным со степенью сухости  $x$ . Решение задачи иллюстрировать в *i*s-диаграмме.

15. Сухой насыщенный пар при неизменной температуре расширяется от давления  $p_1$  до  $p_2$ . Определить совершенную 1 кг пара работу в процессе. Решение задачи иллюстрировать в *i*s-диаграмме.

16. Для влажного насыщенного водяного пара, имеющего абсолютное давление  $p$  и влажность  $1 - x$ , найти температуру, удельный объем, плотность, энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию.

17. Влажный насыщенный водяной пар с давлением  $p$  и степенью сухости  $x$  дросселируется до давления  $p_2$ . Определить состояние пара и его параметры после дросселирования, а также изменение энтропии в процессе. Изобразите условный процесс в *i*s-диаграмме.

18. Регулирование парового двигателя производится с помощью дроссельного клапана, снижающего абсолютное давление водяного пара от  $p_1 = 10$  МПа до  $p_2$ . После дросселирования 1 кг пара расширяется в двигателе по адиабате до давления в конденсаторе 5 кПа. Начальная температура пара  $t_1$ . Определить потерю полезной (располагаемой) работы двигателя в результате дросселирования. Как изменится влажность отработавшего пара? Решение задачи иллюстрировать в *i*s-диаграмме.

19. Как изменится теоретическая скорость истечения перегретого пара давлением  $p_1$  в атмосферу ( $p_2 = 0,1$  МПа), если суживающееся сопло дополнить расширяющейся частью, т. е. заменить соплом Лавала. Начальная температура пара  $t_1$ . Теплообменом и трением в сопле пренебречь.

20. Перегретый пар с абсолютным давлением  $p_1$  и температурой  $t_1$  истекает через сопло в орду с давлением  $p_2$ . Определить требуемую форму (тип) сопла, теоретическую скорость истечения, а также секундный массовый расход пара через сопло, если диаметр сечения, определяющего расход,  $d = 10$  мм.

21. Воздух с абсолютным давлением  $p_1$  и температурой  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  вытекает через суживающееся сопло с диаметром 10 мм в атмосферу (барометрическое давление считать постоянным и равным  $B = 750$  мм рт. ст.). Определить теоре-

тическую скорость истечения и секундный массовый расход воздуха через сопло. Истечение считать адиабатным, скорость газа перед соплом и потери на трение не учитывать.

22. Азот с начальным абсолютным давлением  $p_1$  и температурой  $t_1$  вытекает в количестве 0,3 кг/с через сопло в атмосферу (барометрическое давление считать постоянным и равным  $B = 750$  мм рт. ст.). Определить требуемый тип сопла, скорость истечения (если скоростной коэффициент сопла  $\varphi = 0,9$ ) и выходной диаметр сопла. Истечение считать адиабатным. Скоростью на входе в сопло и потерями на трение пренебречь.

23. Идеальный одноступенчатый одноцилиндровый поршневой компрессор одностороннего действия, рабочий объем цилиндра которого  $V_h = 5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>, сжимает воздух по политропе с показателем  $m = 1,2$  от давления  $p_1 = 90$  кПа до абсолютного давления  $p_2$ . Частота вращения вала компрессора  $n = 23$  об/с. Определить секундную работу в процессе сжатия воздуха и мощность привода компрессора. Определить также температуру газа в конце процесса сжатия, если начальная температура воздуха  $t_1 = 37^\circ\text{C}$ .

24. Воздух сжимается от начального абсолютного давления 100 кПа до давления 900 кПа в первом случае в идеальном одноступенчатом компрессоре, во втором — в двухступенчатом. Процесс сжатия политропный с показателем политропы  $n$ . На сколько процентов изменится величина работы, затрачиваемой во втором случае в процессе сжатия 1 м<sup>3</sup> всасываемого газа, если промежуточное давление в двухступенчатом компрессоре равно 300 кПа, а охлаждение воздуха после сжатия в первой ступени осуществляется до начальной температуры  $t_1 = 17^\circ\text{C}$ ? Определить также конечные температуры воздуха в первом и втором случаях. Изобразить идеальные рабочие процессы одноступенчатого и двухступенчатого компрессоров в  $pV$ -координатах.

25. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме определить значения основных параметров в переходных точках цикла, термический КПД, полезную работу, подведенную и отведенную теплоту, если начальное давление 100 кПа, начальная температура  $37^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\epsilon$ , степень повышения давления  $\lambda$ . Рабочее тело — 1 кг сухого воздуха.

26. В идеальном цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания к рабочему телу (1 кг сухого воздуха) подается теплота в количестве  $q_1$  при постоянном давлении. Определить значения основных параметров в переходных точках, термический КПД и полезную работу, если начальные

**ЧИСЛОВЫЕ ДАННЫЕ**  
к задачам контрольной работы № 1

Номера задач	Величины	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	$p_2$ , МПа	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
2	$p_{\text{вак}}$ , мм рт. ст.	600	550	500	450	400	350	300	280	260	250
	$p$ , МПа	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
3	$t_1$ , °C	0	5	7	10	15	17	20	25	27	30
4	$t_2$ , °C	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
5	$m_{\text{CO}_2}$ , %	800	750	700	650	600	550	500	450	400	350
	$m_{\text{O}_2}$ , %	18	17	16	15	14	15	16	17	18	16
	$m_{\text{N}_2}$ , %	12	12	11	11	10	10	9	8	7	6
6	$t_1$ , °C	70	71	73	74	76	75	75	75	75	78
7	$G$ , кг	1000	950	900	850	800	750	700	650	600	650
	$p$ , МПа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$t_2$ , °C	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6
8	$V$ , м³	100	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	$t_2$ , °C	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2
9	$p_1$ , МПа	800	750	700	650	600	550	500	450	400	350
	$p_2$ , МПа	4	3,8	3,6	3,4	3,3	3	2,8	2,6	2,4	2,2
10	$p_1$ , МПа	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1	0,8	0,6	0,4	0,2
11	$p_1$ , МПа	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,1	0,1
	$p_2$ , МПа	3	2,8	2,6	2,4	2,2	2	1,8	1,6	1,4	1,2
	$V_2$ , м³	0,3	0,28	0,26	0,24	0,22	0,2	0,18	0,16	0,14	0,12
12	$V_2$ , м³	30	29	28	27	26	25	24	23	22	20
	$p_1$ , МПа	20	18	16	14	12	10	8	7	6	5
	$v_1$ , м³/кг	0,02	0,02	0,025	0,03	0,03	0,035	0,04	0,05	0,06	0,07
	$p_2$ , МПа	0,1	0,35	1	0,5	0,18	1,5	0,35	0,55	0,4	0,5

Продолжение табл.

Номера задач	Величины	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
13	$p$ , МПа	9	10	9	10	8	8	6	6	5	5
	$t_2$ , °C	500	500	450	550	500	450	600	500	400	350
	$q_1$ , кДж/кг	690	660	560	830	700	575	970	720	500	370
14	$t_1$ , °C	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580
	$p$ , МПа	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6
	$x$	0,98	0,97	0,96	0,95	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93
15	$p_1$ , МПа	1	1,5	2	2,8	3	3,5	4	4,5	5	6
	$p_2$ , МПа	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
16	$p$ , МПа	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,5	4	4,5	5
	$1-x$ , %	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2
17	$p_1$ , МПа	5	4,5	4	3,5	3	2,6	2	1,8	1,5	1
	$x$	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,96
	$p_2$ , МПа	0,2	0,18	0,16	0,14	0,12	0,1	0,2	0,18	0,16	0,14
18	$p_2$ , МПа	6	5,5	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	2
	$t_1$ , °C	500	480	460	440	420	400	410	430	450	470
19	$p_1$ , МПа	4	3,5	3	2,8	2,6	2,4	2,2	2	1,8	1,5
	$t_1$ , °C	460	440	420	400	380	360	340	320	300	280
20	$p_1$ , МПа	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8
	$t_1$ , °C	450	480	500	480	460	440	420	400	420	400
	$p_2$ , МПа	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,5
21	$p_1$ , МПа	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6
22	$p_1$ , МПа	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,1
	$t_1$ , °C	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
23	$p_2$ , МПа	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
24	$n$	1,16	1,18	1,2	1,22	1,24	1,26	1,28	1,3	1,32	1,34
25	$e$	8	7,5	7	6,8	6,6	6,4	6,2	6	5,8	5,6
	$\lambda$	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	3,1	3,2	3,3

Номера задач	Величины	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
26	$q_1$ , кДж/кг	1000	975	950	925	900	875	850	825	800	775
27	$\epsilon$	12	12,2	12,4	12,6	12,8	13	13,2	13,4	13,7	14
	$q_1'$ , кДж/кг	255	250	245	240	235	230	225	220	215	210
28	$p_1$ , МПа	7	6,8	6,6	6,4	6,2	6	5,9	5,8	5,7	5,6
	$\epsilon$	8	7,8	7,6	7,4	7,2	7	6,8	6,6	6,4	6,2
29	$t_{\max}$ , °C	2000	1980	1960	1940	1920	1900	1880	1860	1830	1800
	$t_3$ , °C	800	780	760	740	720	700	690	680	670	660
30	$\lambda$	8	7,8	7,6	7,4	7,2	7	6,8	6,6	6,5	6,4
	$p_1$ , МПа	10	9	8	7,7	7,6	7,5	7,4	7,3	7,2	7,1
	$t_1$ , °C	550	520	500	480	450	400	420	440	460	480

параметры  $p_1=80$  кПа и  $t_1=47^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\epsilon$ . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.

27. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты определить значения основных параметров в переходных точках, термический КПД, полезную работу и подведенную теплоту в изобарном процессе, если подведенная теплота в изохорном процессе равна  $q_1'$ . Начальная температура  $t_1=37^\circ\text{C}$ , абсолютные давления в точках цикла: начальной  $p_1=0,1$  МПа, в конце подвода теплоты  $p_4$  и конца процесса расширения  $p_5=0,25$  МПа. Степень предварительного расширения  $\rho=1,5$ . Рабочее тело — 1 кг сухого воздуха. Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.  $C_p = 1,05 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$

28. Определить, во сколько раз термический КПД цикла Карно больше КПД идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме, для которого степень сжатия  $\epsilon$ , если оба цикла осуществляются в одном диапазоне изменения температуры  $t_{\max}$  и  $t_{\min}=17^\circ\text{C}$ . Рабочее тело — 1 кг сухого воздуха.

29. Для идеального цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении определить значения основных параметров в переходных точках, термический КПД, полезную работу, подведенную и отведенную теплоту, если в начальной точке цикла  $p_1=0,1$  МПа,  $t_1=17^\circ\text{C}$ , температура в конце подвода теплоты  $t_3$  и степень повышения давления  $\lambda$ . Рабочее тело — 1 кг сухого воздуха.

30. Определить термический КПД основного паросилового цикла (цикла Ренкина), если абсолютное давление пара перед паровым двигателем  $p_1$  и температура  $t_1$ . Давление в конденсаторе  $p_2=4$  кПа. Произвести сравнение с термическим КПД цикла Карно, осуществленным между максимальной и минимальными температурами первого цикла.

## 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

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

или

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

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

$\mu$  — масса 1 кмоль газа, кг (численно равна молекулярной массе газа);

$p$  — абсолютное давление, Па

$$p = p_{\text{изб}} (\text{ммн}) + B; \quad p = B - p_{\text{вак}}$$

здесь  $p_{\text{изб}} (\text{ммн})$  — избыточное давление, измеряемое манометром;

$p_{\text{вак}}$  — разрежение, измеряемое вакууметром;

$B$  — атмосферное (барометрическое) давление ( $B = 750$  мм рт. ст.  $\approx 10^5$  Па).

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

$$\mu_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \mu_i \quad \text{и через массовые доли} \quad \mu_{\text{см}} = 1 / \sum_1^n m_i / \mu_i$$

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

$m_i = \frac{G_i}{G}$  — массовая доля газа в смеси (отношение массы этого газа, входящего в смесь, к массе всей смеси);

$r_i = \frac{V_i}{V}$  — объемная доля (отношение приведенного объема какого-либо газа, входящего в смесь, к объему всей смеси).

Формулы пересчета состава смеси:  $r_i = m_i \mu_{\text{см}} / \mu_i$ ;  $m_i = \mu_i r_i / \mu_{\text{см}}$

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 по средней молекулярной массе смеси  $R = 8314/\mu_{\text{см}}$ , Дж/(кг·К).

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

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

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = \frac{c'}{\rho_0} \quad \text{и} \quad c' = \frac{\mu c}{22,4} = c \rho_0,$$

где  $\mu$  — молекулярная масса газа;

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

Мольная, массовая и объемная теплоемкости могут быть при постоянном давлении  $c_p$  и при постоянном объеме  $c_v$ . Отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме называют показателем адиабаты и обозначают

$$\text{буквой } k, \text{ т. е. } k = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = \frac{c_p}{c_v}.$$

Теплоемкость газа зависит от его температуры. В приближенных расчетах часто пренебрегают этой зависимостью, и теплоемкости газов одинаковой атомности считают величинами постоянной. Значения мольных теплоемкостей и показателей адиабаты приведены в таблице:

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

Зависимости теплоемкостей газов от температуры имеют нелинейный характер. В таблице 1 (см. приложение во II части задания) приведены средние мольные теплоемкости некоторых газов в пределах от  $0^\circ$  до  $t$ . При пользовании этой таблицей в необходимых случаях производится интерполяция.

Для смесей идеальных газов массовая теплоемкость



$$c_{cm} = \sum_1^n m_i c_i, \text{ объемная теплоемкость}$$

$$c'_{cm} = \sum_1^n r_i c'_i$$

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

Для нахождения, например, средней мольной теплоемкости в пределах температур от  $t_1$  до  $t_2$  надо из соответствующей таблицы взять теплоемкость  $\mu c_{m1}$  и  $\mu c_{m2}$  соответственно в пределах  $0^\circ - t_1$  и  $0^\circ - t_2$  (средние теплоемкости сопровождаются индексом «*m*»). Затем по выражению

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

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 1 кг идеального газа подсчитывается по формулам.

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

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

$$s_2 - s_1 = c \ln T_2/T_1.$$

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

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

Работа газа в политропном процессе

$$L = \frac{GR}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{GRT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right].$$

В изотермическом процессе по Первому закону термодинамики теплота равна работе процесса и может быть определена по формуле

$$Q = L = GRT \ln \frac{v_2}{v_1} = GRT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

В этом процессе изменение удельной энтропии:

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{q_{1-2}}{T}, \quad \text{где } q_{1-2} = \frac{Q}{G}.$$

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

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

### Задачи № 12—18

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, 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 изотермическом процессе  $q = T(s_2 - s_1)$ .

В обратимом адиабатном процессе изменения состояния пара, протекающем при постоянном значении энтропии, удельная работа процесса  $l = u_1 - u_2 = (i_1 - p_1 v_1) - (i_2 - p_2 v_2)$ .

Процесс дросселирования пара условно изображается линией постоянной энтальпии.

Для влажного насыщенного пара:

$$\text{удельный объем } v_x = v''x + v'(1-x);$$

энтальпия	$i_x = i' + rx;$
энтронпия	$s_x = s' + rx/T_u;$
внутренняя энергия	$u_x = i_x - pv_x.$

### Задачи № 19—22

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)

$$Gv = fc,$$

где  $G$  — массовый расход газа или пара, кг/с;  
 $v$  — удельный объем газа или пара, м<sup>3</sup>/кг;  
 $f$  — площадь данного сечения сопла, м<sup>2</sup>;  
 $c$  — скорость потока в рассматриваемом сечении, м/с.

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

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

$$c_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ 1 - (p_2/p_1)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

Для водяного пара скорость истечения определяют по формуле

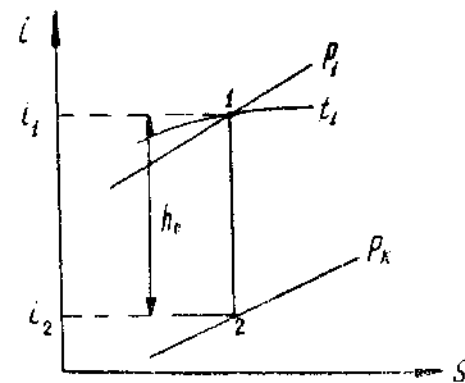
$$c_2 = 44,76 \sqrt{i_1 - i_2},$$

где  $i_1$  и  $i_2$  — соответственно энтальпии, кДж/кг, пара в начале и конце адиабатного процесса истечения, определяемые по  $is$ -диаграмме (рис.).

Критическое отношение давлений 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 Лавалю, где скорость в выходном сечении сопла достигает сверхкритических (сверхзвуковых) значений. В этом случае скорость на выходе из сопла

определяется по приведенным выше формулам, а критическая скорость в минимальном сечении для двухатомных газов по формуле  $c_{кр} = 1,08 \sqrt{p_1 v_1}$ , 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  $is$ -диаграмме. Площадь минимального сечения Лавалю может быть определена из уравнения неразрывности потока

$$f_{min} = \frac{M v_{кр}}{c_{кр}}, \quad \text{где } v_{кр} = v_1 (p_1/p_{кр})^{1/k} \text{ для газов.}$$

Величина  $v_{кр}$  для пара может быть определена по  $is$ -диаграмме.

### Задачи № 23 и 24

При политропном сжатии секундная работа в кДж/с [кВт] одноступенчатого идеального компрессора

$$L = \frac{p_1 V_1}{m-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right],$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — абсолютные давления в процессах всасывания и нагнетания, кПа;

$V_1 = V_n \cdot n$  — подача компрессора при условиях всасывания,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Теоретическая мощность привода компрессора в «т» раз больше  $L$ , т. е.  $N_{\text{привода}} = m \cdot L$ .

Работа, отнесенная к 1  $\text{м}^3$  всасываемого газа,  $\text{кДж}/\text{м}^3$

$$l = \frac{m}{m-1} p_1 \left[ \beta^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right],$$

где для одноступенчатого компрессора  $\beta = p_2/p_1$ , для двухступенчатого  $l = l_1 + l_{II}$ . При определении  $l_1$  и  $l_{II}$   $\beta_1 = p_{\text{пром}}/p_1$ ;  $\beta_{II} = p_2/p_{\text{пром}}$ .

### Задачи № 25—29

Вычерчивается цикл в  $p$ - и  $T$ -диаграммах с обозначением всех переходных точек цикла. Так как в теоретических циклах поршневых двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установках процессы сжатия и расширения 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 задачах 26 и 27 неизвестные значения температур в соответствующих точках процесса определяются из формулы теплоты данного процесса. В ряде точек цикла неизвестный параметр состояния рабочего тела находится из уравнения состояния идеального газа. Если в данной задаче определены термический КПД  $\eta_t$  и удельная полезная работа  $l_0$ , то удельное количество подведенной теплоты в цикле  $q_1 = l_0/\eta_t$ , а отведенной —  $q_2 = q_1 - l_0$ .

### Задача № 30

Термический КПД теоретического паросилового цикла (цикла Ренкина)

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

где  $i_1$  — энтальпия пара в начале адиабатного процесса расширения пара в паровом двигателе (точка 1). Значение  $i_1$  определяется по  $i$ - $s$ -диаграмме по заданным начальным параметрам пара (см. рис. 1);

$i_2$  — энтальпия 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);

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

## ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ № 2

по разделу

### ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

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

Таблица вариантов

*Александров*

Задание	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номера контрольных вопросов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номера контрольных задач	1 10 20	2 9	3 8	4 7	5 6	1 5	2 6	3 7	4 8	13 9

1. Объясните физическую сущность переноса теплоты теплопроводностью. Сформулируйте основной закон теплопроводности (закон Фурье). Что называется коэффициентом теплопроводности?

2. Напишите расчетные формулы теплового потока в процессе теплопроводности через плоскую и цилиндрическую стенки.

3. Какова физическая сущность конвективного теплообмена? Назовите определяемый критерий теплового подобия при этом виде теплообмена. Какие критерии будут определяющими при свободной и вынужденной конвекции?

4. Каковы общие понятия и определения теплопереноса излучением? Что такое абсолютно черное, абсолютно белое и диатермическое (прозрачное) тело?

5. Докажите, что коэффициент поглощения серого тела равен его степени черноты.

6. Объясните процесс теплопередачи в теплообменных аппаратах. Что называется коэффициентом теплопередачи? При каком условии расчет коэффициента теплопередачи через цилиндрическую стенку можно заменить расчетом через плоскую стенку?

7. Если  $\alpha_1 \gg \alpha_2$ , то какой из коэффициентов теплоотдачи следует увеличить для увеличения коэффициента теплопередачи? С какой стороны целесообразно обрывать теплообменную поверхность?

8. Какие типы теплообменных аппаратов вы знаете? Приведите примеры применения рекуперативных теплообменников?

9. На основе каких исходных уравнений базируется тепловой расчет рекуперативных теплообменных аппаратов? В чем сущность проектного и поверочного тепловых расчетов?

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

### Задачи

1. Потери теплоты через кирпичную стенку длиной 5 м, высотой 2,5 м и толщиной 0,5 м составляют  $Q$ . Какова температура наружной поверхности стенки, если на внутренней поверхности поддерживается температура  $t_{1\text{ст}} = 20^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности кирпича  $0,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

2. Плотность теплового потока, проходящего через стенку котла, равна  $q$ . Стенка котла толщиной 20 мм с внутренней стороны покрыта котельной накипью с коэффициентом теплопроводности  $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Определить толщину накипи, а также температуру поверхности стальной стенки котла под накипью, если разность температур наружной и внутренней поверхностей стенки  $\Delta t = 50 \text{ К}$ . Коэффициент теплопроводности стальной стенки принять равным  $50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

3. Паропровод диаметром 160/170 мм покрыт двухслойной изоляцией. Толщина первого слоя изоляции 30 мм и второго — 50 мм. Коэффициенты теплопроводности трубы и слоев изоляции соответственно равны  $\lambda_1 = 50$ ,  $\lambda_2 = 0,15$  и  $\lambda_3 = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Температура внутренней поверхности паропровода  $t_{1\text{ст}} = 300^\circ\text{C}$ . Определить температуру внешней поверхности изоляции, если линейная плотность теплового потока  $q_l$ . Определить также температуры на поверхностях раздела отдельных слоев и вычертить в масштабе график изменения температуры по толщине паропровода с изоляцией.

4. Плоскую поверхность необходимо изолировать так, что-

бы потери теплоты с единицы площади поверхности не превышали  $q$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ . Температура поверхности под изоляцией  $t_{1\text{ст}}$ , температура внешней поверхности изоляции  $t_{2\text{ст}} = 50^\circ\text{C}$ . Определить толщину изоляции для двух случаев:

а) изоляция выполнена из совелита, для которого

$$\lambda = 0,09 + 0,000075t, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

б) изоляция выполнена из асботермита, для которого

$$\lambda = 0,11 + 0,000125t, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

5. Определить потерю теплоты путем конвекции при продольном обдувании гладкой плиты воздухом со скоростью  $w$ . Плита имеет ширину 1 м и длину 1,5 м. Температура поверхности трубы  $t_{\text{ст}}$  и температура воздуха  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$ .

6. По трубе диаметром 50 мм и длиной 3 м протекает вода в количестве  $G$ . Определить средний коэффициент теплоотдачи, если средняя температура воды на входе  $t'_{\text{ж}} = 10^\circ\text{C}$ , а температура стенки трубы  $\bar{t}_{\text{ст}}$ . Определить также количество теплоты, передаваемой воде от поверхности трубы за один час.

7. По цилиндрическому каналу диаметром  $d = 14 \text{ мм}$  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 постоянна  $t_{\text{ст}} = 100^\circ\text{C}$ ?

8. Найти количество тепла  $q_l$ ,  $\text{Вт}/\text{пог. м}$ , которое отдает излучением и конвекцией неизолированный горизонтальный паропровод диаметром  $d = 0,3 \text{ м}$ , температура поверхности которого  $t_{\text{ст}}$ . Степень черноты поверхности  $\epsilon$ , а температура воздуха в помещении  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ .

9. Определить температуру поверхности трубопровода диаметром  $d$ , если линейная плотность результирующего потока излучением от него составляет  $q_l$ , а интегральная степень черноты поверхности  $\epsilon$ . Температура окружающего воздуха  $t_0 = 20^\circ$ .

10. Какова толщина слоя изоляции паропровода наружным диаметром  $d_2$ , если при температуре его поверхности  $t_{2\text{ст}}$  наружная поверхность изоляции имеет температуру  $t_{3\text{ст}} = 50^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности изоляции  $\lambda = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Температура окружающего воздуха  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции в окружающую среду  $\alpha_2$ .

11. Определить потери тепла через кладку камеры сгорания толщиной  $\delta_{ст} = 0,4$  м, площадью  $F = 8$  м<sup>2</sup>. Кладка выполнена в виде плоской стенки из шамотного кирпича, коэффициент теплопроводности которого  $\lambda_{ст}$ , Вт/(м·К) связан с температурой зависимостью

$$\lambda_{ст} = 0,84 + 0,0006t.$$

Температура газов в камере сгорания  $t_1$ , температура холодного воздуха  $t_2 = 25^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи со стороны газов и воздуха соответственно  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

12. Воздух с начальной температурой  $t_1' = 35^\circ\text{C}$  поступает для охлаждения в теплообменник, состоящий из пучка коридорно расположенных латунных трубок наружным диаметром  $d = 10$  мм. Обтекание трубок воздухом поперечное. Расчетное живое сечение для прохода воздуха  $F = 0,013$  м<sup>2</sup>. По трубкам циркулирует охлаждающий теплоноситель, обеспечивая среднюю температуру наружной поверхности трубок  $t_{ст}$ . Какую поверхность охлаждения должен иметь теплообменник, чтобы охладить воздух до  $t_2''$  в количестве  $G$  при атмосферном давлении? Поправку на число рядов не учитывать ( $C_2 = 1$ ).

13. По голым алюминиевым проводам сечением 50 мм<sup>2</sup> воздушной линии электропередачи течет ток  $I = 200$  А. Какую температуру будет иметь поверхность провода при температуре воздуха  $t_a$ ? Скорость ветра  $w$ , направление поперечное. Каждый провод можно считать одиночным цилиндром, теплоотдачу излучением не учитывать. Активное электрическое сопротивление провода  $r = 0,92$  Ом/км.

14. Какую температуру поверхности будет иметь нихромовая трубка электрического нагревателя наружным диаметром  $d = 10$  мм и толщиной стенки 1 мм, если по ней проходит ток  $I$ . Трубка расположена горизонтально и охлаждается в условиях свободной конвекции воздухом с температурой  $t_a$ . Теплоотдачу излучением не учитывать. Удельное электрическое сопротивление нихрома считать постоянным и равным  $\rho = 1,1$  Ом·мм<sup>2</sup>/м.

15. Определить требуемые площади поверхностей прямого и противоточного теплообменников для охлаждения масла в количестве  $G_1 = 0,93$  кг/с от температуры  $t_1'' = 65^\circ\text{C}$  до  $t_1' = 55^\circ\text{C}$ . Расход охлаждающей воды  $G_2 = 0,55$  кг/с, а ее температура на входе в теплообменник  $t_2'$ . Расчетный коэффициент теплопередачи  $k$ . Теплоемкость масла  $c_1 = 2,5$  кДж/(кг·К). Теплоемкость воды  $c_2 = 4,19$  кДж/(кг·К). Изобразить графики изменения температур воды и масла в теплообменнике.

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

температура воздуха на входе в охладитель  $t_1' = 105^\circ\text{C}$ ;  
температура воздуха на выходе из охладителя  $t_1'' = 55^\circ\text{C}$ ;  
расход воздуха  $G_1$ ;

температура охлаждающей воды на входе в охладитель  $t_2'$ ;

расход охлаждающей воды  $G_2 = 1,25$  кг/с;  
коэффициент теплопередачи  $k = 100$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Схема движения теплоносителей перекрестноточная.

17. Определить требуемую площадь поверхности нагрева рекуперативного теплообменника при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей для подогрева воды в количестве  $G_2 = 1,3$  кг/с от начальной температуры  $t_2' = 15^\circ\text{C}$  до  $t_2''$ . В качестве греющего теплоносителя используется газ, начальная и конечная температуры которого соответственно  $t_1'$  и  $t_1''$ . Коэффициент теплопередачи  $k = 40$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Привести графики изменения температур теплоносителей для прямотока и противотока.

18. Жидкость, расход которой  $G_1$  и теплоемкость  $c_1 = 3,05$  кДж/(кг·К) охлаждается в холодильнике водой от температуры  $t_1'$  до температуры  $t_1'' = 50^\circ\text{C}$ . Расход охлаждающей воды  $G_2$ , теплоемкость  $c_2 = 4,19$  кДж/(кг·К). Температура воды, поступающей в холодильник,  $t_2' = 10^\circ\text{C}$ . Определить площадь теплопередающей поверхности холодильника при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей, если коэффициент теплопередачи  $k = 1$  кВт/(м<sup>2</sup>·К).

19. В поверхностном маслоохладителе трансформаторное масло охлаждается от  $t_1'$  до  $t_1'' = 30^\circ\text{C}$  водой, температура которой на входе  $10^\circ\text{C}$ . Расходы масла и воды равны соответственно  $G_1$  и  $G_2$ . Определить температуру воды на выходе из маслоохладителя. Средние массовые теплоемкости масла  $c_1 = 1,88$  кДж/(кг·К), воды  $c_2 = 4,19$  кДж/(кг·К).

20. Определить поверхность нагрева водяного экономайзера, в котором теплоносители движутся по противоточной схеме, если заданы: температура газов на входе  $t_1'$ , на выходе  $t_1''$ . Расход газов  $G_1$ . Температура питательной воды на входе в экономайзер  $t_2 = 60^\circ\text{C}$ , расход  $G_2$ . Коэффициент теплопередачи от газов к воде  $k = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Средние теплоемкости газов и воды принять равными:  $c_1 = 1,05$  кДж/(кг·К);  $c_2 = 4,2$  кДж/(кг·К).



**Числовые данные  
к задачам контрольной работы № 2**

Номера задач	Величины	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	$Q$ , Вт	375	350	325	300	275	250	225	200	175	150
2	$q$ , кВт/м <sup>2</sup>	8	10	12	13	14	15	16	18	20	22
3	$q_1$ , Вт/м	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275
4	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	400	390	380	370	360	350	340	330	320	310
	$t_{11}$ , °C	450	440	430	420	410	400	390	380	370	360
5	$w$ , м/с	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	$t_{ст}$ , °C	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55
6	$\dot{G}$ , кг/с	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3
	$t_c$ , °C	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
7	$\dot{G}$ , кг/ч	420	460	500	550	600	650	700	750	800	850
	$t_1'$ , °C	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
	$t_2'$ , °C	95	85	90	85	80	75	80	85	90	95
8	$t_{ст}$ , °C	550	520	500	480	460	440	420	400	380	350
	$\epsilon$	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45
9	$d$ , м	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,38	0,32	0,28	0,22	0,18
	$q_1$ , кВт/м	3,9	5,7	7,82	10,3	13	14,3	12,4	11,8	10,1	8
	$\epsilon$	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
10	$d$ , мм	50	100	150	175	200	250	300	350	375	400
	$t_{ст}$ , °C	150	200	250	275	300	325	350	400	450	500
	$\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20
11	$t_1$ , °C	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400
	$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55
	$\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	19	29	21	22	23	24	25	26	27	28

Окончание табл.

Номера задач	Величины	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
12	$\dot{G}$ , кг/с	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2
	$t_{ст}$ , °C	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
	$t_{ст}$ , °C	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6
13	$w$ , м/с	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	$t_{ст}$ , °C	0	5	10	15	20	22	24	26	28	30
14	$I$ , А	55	52	50	48	46	44	42	40	37	35
	$t_{ст}$ , °C	0	5	10	15	20	22	24	26	28	30
	$t_2'$ , °C	10	15	20	25	28	30	35	38	40	35
15	$k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
16	$\dot{G}_1$ , кг/с	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
	$t_2'$ , °C	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20
17	$t_2''$ , °C	80	90	100	110	120	130	140	125	85	75
	$t_1''$ , °C	300	325	350	375	400	425	450	425	400	350
	$t_1''$ , °C	140	160	180	200	220	240	260	275	225	200
18	$\dot{G}_1$ , кг/с	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16
	$t_1'$ , °C	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
	$\dot{G}_2$ , кг/с	0,35	0,37	0,4	0,42	0,44	0,46	0,48	0,5	0,52	0,54
	$t_1'$ , °C	100	95	90	85	80	75	70	65	70	75
19	$\dot{G}_1$ , кг/с	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23
	$\dot{G}_2$ , кг/с	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46
20	$t_1''$ , °C	400	390	385	380	375	370	365	360	355	350
	$t_1''$ , °C	200	190	180	170	160	150	140	130	120	100
	$\dot{G}_1$ , кг/с	12	11	10	9,8	9,6	9,4	9,2	9	8,5	7
	$\dot{G}_2$ , кг/с	5,5	5,2	5,0	4,8	4,6	4,4	4,2	4,0	4,5	3,5

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению контрольной работы № 2

### Задачи № 1—4, 9—11

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

$$q = \frac{t_1^{ст} - t_{n+1}^{ст}}{\sum_1^n \delta_i / \lambda_i},$$

$$q_l = \frac{2\pi(t_1^{ст} - t_{n+1}^{ст})}{\sum_1^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}},$$

где  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;

$n$  — число отдельных слоев в стенке;

$\delta_i$  — толщина каждого слоя стенки, м;

$\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности каждого слоя, Вт/(м·К).

Для расчета плотности теплового потока через плоскую стенку можно использовать следующие формулы:

$$q = \alpha_1 (t_1 - t_1^{ст});$$

$$q = \alpha_2 (t_2^{ст} - t_2);$$

$$q = k (t_1 - t_2),$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи со стороны горячей и холодной жидкостей, омывающих стенку, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_1$  и  $t_2$  — температуры жидкостей, омывающих стенку;

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

$k$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Если коэффициент теплопроводности материала  $\lambda$  задан линейной зависимостью от температуры, то его значение для плоской и цилиндрической стенок следует брать при

$$t_{ср} = 0,5 (t_1^{ст} + t_2^{ст}).$$

### Задача № 5

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи конвекцией при обтекании пластины воздухом рекомендуются следующие критериальные формулы:

а) при ламинарном режиме течения в пограничном слое ( $Re < 5 \cdot 10^5$ )

$$Nu_{ж} = 0,57 Re_{ж}^{0,5};$$

б) при турбулентном режиме течения в пограничном слое ( $Re > 5 \cdot 10^5$ )

$$Nu_{ж} = 0,032 Re_{ж}^{0,8}.$$

Определяющим линейным размером в указанных критериальных формулах является расстояние от передней кромки пластины (в рассматриваемой задаче — продольный размер).

### Задачи № 6 и 7

Для нахождения среднего коэффициента теплоотдачи при течениях жидкости в трубах используют следующие критериальные формулы:

а) при развитом турбулентном режиме течения ( $Re > 10^4$ )

$$\text{и } \frac{l}{d} > 50$$

$$Nu_{ж} = 0,022 \cdot Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25};$$

б) при ламинарном режиме течения

$$Nu_{ж} = 1,4 (Pe_{ж} \cdot d/l)^{0,4} \cdot Pr_{ж}^{0,33} (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}.$$

Индексы «ж» и «ст» означают, что физические параметры жидкости отнесены здесь соответственно к средней температуре жидкости и температуре стенки.

### Задача № 8

Для нахождения коэффициента теплоотдачи конвекцией в условиях свободного движения воздуха около горизонтальной трубы следует использовать критериальную формулу

$$Nu_{ж} = 0,47 Gr_{ж}^{0,25}$$

Тепловой поток излучением может быть найден по закону Стефана--Больцмана

$$Q_{л} = \epsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{в}}{100} \right)^4 \right] F,$$

где  $C_0 = 5,67$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$F$  — площадь поверхности излучения, м<sup>2</sup>;

$\epsilon$  — интегральная степень черноты поверхности.

Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_{л} = \frac{Q_{л}}{(t_{ст} - t_{в}) F}$$

Задачи № 9—11 см. с. 26.

### Задача № 12

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

$$Nu_{ж} = 0,177 Re_{ж}^{0,64} C_z$$

### Задачи № 13 и 14

Для решения задач следует воспользоваться уравнением теплового баланса, выражающим линейную плотность теплового потока  $q_l$ , Вт/м

$$q_l = I^2 \cdot r = \alpha (t_{ст} - t_{в}) \pi d,$$

где  $I$  — ток, А;

$r$  — активное электрическое сопротивление, Ом/м.

### Задачи № 15—20

Задачи, связанные с тепловым расчетом рекуперативных теплообменников, решаются на основе использования уравнения теплового баланса

$$Q = G_1 c_1 (t_1' - t_1'') = G_2 c_2 (t_2'' - t_2')$$

и уравнения теплопередачи

$$Q = k F \Delta t_{ср}$$

где  $G_1$  и  $G_2$  — расходы греющего и нагреваемого теплоносителей, кг/с;

$c_1$  и  $c_2$  — средние массовые теплоемкости теплоносителей в интервалах температур соответственно  $t_1' - t_1''$  и  $t_2' - t_2''$ , кДж/(кг·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, (кВт/м<sup>2</sup>·К);

$F$  — площадь теплообменной поверхности, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{ср}$  — средний температурный напор.

При прямотоке и противотоке

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}$$

где  $\Delta t_6$  и  $\Delta t_m$  — 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

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

Для перекрестной схемы движения теплоносителей

$$\Delta t_{ср} = \Psi \Delta t_{ср}^{прт},$$

где  $\Delta t_{ср}^{прт}$  — средний температурный напор при противоточной схеме.

Поправочный коэффициент  $\Psi$  для условий задачи 16 принять равным 0,9.