

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

**Решения задач размещены  
на сайте [zadachi24.ru](http://zadachi24.ru)**

**Е.М. Бронникова, А.С. Матвиенко**

**ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Задание на контрольную работу  
с методическими указаниями  
для студентов заочной формы обучения

Иркутск 2015

УДК 621.4

ББК 31.31

Б 33

**Р е ц е н з е н т ы :**

начальник службы вагонного хозяйства ВС ДИ – филиала ВСЖД ОАО

**«РЖД» В.В. Лобов;**

заведующий кафедрой авиационных двигателей ИФ МГТУ ГА, д.т.н.,  
профессор **А.И. Исаев**

**Бронникова Е.М., Матвиенко А.С.**

Б 33      Термодинамика и теплопередача : задание на контрольную работу с методическими указаниями для студентов заочной формы обучения / Е.М. Бронникова, А.С. Матвиенко. – Иркутск : ИрГУПС, 2015. – 42 с.

Задания на контрольную работу с методическими указаниями предназначены для студентов заочной формы обучения специальности «Подвижной состав железных дорог», специализации: «Локомотивы», «Вагоны», «Электрический транспорт железных дорог», «Технология производства и ремонта подвижного состава».

Табл.: 5. Библиогр.: 4 назв.

**УДК 621.4**

**ББК 31.31**

© Бронникова Е.М., Матвиенко А.С., 2015

© Иркутский государственный университет  
путей сообщения, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	4
Общие положения .....	4
Задание на контрольную работу по разделу	
<b>ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА .....</b>	<b>6</b>
Контрольные вопросы .....	6
Задачи .....	7
Числовые данные к задачам .....	9
Основные расчетные формулы и методические указания к решению задач .....	10
Задание на контрольную работу по разделу	
<b>ТЕПЛОПЕРЕДАЧА .....</b>	<b>14</b>
Контрольные вопросы .....	14
Задачи .....	15
Числовые данные к задачам .....	19
Основные расчетные формулы и методические указания к решению задач .....	20
Заключение .....	25
Библиографический список.....	26
Приложение 1. Системы единиц измерения .....	27
Приложение 2. Физические свойства веществ.....	29
Приложение 3. Критерии состояния .....	34
Приложение 4. Образец оформления контрольной работы.....	35

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Методическое пособие содержит сведения, необходимые студентам заочной формы обучения для выполнения контрольной работы, предусмотренной учебными планами в рамках изучения дисциплин «Термодинамика и теплопередача», «Теплофизика». Трудоёмкость выполнения контрольной работы в соответствии с учебной программой изучаемых дисциплин составляет 10 часов.

Контрольная работа является основной формой самостоятельной работы студентов в межсессионный период, средством контроля выполнения ими учебного плана и усвоения учебного материала в объеме рабочей программы изучаемой дисциплины.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Выполнению контрольной работы должно предшествовать тщательное изучение соответствующего раздела курса дисциплин «Термодинамика и теплопередача» [1, 2, 4]. При ее 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). **Контрольная работа выполняется по двум разделам дисциплины: 1. Техническая термодинамика; 2. Теплопередача.** По каждому разделу студент должен ответить на два контрольных вопроса и решить две задачи.

При подготовке к зачету студентам рекомендуется проработать все контрольные вопросы и задачи, предложенные в заданиях.

Ответы на контрольные вопросы должны быть краткими. Их необходимо сопровождать формулами, графиками, схемами. 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 условии задачи).

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

В приложениях приведены справочные таблицы, которые могут быть использованы при выполнении контрольной работы.

Вычисления всех величин производятся в развернутом виде. Если подставляемая в формулу величина определяется по какой-либо расчетной зависимости, это промежуточное вычисление подробно записывается. При решении задач числовые расчеты необходимо выполнять в единицах системы СИ. Обозначение величин и терминология в пояснительной записке должны соответствовать принятым в учебниках.

Решения задач нужно иллюстрировать схемами и графиками, тщательно выполненными в пояснительной записке. **Оформление контрольной работы выполнять в соответствии с положением [3].**

Результаты выполнения контрольной работы отражаются в виде пояснительной записи.

Работа должна выполняться на листах формата А4. Титульный лист является первой страницей работы и служит источником информации, необходимой для идентификации автора работы, определения варианта и выполняется по ГОСТ 2.105-95. Каждый лист, за исключением титульного листа, должен снабжаться рамкой и основной надписью по ГОСТ 2.104-2006.

*Титульный лист должен быть выполнен печатным способом с использованием компьютера и принтера.* Текст пояснительной записи выполняется также с использованием компьютера на одной стороне листа белой бумаги через полтора интервала (шрифт Times New Roman должен быть чёрного цвета, высота букв, цифр и других знаков – кегль 14), однако допускается оформление пояснительной записи в **рукописном варианте**. Разрешается использовать компьютерные возможности акцентирования внимания на определённых терминах, формулах, теоремах, применяя шрифты различной гарнитуры (курсив или полужирный шрифт).

Текст следует печатать отступая от рамки до границ текста в начале и конце строк не менее 3 мм, сверху и снизу – не менее 10 мм. Абзацы в тексте должны начинаться с отступом 15–17 мм от границы теста.

Опечатки, описки и графические неточности, обнаруженные в процессе подготовки текстового документа, допускается править подчисткой или закрашиванием белой краской и нанесением на том же месте исправленного текста.

Изложение материала записи должно быть грамотным в техническом и грамматическом отношениях. Сокращение слов в тексте, как правило, не допускается, за исключением сокращений, общепринятым в русском языке.

На собеседовании с преподавателем автору работы необходимо подробно прокомментировать ответы на контрольные вопросы и решённые задачи.

**Пример оформления контрольной работы представлен в приложении 4.**

**Задание на контрольную работу**  
по разделу  
**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

Студент выбирает контрольные вопросы и задачи из таблицы вариантов (см. табл. 1) по предпоследней цифре номера зачетной книжки, а числовые данные к задачам по последней цифре номера – из соответствующей таблицы числовых данных (см. табл. 2), которая приведена в задании.

Таблица 1

**Таблица вариантов**

Задание	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	3	1
	9	10	11	12	13	9	10	11	12	13

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Параметры состояния идеального газа, уравнение состояния, виды уравнения.
2. Что такое парциальное давление газа, входящего в смесь? Как подсчитывается это давление, если смесь идеальных газов задана массовыми или объемными долями?
3. Как вычисляется работа в термодинамическом процессе? Функцией чего она является?
4. Что такое истинная и средняя теплоёмкости?
5. Почему теплоемкость при постоянном давлении больше, чем теплоёмкость при постоянном объёме? На какую величину массовая теплоемкость при постоянном давлении больше теплоёмкости при постоянном объёме? Чему равно отношение этих теплоёмкостей для различных газов?
6. Напишите выражения, по которым определяются изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии идеального газа в термодинамическом процессе. Почему изменения этих величин не зависят от вида процесса?
7. В чём состоит сущность Первого закона термодинамики? Напишите аналитическое выражение этого закона.
8. Перечислите основные термодинамические процессы. Напишите для каждого из этих процессов аналитическое выражение Первого закона термодинамики.
9. Покажите, что в изобарном процессе изменения состояния рабочего тела подведенная теплота равна изменению его энтальпии.

10. Что называется термическим КПД прямого кругового процесса (цикла)? Напишите выражение этой величины для цикла Карно и любого обратимого цикла.

11. В чем состоит сущность Второго закона термодинамики? Напишите аналитическое выражение этого закона.

12. Докажите, что в обратимом цикле Карно работа идеального газа в процессе адиабатного сжатия равна работе расширения по абсолютной величине.

13. Опишите процессы идеального цикла Дизеля с подводом теплоты при постоянном давлении. От каких величин зависит термический КПД этого цикла?

14. Опишите процессы идеального цикла Отто с подводом теплоты при постоянном объёме. От каких величин зависит термический КПД этого цикла?

15. Опишите процессы идеального цикла воздушной холодильной установки. От каких величин зависит термический КПД этого цикла?

16. Опишите процессы идеального цикла парокомпрессионной холодильной установки. От каких величин зависит термический КПД этого цикла?

17. С помощью индикаторной диаграммы идеального одноступенчатого поршневого компрессора покажите, что более выгодным процессом сжатия газа в компрессоре будет изотермический.

18. Как влияет степень сжатия на термический КПД идеальных циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС)? Какие факторы ограничивают значение этой величины у реальных ДВС?

19. Опишите процессы идеального цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении. От каких величин зависит термический КПД этого цикла?

20. Опишите схему и принцип работы теплового насоса.

## ЗАДАЧИ

1. Какое массовое количество воздуха должно быть подано компрессором в резервуар объемом  $3\text{ м}^3$ , чтобы при постоянной температуре  $t_1$  и барометрическом давлении 750 мм рт. ст. давление по манометру в нем повысилось от  $p_1$  до  $p_2$ ?

2. Анализ продуктов сгорания показал следующий объемный состав, %:  $\text{CO}_2$  12,2;  $\text{O}_2$  7,1;  $\text{CO}$  0,4;  $\text{N}_2$  80,3. Определить массовый состав входящих в смесь газов, газовую постоянную, удельный объем и плотность смеси при абсолютном давлении  $p$  и температуре  $t$ . Определить также парциальные давления компонентов смеси.

3. Найти затрату теплоты на нагревание объема воздуха  $V$ ,  $\text{м}^3$  при постоянном давлении 750 мм рт. ст., если начальная температура воздуха  $t_1$ ,

а конечная –  $t_2$ . Определить объем воздуха в конце процесса нагревания. Процесс изменения состояния воздуха изобразить в  $pv$ - и  $Ts$ -координатах. Для объемной средней теплоемкости воздуха при нормальных физических условиях принять линейную зависимость  $c'_{pm} = 1,2866 + 0,00012t$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К).

4. Определить газовую постоянную, среднюю (кажущуюся) молекулярную массу смеси идеальных газов, если ее массовый состав следующий, %:  $CO_2$  18;  $O_2$  12;  $N_2$  70. Определить также удельный объем и плотность смеси при абсолютном давлении  $p_1 = 0,1$  МПа и температуре  $t_1$ . Найти среднюю массовую теплоемкость смеси при постоянном давлении в интервале температур  $t_1$  и  $t_2$ .

5. Определить объемный состав смеси идеальных газов, заданной в массовых долях (см. задачу № 4), парциальные давления ее компонентов при абсолютном давлении смеси  $p$ , а также средние изобарные мольную и объемную теплоемкости смеси и в интервале температур от 0°C до  $t$ .

6. До какой температуры будет нагрет углекислый газ ( $CO_2$ ) объемом  $V_1$ , если сообщить ему теплоту  $Q$ , кДж, при постоянном абсолютном давлении  $p$ ? Начальная температура газа  $t_1 = 100^\circ\text{C}$ . Определить объем газа в конце процесса нагрева, а также удельные значения изменений внутренней энергии, энталпии и энтропии в процессе. Теплоемкость газа принять не зависящей от температуры.

7. До какого давления надо сжать воздух в политропном процессе со средним показателем  $n = 1,3$  в цилиндре двигателя внутреннего сгорания (дизеля) при начальном абсолютном давлении  $p_1$  и температуре  $t_1$ , чтобы достигнуть температуры воспламенения топлива 650°C? Определить также работу, затрачиваемую на сжатие, и количество отводимой теплоты, отнесенных к 1 кг воздуха. Теплоёмкость воздуха считать не зависящей от температуры.

8. Начальные параметры 1 м<sup>3</sup> азота  $p_1$  и  $t_1$ . Определить конечные параметры газа ( $V_2$ ,  $p_2$ ,  $t_2$ ), если в процессе адиабатного расширения газа его внутренняя энергия уменьшилась на  $\Delta U$ , кДж. Определить также удельное значение изменения энталпии газа в процессе. Теплоёмкость азота принять не зависящей от температуры.

9. Для цикла Карно определить параметры всех переходных точек цикла, подведенную и отведенную теплоту, а также термический КПД цикла, если заданы значения граничных абсолютных давлений  $p_{max}$  и  $p_{min}$  и температур  $t_{max}$  и  $t_{min}$ . Рабочим телом является 1 кг сухого воздуха.

10. Определить степень сжатия, давление и температуру в переходных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме, а также термический КПД, удельные значения (на 1 кг рабочего тела) полезной работы, подведенной и отведенной теплоты, если известно, что абсолютное давление рабочего те-

ла в начале сжатия  $p_1 = 95$  кПа, а в конце сжатия –  $p_2$ . Отношение давлений рабочего тела в процессе подведения теплоты  $\lambda$ . Температура в начале процесса сжатия  $t_1 = 47^\circ\text{C}$ . Рабочим телом считать воздух.

11. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с изобарным подводом теплоты определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, полезную работу, если заданы начальные параметры цикла  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 47^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon$  и количество подведенной теплоты  $q_1$ . Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха. Теплоемкость принять независящей от температуры.

12. 1 кг сухого воздуха в идеальном цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты имеет начальные параметры  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 67^\circ\text{C}$ . Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД и полезную работу цикла, если заданы степень сжатия  $\varepsilon$ , количество подведенной теплоты по изохоре  $q_v$  и по изобаре  $q_p$ . Теплоемкость воздуха принять не зависящей от температуры.

13. Для идеального цикла газотурбинной установки с изобарным подводом теплоты определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, полезную работу, количество подведенной и отведённой теплоты, если в начале сжатия рабочего тела абсолютное давление  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 17^\circ\text{C}$ . Степень повышения давления в цикле –  $\lambda$ , а температура рабочего тела в конце расширения –  $t_4$ . Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха.

Таблица 2  
Числовые данные к задачам

№ задач	Величины	Последняя цифра номера зачетной книжки									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$t_1, {}^\circ\text{C}$	10	5	0	-5	-10	-17	-22	-27	-30	-32
	$p_1, \text{МПа}$	1,3	1,25	1,2	1,15	1,1	1,05	1,0	0,95	0,9	1,3
	$p_2, \text{МПа}$	2,7	2,5	2,2	2,0	1,7	1,5	1,7	2,2	2,5	2,7
2	$p, \text{МПа}$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0
	$t, {}^\circ\text{C}$	1	6	11	16	21	26	21	16	11	6
3	$V, \text{м}^3$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$t_1, {}^\circ\text{C}$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
	$t_2, {}^\circ\text{C}$	355	405	455	505	555	605	655	705	755	805
4	$t_1, {}^\circ\text{C}$	100	150	200	250	300	350	400	450	500	100
	$t_2, {}^\circ\text{C}$	409	509	609	709	809	909	1009	909	809	709
5	$p, \text{МПа}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
	$t, {}^\circ\text{C}$	1000	950	900	850	800	750	700	650	600	500
6	$V_1, \text{м}^3$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	$p, \text{МПа}$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2
	$Q, \text{кДж}$	710	810	910	1010	1210	1310	1210	1110	1010	910

№ задач	Величины	Последняя цифра номера зачетной книжки									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	$p$ , МПа $t$ , °C	95 107	97 112	99 117	101 120	103 122	105 125	107 130	109 132	111 137	113 140
8	$\Delta U$ , МДж $p_1$ , МПа $t_1$ , °C	8 15 450	7,6 14 427	7 13 400	6 12 377	5 11 327	2 11 200	4,8 11 477	4 11 427	7 12 400	6 13 400
9	$p_{max}$ , МПа $p_{min}$ , МПа $t_{max}$ , °C $t_{min}$ , °C	3 0,1 330 5	2,4 0,1 400 15	4,2 0,14 450 25	2,8 0,16 500 35	5,4 0,18 550 45	6 0,12 600 55	7,2 0,14 650 65	7,5 0,15 700 75	8 0,16 750 85	10 0,18 800 95
10	$p_2$ , МПа $\lambda$	0,65 3,2	0,7 3,1	0,75 3,0	0,8 3,1	0,85 3,0	0,9 2,9	1 2,8	1,1 2,5	1,2 2,6	1,3 2,4
11	$\varepsilon$ $q_{l,k}$ Дж/кг	13 1000	14 950	15 900	16 850	17 800	16,5 900	15,5 950	14,5 1000	13,5 1050	12,5 1100
12	$\varepsilon$ $q_{v,k}$ Дж/кг $q_p$ , кДж/кг	11 600 300	10 560 280	11 520 260	12 500 250	13 480 240	14 460 230	15 440 230	13 500 250	11 600 300	14 400 280
13	$\lambda$ $t_4$ , °C	5,0 480	5,2 460	5,4 450	5,6 440	5,8 430	6 420	6,2 410	6,4 400	6,6 390	6,8 390

## Основные расчетные формулы и методические указания к решению задач

### Задачи 1–8

Задачи составлены по разделам 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 идеального газа:

$$pv = RT \text{ (для 1 кг газа)}$$

или

$$pV = MRT \text{ (для } M \text{ кг газа),}$$

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

$\mu$  – 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  $\mu_{cm} = \sum_1^n r_i \mu_i$  и через массовые доли

$$\mu_{cm} = \frac{1}{\sum_1^n m_i / \mu_i},$$

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

$m_i = \frac{M_i}{M}$  – 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:  $r_i = m_i \mu_{cm} / \mu_i$ ;  $m_i = r_i \mu_i / \mu_{cm}$ .

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  $R = 8314 / \mu_{cm}$ , 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:

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

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

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

Теплоемкость газа зависит от его температуры. В приближенных расчетах часто пренебрегают этой зависимостью, т. е. теплоемкость газов

одинаковой атомности считают величиной постоянной. Значения мольных теплоемкостей и показателя адиабаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

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

Зависимость теплоёмкости газов от температуры имеет нелинейный характер. В приложении 1 приведены средние мольные теплоёмкости некоторых газов в пределах от 0° до  $t$ . При пользовании этой таблицей в необходимых случаях производится интерполяция.

Для смесей идеальных газов массовая теплоёмкость  $c_{cm} = \sum_1^n m_i c_i$ ,

объемная теплоемкость  $c'_{cm} = \sum_1^n r_i c'_i$  и мольная теплоёмкость

$$\mu c_{cm} = \sum_1^n r_i \mu c_i .$$

Для нахождения, например, средней мольной теплоёмкости в пределах температур от  $t_1$  до  $t_2$  надо из соответствующей таблицы взять теплоёмкость  $\mu c_{m_1}$  и  $\mu c_{m_2}$  – соответственно в пределах 0° –  $t_1$  и 0° –  $t_2$  (средние теплоёмкости сопровождаются индексом « $m$ »). Затем по выражению

$$\mu c_m = \frac{\mu c_{m_2} t_2 - \mu c_{m_1} t_1}{t_2 - t_1} \text{ определить искомую теплоёмкость.}$$

По аналогичным формулам определяется  $c$  и  $c'$ .

Если задан объем  $V$ , м<sup>3</sup>, занимаемый газом, то количество теплоты в соответствующем процессе

$$Q = V_0 (c'_{m_2} t_2 - c'_{m_1} t_1),$$

где объем газа при нормальных условиях

$$V_0 = V \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} .$$

Здесь  $T_0$  и  $p_0$  – абсолютная температура и абсолютное давление, соответствующие нормальным условиям.

Если в процессе участвуют  $M$  кг вещества, количество теплоты в соответствующем процессе  $Q = M (c_{m_2} t_2 - c_{m_1} t_1)$ .

В  $pV$ -диаграмме линия, изображающая политропный процесс, имеет уравнение  $pV^n = const$ , 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 теплоемкости для 1 кг идеального газа подсчитывается по формулам:

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

В последнем выражении  $c$  – теплоёмкость соответствующего процесса. Для политропного процесса теплоёмкость

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

Удельная работа политропного процесса:

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

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

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

### Задачи 9–13

Вычерчивается цикл в  $p, V$ - и  $T, S$ -диаграммах с обозначением всех переходных точек цикла. Цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат.

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 1–8).

В задачах 22 и 23 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  $q_2 = q_1 - l_0$ .

**Задание на контрольную работу**  
по разделу  
**ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Студент выбирает контрольные вопросы и задачи из таблицы вариантов (см. табл. 4) по предпоследней цифре номера зачетной книжки, а числовые данные к задачам по последней цифре номера – из соответствующей таблицы числовых данных (см. табл. 5), которая приведена в задании.

Таблица 4

**Таблица вариантов**

Задание	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номера контрольных вопросов	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
Номера контрольных задач	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье.
2. Дайте определение коэффициентов теплопроводности, теплоотдачи и теплопередачи. Напишите выражения для удельного теплового потока через плоскую стенку, пользуясь этими коэффициентами.
3. Что такое термическое сопротивление и как оно определяется для плоской и цилиндрической многослойных стенок? Для какого случая допустимо рассматривать цилиндрическую стенку как плоскую?
4. Сформулируйте закон теплоотдачи Ньютона – Рихмана.
5. Поясните основные факторы, влияющие на интенсивность конвективного теплообмена при вынужденном и свободном движении жидкости.
6. Объясните зависимость коэффициента теплоотдачи при обтекании плоской пластины от режима течения в пограничном слое (изобразить схему течения).
7. Какова роль ламинарного пограничного подслоя в процессе конвективного теплообмена при турбулентном течении жидкости около стенки?
8. Объясните зависимость коэффициента теплоотдачи при вынужденном течении жидкости в трубе от режима течения пограничного слоя (изобразить схему течения).
9. В чем сущность подобия физических процессов? Назовите определяемые и определяющие критерии подобия для процессов конвективного теплообмена при вынужденном и свободном движениях теплоносителя.
10. Дайте определение рекуперативного, регенеративного и смесительного теплообменников.

11. Укажите основные преимущества и недостатки противоточной и прямоточной схем движения теплоносителей в теплообменных аппаратах.
12. В каких случаях и с какой стороны применяют оребрение поверхностей нагрева теплообменников?
13. Что такое среднелогарифмический температурный напор и как он определяется при прямоточном и противоточном движении теплоносителей?
14. Изобразите графики изменения температур греющего и нагреваемого теплоносителей в прямоточном и противоточном рекуперативных теплообменниках при следующих соотношениях теплоемкостей массовых расходов (водяных эквивалентов) теплоносителей:  $W_1 > W_2$ ;  $W_1 < W_2$ ;  $W_1 = W_2$ .
15. Напишите основные расчетные уравнения, используемые в тепловых расчетах теплообменных аппаратов. Что такое средний температурный напор и как он определяется для расчетных схем движения теплоносителей?
16. В чем сущность закона, устанавливающего связь между излучательной и поглощающей способностью тела?
17. В чем особенности излучения и поглощения лучистой энергии газами?
18. Каково влияние степени черноты экрана, помещенного между двумя параллельными поверхностями, на интенсивность лучистого теплообмена между ними?
19. Какова связь между законом Планка и законом Стефана – Больцмана для абсолютно черного излучения?
20. Что такое сложный теплообмен? В чем основная трудность его расчета?

## ЗАДАЧИ

1. Вычислить плотности теплового потока  $q$  через плоскую стенку толщиной  $\delta$ , выполненную из указанных ниже изоляционных материалов (применяемых в вагоностроении), коэффициенты теплопроводности которых  $\lambda$ , Вт/(м·К), связаны с температурой следующими линейными зависимостями:

$$\text{шевелин } \lambda = 0,060 + 0,002 t;$$

$$\text{мипора } \lambda = 0,035 + 0,002 t;$$

$$\text{полистирол ПСБ-С } \lambda = 0,038 + 0,0036 t;$$

$$\text{полиуретан ППУ-ЗС } \lambda = 0,04 + 0,0035 t.$$

Температуры поверхностей стенки соответственно равны  $t_1^{CT}$  и  $t_2^{CT}$ .

2. По данным тепловых измерений тепломером средний удельный тепловой поток через ограждение изотермического вагона при температуре

наружного воздуха  $t_h$  и температуре воздуха в вагоне  $t_e$  составил  $q$ . На сколько процентов изменится количество тепла, поступающего в вагон за счет теплоотдачи через ограждение, если при прочих равных условиях на его поверхность наложить дополнительный слой изоляции из пиратерма толщиной  $\delta = 30$  мм с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,036$  Вт/(м·К)?

3. Определить требуемую минимальную толщину обмуровки газохода котла, чтобы температура ее наружной поверхности не превышала  $50^\circ\text{C}$  при температуре газов в газоходе  $t_1$ . Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмуровки  $\lambda = 0,6$  Вт/(м·К). Суммарный коэффициент теплоотдачи со стороны газов –  $\alpha_1$ , со стороны воздуха  $\alpha_2 = 16$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а температура воздуха  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ .

4. Стенки рабочей камеры промышленной нагревательной печи имеют внутренний оgneупорный слой толщиной  $\delta_1 = 0,12$  м из шамотного кирпича и наружный слой толщиной  $\delta_2 = 0,25$  м из строительного кирпича. Температура наружной поверхности наружного слоя –  $t_3^{CT}$ , коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности к окружающему воздуху  $\alpha_2 = 16$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а температура воздуха –  $t_2$ . Определить температуру внутренней поверхности камеры печи  $t_1^{CT}$  и построить график распределения температур по толщине стенки. Каковы суточные потери тепла через стенку с площадью поверхности  $F = 20$  м<sup>2</sup>? Коэффициент теплопроводности шамотного кирпича  $\lambda_1 = 0,86$  Вт/(м·К), строительного кирпича  $\lambda_2 = 0,7$  Вт/(м·К).

5. Теплообменная поверхность рекуперативного теплообменника для охлаждения масла выполнена из нержавеющих трубок с внутренним диаметром  $d = 20$  мм и толщиной стенки  $\delta_2 = 2,5$  мм [ $\lambda_{cm} = 20$  Вт/(м·К)]. Коэффициент теплоотдачи от охлаждаемого масла к внутренней поверхности трубок –  $\alpha_1$ , а от наружной поверхности трубок к охлаждающей воде –  $\alpha_2$ .

Определить линейный коэффициент теплопередачи  $k_l$ , Вт/(м·К). Во сколько раз следует увеличить коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$ , чтобы при прочих неизменных условиях коэффициент теплопередачи повысился на 35 %?

Возможно ли такое повышение коэффициента теплопередачи путем увеличения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$ ?

6. Трубопровод тепловой сети с наружным диаметром  $d_1$  проложен в канале из сборных железобетонных блоков и имеет толщину изоляционного цилиндрического слоя  $\delta = 150$  мм. Коэффициент теплопроводности изоляции  $\lambda = 0,06$  Вт/(м·К). Температура наружной поверхности труб-

провода (под изоляцией) –  $t_1^{CT}$ . Температура воздуха в канале  $t_2 = 40^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к воздуху  $\alpha_2 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

В результате неплотностей во фланцевых соединениях и сальниках арматуры, а также проникновения в канал грунтовых вод изоляция трубопровода увлажнлась так, что ее коэффициент увеличился до  $\lambda' = 0,13 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , а температура воздуха в канале повысилась до  $t'_2 = 45^\circ\text{C}$ .

Как изменяется при этом потери на 1 пог. м трубопровода?

Определить, выгодно ли оборудовать канал вентиляционными шахтами для просушки изоляции, если при этом температура воздуха в канале понижается до  $t''_2 = 25^\circ\text{C}$ , а коэффициент теплопроводности изоляции становится равным  $\lambda'' = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ? Прочие условия считать неизменными.

7. Пассажирский вагон имеет площадь ограждения кузова  $F = 225 \text{ м}^2$ . Приведенный коэффициент теплопередачи через ограждение вагона с учетом инфильтрации воздуха  $k = 2,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Какова будет средняя температура воздуха в вагоне при температуре воздуха  $t_h$ , если отопительная система вагона имеет суммарную площадь теплообменной поверхности  $F = 25 \text{ м}^2$ , если ее температура  $t_{CT}$ ?

Средний коэффициент теплоотдачи от теплообменной поверхности системы отопления к воздуху  $\alpha = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Суммарная мощность дополнительных источников внутреннего тепловыделения в вагоне  $Q_{вн\,в} = 2,8 \text{ кВт}$ .

8. По трубе диаметром  $d = 35 \text{ мм}$  течет воздух. Расход воздуха  $G$ , кг/ч, температура на входе  $t'_e = 20^\circ\text{C}$ . Средняя температура внутренней поверхности трубы  $t_{CT} = 150^\circ\text{C}$ . Какова будет температура воздуха на выходе из трубы, если последняя имеет длину  $l = 5 \text{ м}$ ?

9. По трубе диаметром  $d = 18 \text{ мм}$  течет вода со средней скоростью  $\omega = 1,3 \text{ м}/\text{с}$ . Температура воды на входе в трубу  $t'_{жc}$ , средняя температура внутренней поверхности трубы  $t_{CT} = 100^\circ\text{C}$ . На каком расстоянии от входа температура нагреваемой воды достигнет  $t''_{жc}$ ?

10. Какую минимальную тепловую мощность  $Q_{min}$ , кВт, должен иметь встроенный в цистерну подогреватель нефтепродукта, чтобы обеспечить среднюю температуру поверхности цистерны  $t_{CT}$ ? Котел цистерны диаметром  $d = 2,8 \text{ м}$ , имеющей расчетную площадь поверхности  $F = 110 \text{ м}^2$ , расположен горизонтально и защищен от ветра. Температура воздуха –  $t_e$ . Для определения среднего коэффициента теплоотдачи от поверхности цистерны воспользоваться критериальной формулой для расчета теплообмена около горизонтальной трубы в условиях естественной конвекции.

11. Стальная стенка теплообменной поверхности парового котла толщиной  $\delta = 22$  мм омывается с одной стороны кипящей водой при абсолютном давлении  $p$ , а с другой – дымовыми газами с температурой  $t_1 = 900^\circ\text{C}$ . Удельная паропроизводительность поверхности нагрева  $g$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  сухого насыщенного пара. Определить коэффициент теплопередачи  $k$  и перепад температур в стенке  $\Delta_{cm}$ , если коэффициент теплопроводности стали  $\lambda = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

12. Плоская стальная стенка, имеющая коэффициент теплопроводности  $\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , толщиной  $\delta = 12$  мм омывается с одной стороны дымовыми газами с температурой  $t_1 = 900^\circ\text{C}$ , а с другой – водой с температурой  $t_2 = 200^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Определить коэффициент теплопередачи  $k$  и тепловой поток  $q$  для чистой стенки; для стенки, покрытой со стороны воды слоем накипи толщиной  $\delta_2 = 10$  мм;  $\lambda_2 = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Найти температуру поверхностей стенки и накипи, построить для обоих случаев графики распределения температур.

13. Какой должна быть теоретическая холодопроизводительность рефрижераторной установки для поддержания в холодильной камере постоянной температуры воздуха  $t_2$  при температуре наружного воздуха  $t_1$ , если средний приведенный коэффициент теплопередачи ограждения камеры  $k = 0,32 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а тепловая мощность источников внутреннего выделения  $Q_e = 12 \text{ кВт}$ ? Расчетная площадь поверхности ограждения камеры  $F = 220 \text{ м}^2$ . Определить среднюю температуру внутренней поверхности стенок  $t_2^{CT}$  камеры, если коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны  $\alpha_2 = 2,65 (t_2^{CT} - t_2)^{0,25} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

14. Голый металлический трубопровод диаметром  $d = 160$  мм имеет температуру поверхности  $t_{CT}$ . Степень черноты поверхности  $\varepsilon = 0,8$ . Определить потери тепла излучением на 1 пог. м трубопровода при температуре окружающей среды  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Каковы будут потери излучением, если этот трубопровод окружить тонким цилиндрическим экраном диаметром  $d_s = 200$  мм со степенью черноты поверхностей  $\varepsilon_s$ ?

15. Определить тепловой поток излучением и конвекцией от боковой поверхности цилиндра диаметром  $d = 120$  мм и длиной  $l = 10$  м со степенью черноты  $\varepsilon$  в окружающую среду, имеющую температуру  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , если температура поверхности  $t_{ct}$ , а коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$ . Каково значение суммарного коэффициента теплоотдачи?

16. Определить плотность теплового потока излучением  $q$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  между двумя расположеными на близком расстоянии параллельными плоскостями, имеющими степень черноты поверхности  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  и температуру со-

ответственно  $t_1$  и  $t_2$ . Во сколько раз изменится плотность теплового потока излучением, если степень черноты поверхности  $\varepsilon_2$  уменьшить в два раза?

17. В пароводяном рекуперативном теплообменнике вода нагревается насыщенным паром. Расход воды  $G_\omega = 1 \text{ кг/с}$ . Определить коэффициент теплопередачи в теплообменнике, если его площадь теплообменной поверхности  $F$ , а отношение температурных напоров на входе и выходе  $\Delta t_o / \Delta t_m$ .

18. Определить требуемые площади поверхностей прямоточного и противоточного теплообменников для охлаждения масла в количестве  $G_m = 0,93 \text{ кг/с}$  от  $t'_{\text{м}} = 65^\circ\text{C}$  до  $t''_{\text{м}} = 55^\circ\text{C}$ . Расход охлаждающей воды  $G_\omega = 0,55 \text{ кг/с}$ , а ее температура на входе в теплообменник  $t'_{\omega}$ . Расчетный коэффициент теплопередачи –  $k$ . Теплоемкость масла  $C_m = 2,5 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Теплоемкость воды  $C_\omega = 4,19 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Изобразить графики изменения температур воды и масла в теплообменнике.

19. В пароводяном рекуперативном теплообменнике с площадью теплообменной поверхности  $F$  вода нагревается насыщенным паром с абсолютным давлением  $p$ . Температура воды на входе  $t' = 15^\circ\text{C}$ , расход ее  $G = 1 \text{ кг/с}$ . Определить конечную температуру подогрева воды  $t''$ , если коэффициент теплопередачи  $k = 3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

20. Определить температуру подогрева воздуха  $t_e''$  в калорифере с поперечным омыванием оребренных трубок воздухом на основании следующих данных:

расчетная площадь теплообменной поверхности  $F = 14,5 \text{ м}^2$ ; температура греющей воды на входе  $t'_{\omega} = 90^\circ\text{C}$ , на выходе  $t''_{\omega} = 70^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплопередачи  $k = 22 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ; температура воздуха на входе в калорифер –  $t'_e$ ; расход воздуха  $G_e = 0,4 \text{ кг/с}$ .

Таблица 5

**Числовые данные к задачам**

№ задач	Величины	Последняя цифра номера зачетной книжки									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$\delta, \text{мм}$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	$t_1^{CT}, {}^\circ\text{C}$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	$t_2^{CT}, {}^\circ\text{C}$	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	10
2	$t_H, {}^\circ\text{C}$	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
	$t_B, {}^\circ\text{C}$	1	2	3	4	0	-1	-2	-3	-4	-5
	$q, \text{Вт}/\text{м}^2$	8,5	9,0	9,5	10,5	13,0	14,5	16,0	17,5	19,0	20,5
3	$t_1, {}^\circ\text{C}$	300	350	400	450	500	550	575	600	625	650
	$\alpha_1, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	65	60	55	50	45	40	42	38	35	32
4	$t_3^{CT}, {}^\circ\text{C}$	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
	$t_2, {}^\circ\text{C}$	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28
5	$\alpha_1, \text{кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
	$\alpha_2, \text{кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5

№ задач	Величины	Последняя цифра номера зачетной книжки									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	$d_1$ , мм $t_1^{CT}$ , °C	200 130	210 132	220 135	230 137	240 140	250 142	260 145	270 147	280 150	290 155
7	$t_H$ , °C $t_{CT}$ , °C	+5 40	0 48	-2 52	-5 57	-7 61	-10 67	-12 71	-15 75	-17 81	-20 86
8	$G$ , кг/ч	36	40	45	50	55	60	65	70	85	80
9	$t''_{\infty}$ , °C $t'_{\infty}$ , °C	5 35	10 40	15 45	20 30	25 55	30 60	35 65	40 70	45 75	50 80
10	$t_{CT}$ , °C $t_B$ , °C	40 -20	42 -15	44 -10	46 -5	48 0	50 10	52 15	54 16	56 17	58 18
11	$p$ , МПа $g$ , кг/(м <sup>2</sup> · ч)	0,6 21	0,8 22	1,0 23,0	1,2 24	1,4 25	1,6 26	1,8 27	2,0 28	2,2 29	2,4 30
12	$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) $\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	35 1500	40 1600	45 1700	50 1800	55 2000	60 2200	65 2400	70 2600	75 2800	80 3000
13	$t_1$ , °C $t_2$ , °C	25 -8	26 -7	27 -6	28 -5	29 -4	30 -3	31 0	32 +2	34 +5	36 +6
14	$t_{CT}$ , °C $\varepsilon_{\vartheta}$	400 0,28	425 0,26	450 0,24	475 0,22	500 0,20	525 0,18	550 0,16	575 0,14	600 0,12	625 0,10
15	$t_{CT}$ , °C $\varepsilon$ $\alpha_k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	100 0,9	150 0,85	200 0,8	250 0,75	300 0,7	350 0,65	400 0,60	450 0,55	500 0,50	550 0,45
16	$\varepsilon_1$ $\varepsilon_2$ $t_1$ , °C $t_2$ , °C	0,1 0,85	0,2 0,8	0,3 0,7	0,4 0,6	0,5 0,5	0,6 0,4	0,7 0,3	0,8 0,2	0,9 0,1	0,8 0,15
17	$F$ , м <sup>2</sup> $\Delta t_{\delta} / \Delta t_M$	0,8 2	1,2 3	1,6 4	1,8 5	2,0 6	2,2 7	2,4 8	2,6 9	2,7 10	2,8 12
18	$t'_{\infty}$ , °C $k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	20 170	25 180	28 190	30 200	32 210	34 220	35 230	10 150	12 160	15 170
19	$F$ , м <sup>2</sup> $p$ , МПа	0,8 0,60	1,2 0,50	1,6 0,40	1,8 0,30	2,0 0,20	2,2 0,16	2,4 0,12	2,6 0,10	2,7 0,09	2,8 0,08
20	$t'_B$ , °C	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15

## Основные расчетные формулы и методические указания к решению задач

Плотность теплового потока  $q = Q / F$ , Вт/м<sup>2</sup> через плоскую стенку при стационарном тепловом режиме может быть найдена по одной из следующих формул:

$$q = \alpha_1 (t_1 - t_1^{CT}); \quad (2.1)$$

$$q = \frac{t_1^{CT} - t_{n+1}^{CT}}{R_t}; \quad (2.2)$$

$$q = \alpha_2 (t_{n+1}^{CT} - t_2); \quad (2.3)$$

$$q = k(t_1 - t_2), \quad (2.4)$$

где  $t_1^{CT}$  и  $t_{n+1}^{CT}$  – температуры поверхностей стенки,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_1$  и  $t_2$  – температуры сред (теплоносителей), омывающих стенку,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$$R_t = \sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i \text{ – термическое сопротивление стенки, } (\text{м}^2 \cdot \text{К}) / \text{Вт};$$

$\delta_i$  – толщина  $i$  – слоя стенки, м;

$\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$n$  – число слоев в стенке;

$k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,

$$k = \frac{1}{1/\alpha_1 + R_t + 1/\alpha_2}.$$

Эта формула получена на основе решения системы уравнений (2.1), (2.2) и (2.3).

Если коэффициент теплопроводности материала стенки связан с температурой линейной зависимостью  $\lambda = a + b t$  (задача 1), то его значение следует взять при средней температуре стенки  $t = \frac{1}{2}(t_1^{CT} + t_2^{CT})$ .

В задаче 2 следует сначала из (2.4) определить термическое сопротивление теплопередачи  $R_1 = 1/k$  для однослойной стенки, а затем и с учетом дополнительного слоя  $R_2 = R_1 + \delta/\lambda$ . Плотность теплового потока обратно пропорциональна термическому сопротивлению, т. е.  $q = (t_h - t_b)/R$ .

В задачах 3 и 4 сначала следует найти плотность теплового потока (2.3), а затем, используя формулу (2.4), определить требуемую минимальную толщину обмуровки котла (задача 3) или искомую к задаче 4 температуру внутренней поверхности камеры печи  $t_1^{CT}$  из формулы (2.2).

Тепловой поток через цилиндрическую стенку длиной 1 м, именуемый линейной плотностью теплового потока  $q_l = Q/l$ ,  $\text{Вт}/\text{м}$ , определяется по одной из следующих формул:

$$q_l = \alpha_1 (t_1 - t_1^{CT}) \pi d_1; \quad (2.5)$$

$$q_l = \frac{2\pi(t_1^{CT} - t_{n+1}^{CT})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} ; \quad (2.6)$$

$$q_l = \alpha_2 (t_{n+1}^{CT} - t_2) \pi d_{n+1} ; \quad (2.7)$$

$$q_l = k_l (t_1 - t_2) , \quad (2.8)$$

где  $d_l$  – диаметр внутренней поверхности цилиндрической стенки, м;

$d_{i+1}$  – внешний диаметр  $i$ -го слоя цилиндрической стенки, м;

$k_l$  – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К).

$$k_l = \frac{\pi}{1/\alpha_1 d_1 + \sum_{i=n}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + 1/\alpha_2 d_{n+1}} . \quad (2.9)$$

Линейный коэффициент теплопередачи численно равен количеству теплоты, которое происходит через цилиндрическую стенку длиной 1м в единицу времени от одной среды к другой при разности температур между ними один градус.

Величина  $R_l = 1/k_l$  называется линейным термическим сопротивлением теплопередачи.

Формула (2.9) получена на основе совместного решения уравнений (2.5), (2.6) и (2.7).

Рассмотренные формулы (2.5) – (2.9) следует использовать при решении задач 5 и 6.

Для решения задачи 7 следует рассмотреть уравнение теплового баланса источников тепловыделения и тепловых потерь через ограждение кузова вагона, считая все теплообменные поверхности плоскими.

В задачах 8, 9 и 10 следует сначала найти значение среднего коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha$ , используя следующие критериальные формулы:

а) при вынужденном развитом турбулентном течении жидкости в трубе ( $R_e > 10^4$ ,  $l/d > 50$ )

$$Nu_{жc} = 0,021 Re_{жc}^{0,8} Pr_{жc}^{0,43} (Pr_{жc} / Pr_{CT})^{0,25} \quad (2.10)$$

(для воздуха  $Nu_{жc} = 0,018 Re_{жc}^{0,8}$ );

б) при свободном движении жидкости около горизонтальных труб ( $10^3 < Gr_{жc} Pr_{жc} < 10^8$ )

$$Nu_{жc} = 0,5 (Gr_{жc} Pr_{жc})^{0,25} (Pr_{жc} / Pr_{CT})^{0,25} \quad (2.11)$$

(для воздуха  $Nu_{жc} = 0,46 Gr_{жc}^{0,25}$ ).

Индекс « жc » в приведенных формулах означает, что величины, входящие в определяющие и определяемые критерии подобия, отнесены к средней температуре жидкости –  $t_{жc}$ , т. е.

$$Nu_{жc} = \frac{\alpha d}{\lambda_{жc}}; \quad Re_{жc} = \frac{\omega d}{\nu_{жc}} = \frac{4G}{\pi d \mu_{жc}};$$

$$Pr_{жc} = \frac{\nu_{жc}}{a_{жc}}; \quad Gr_{жc} = \frac{\beta_{жc} g d^3 \Delta t}{\nu_{жc}^2}.$$

Физический смысл приведенных безразмерных комплексов, именуемых критериями или числами подобия соответственно именами ученых (Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля, Грасгофа), рекомендуется рассмотреть по учебнику.

В задаче 11 следует сначала определить плотность теплового потока, исходя из заданной удельной паропроизводительности теплообменной поверхности котла. Искомые величины  $\Delta t_{CT}$  и  $k$  могут быть найдены по формулам (2.2) и (2.4).

Задачи 12 и 13 решаются аналогично рассмотренным выше задачам 3 и 4.

Для определения линейной плотности теплового потока от излучения трубопровода в задаче 18 следует воспользоваться законом Стефана – Больцмана:

$$q_l^{\text{л}} = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \pi d, \quad (2.12)$$

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

Этот же закон используется в решениях задач 15 и 16 для нахождения теплового потока излучением:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] F. \quad (2.13)$$

Суммарный коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией (задача 15) определяется по формуле

$$\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\kappa} = \frac{Q_{\text{л}} + Q_{\kappa}}{(t_{CT} - t_0) F}. \quad (2.14)$$

Если излучающее тело окружено экраном (задача 14), то потери тепла излучением можно найти, составив уравнение теплового баланса:

$$q_i = \varepsilon_{CT-\varTheta} C_0 \left[ \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_\varTheta}{100} \right)^4 \right] \pi d_1 = \varepsilon_{\varTheta-0} C_0 \left[ \left( \frac{T_\varTheta}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \pi d_2, \quad (2.15)$$

где  $\varepsilon_{CT-\varTheta} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{CT}} + \frac{F_{CT}}{F_\varTheta} \left( \frac{1}{\varepsilon_\varTheta} - 1 \right)}$  – приведенная степень черноты системы «стенка – экран»;

$$\varepsilon_{\varTheta-0} \approx \varepsilon_\varTheta.$$

Приведенная степень черноты для системы двух параллельных плоскостей, расположенных на относительно небольшом расстоянии (задача 16), определяется по формуле:

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (2.16)$$

Задачи 17–20, связанные с тепловым расчетом рекуперативных теплообменных аппаратов, решаются на основе уравнения теплового баланса

$$Q = G_1 c_1 (t'_1 - t''_1) = G_2 c_2 (t''_2 - t'_2) \quad (2.17)$$

и уравнения теплопередачи

$$Q = k F \Delta t_{cp}. \quad (2.18)$$

Здесь:

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

$c_1$  и  $c_2$  – средние массовые теплоемкости теплоносителей в соответствующих интервалах изменения их температур, кДж/(кг·К);

$t'_1$  и  $t'_2$  – температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на входе в теплообменник, °C;

$t''_1$  и  $t''_2$  – температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на выходе из теплообменника, °C;

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

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

$\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор.

Средний температурный напор определяется по формуле

$$\Delta t_{cp} = \psi \frac{\Delta t_\delta - \Delta t_m}{\ln \Delta t_\delta / \Delta t_m}, \quad (2.19)$$

где  $\Delta t_\delta$  и  $\Delta t_m$  – наибольшая и наименьшая разности температур теплоносителей в теплообменнике, К.

Поправочный коэффициент  $\psi$  зависит от схемы движения теплоносителей.

Для прямоточной и противоточной схем  $\psi = 1$ .

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

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

Когда конечные температуры теплоносителей  $t''_1$  и  $t''_2$  являются искомыми и не могут быть определены непосредственно из уравнения теплового баланса (2.20), то одной из них рекомендуется предварительно задаться, найти значение  $\Delta t_{cp}$  и  $Q$  (по уравнению теплопередачи), а затем и искомую величину  $t''$  из уравнения теплового баланса.

В случае существенного расхождения расчет следует повторить для нового значения  $t''$ .

В технических расчетах обычно допускается расхождение в значениях величины  $Q$ , определенных по уравнениям теплопередачи и теплового баланса, не более 2 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнение студентом домашней контрольной работы по дисциплине проводится с целью:

- получения первоначальных теоретических знаний и практических умений по общепрофессиональным и специальным дисциплинам;
- формирования умений применять теоретические знания при решении практических задач;
- формирования умений самостоятельной работы с учебной литературой, учебно-методическими материалами;
- формирования умений использовать справочную, нормативную и правовую документацию;
- развития самостоятельности, ответственности и организованности.

Представленное пособие может быть использовано в других вузах, где для студентов заочной формы обучения учебными планами предусмотрено изучение дисциплин «Термодинамика и теплопередача», «Теплофизика».

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

### **ОСНОВНОЙ СПИСОК**

1. *Карминский В.Д.* Техническая термодинамика и теплопередача. – М. : Маршрут, 2005. – 224 с.
2. *Киселев И.Г.* Теплотехника на подвижном составе железных дорог. – М. : ГОУ Уч.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2008. – 278 с.
3. Положение «Требования к оформлению текстовой и графической документации. Нормоконтроль». – Иркутск : ИрГУПС, 2012. – 48 с.

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ СПИСОК**

1. Теплотехника : учебник для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В.Н. Луканина. – 5-изд.,стер. – М. : Высшая школа, 2005 – 672 с.

## Приложение 1. СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ

Таблица П. 1  
Международная система единиц (СИ)

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение единиц
<b>Основные единицы</b>		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	kelvin	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд
<b>Некоторые производные единицы</b>		
Площадь	квадратный метр	м <sup>2</sup>
Объем, вместимость	кубический метр	м <sup>3</sup>
Скорость	метр в секунду	м/с
Ускорение	метр на квадрат секунды	м/с <sup>2</sup>
Сила, вес	Ньютон	1 Н = 1 кг·м/с <sup>2</sup>
Давление	Паскаль	1 Па = 1 Н/м <sup>2</sup> = 1 Н·кг/м·с <sup>2</sup>
Плотность	килограмм на метр кубический	м <sup>3</sup> /кг
Удельный объем	метр кубический на килограмм	м <sup>3</sup> /кг
Энергия, работа, количество теплоты, энталпия	Джоуль	1 Дж = 1 Н·м = 1 кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
Мощность, поток энергии	Ватт	1 Вт = 1 Дж/с = 1 кг·м <sup>2</sup> /с <sup>3</sup>
Энтропия	Джоуль на Кельвин	Дж/К
Удельная энтропия	Джоуль на килограмм – Кельвин	Дж/(кг·К)
Теплоёмкость	Джоуль на Кельвин	Дж/К
Удельная газовая постоянная	Джоуль на килограмм – Кельвин	Дж/(кг·К)
Универсальная газовая постоянная	Джоуль на моль – Кельвин	Дж/(моль·К)
Теплота фазового превращения	Джоуль на килограмм	Дж/кг
Электрическое напряжение	Вольт	1 В = 1 Вт/А = 1 Дж/А·с
Электрическое сопротивление	Ом	1 Ом = 1 В/А

Таблица П. 2

**Некоторые внесистемные единицы и их перевод в СИ**

<b>Величина</b>	<b>Название</b>	<b>Обозначение</b>	<b>Соотношение с единицей СИ</b>
Масса	тонна	т	$1 \text{ т} = 1000 \text{ кг}$
	центнер	ц	$1 \text{ ц} = 100 \text{ кг}$
Объем	литр	л	$1 \text{ л} = 0,001 \text{ м}^3$
Сила (вес)	тонна-сила	тс	$1 \text{ тс} = 9,81 \cdot 10^8 \text{ Н}$
	килограмм-сила	кгс	$1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}$
Мощность	лошадиная сила	л.с.	$1 \text{ л.с.} = 737 \text{ Вт}$
Работа	килограмм-сила на метр	кгс·м	$1 \text{ кгс·м} = 9,81 \text{ Дж}$
Теплота	калория	кал	$1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$
Температура Цельсия	градус Цельсия	°C	$1 \text{ }^\circ\text{C} = 1 \text{ К}$
Давление	техническая атмосфера	кгс/см <sup>2</sup>	$1 \text{ кг/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$
	миллиметр водяного столба	мм вод. ст.	$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \text{ Па}$
	миллиметр ртутного столба	мм рт.ст.	$1 \text{ мм рт.ст.} = 133,3 \text{ Па}$
	бар	бар	$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$
Площадь	гаектар	га	$1 \text{ га} = 10000 \text{ м}^2$
Время	минута	мин	$1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$
	час	ч	$1 \text{ ч} = 3600 \text{ с}$
	сутки	сут	$1 \text{ сут} = 86400 \text{ с}$

Таблица П. 3

**Приставки и множители десятичных кратных и дольных единиц СИ**

<b>Наименование</b>	<b>Обозначение русское</b>	<b>Обозначение международное</b>	<b>Десятичная запись</b>	<b>Обыкновенная запись</b>
атто	а	а	$10^{-18}$	0,000000000000000001
фемто	ф	f	$10^{-15}$	0,0000000000000001
пико	п	p	$10^{-12}$	0,000000000001
нано	н	n	$10^{-9}$	0,00000001
Микро	мк	μ	$10^{-6}$	0,000001
Милли	м	m	$10^{-3}$	0,001
Санти	с	s	$10^{-2}$	0,01
Деци	д	d	$10^{-1}$	0,1
Дека	да	da	$10^1$	10
Гекто	г	h	$10^2$	100
Кило	к	k	$10^3$	1000
Мега	М	M	$10^6$	1000000
Гига	Г	G	$10^9$	1000000000
Тера	Т	T	$10^{12}$	10000000000000
Пета	П	P	$10^{15}$	100000000000000000
Экса	Э	E	$10^{18}$	10000000000000000000000

## Приложение 2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

Таблица П. 4

### Физические параметры сухого воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\lambda\cdot10^2, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\mu\cdot10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$v\cdot10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\text{Pr}$
-150	2,793	1,026	1,14	8,43	3,08	0,780
-100	1,98	1,009	1,58	11,47	5,95	0,760
-50	1,584	1,005	2,00	14,42	9,23	0,730
-40	1,515	1,005	2,12	15,20	10,04	0,728
-30	1,453	1,005	2,20	15,69	10,08	0,723
-20	1,395	1,005	2,28	16,18	12,79	0,716
-10	1,342	1,005	2,36	16,67	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,16	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,65	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,14	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,63	16,0	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,12	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,61	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,10	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,97	20,59	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,08	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,48	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,87	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,85	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,73	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,52	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,30	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	25,99	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,36	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,61	29,42	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,38	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	33,05	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,75	36,19	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	39,13	96,89	0,699

Таблица П. 5

## Параметры стандартной атмосферы

<i>H, м</i>	<i>T<sub>h</sub></i>		<i>p<sub>h</sub></i>		<i>ρ<sub>h</sub>, кг/м<sup>3</sup></i>	<i>a<sub>h</sub>, м/с</i>	<i>v<sub>h</sub>·10<sup>5</sup>, м<sup>2</sup>/с</i>
	°C	K	кПа	кгс/м <sup>2</sup>			
-600	18,90	292,05	108,74	11089	1,2971	342,6	1,394
-400	17,60	290,75	106,22	10832	1,2727	341,8	1,416
-200	16,30	289,45	103,75	10580	1,2487	341,1	1,438
0	15,00	288,15	101,32	10332	1,2250	340,3	1,461
200	13,70	286,85	98,945	10089,6	1,2017	339,5	1,484
400	12,40	285,55	96,611	9851,6	1,1786	338,8	1,507
600	11,10	284,25	94,322	9618,2	1,1560	338,0	1,532
800	9,80	282,95	92,078	9389,3	1,1337	337,2	1,556
1000	8,50	281,65	89,876	9164,8	1,1117	336,4	1,581
1200	7,20	280,35	87,718	8944,7	1,0900	335,7	1,607
1400	5,90	279,05	85,602	8729,0	1,0687	334,9	1,633
1600	4,60	277,75	83,528	8517,4	1,0476	334,1	1,660
1800	3,30	276,45	81,494	8310,1	1,0269	333,3	1,687
2000	2,00	275,15	79,501	8106,9	1,0066	332,5	1,715
2200	0,70	273,85	77,548	7907,7	0,9865	331,7	1,743
2400	-0,59	272,56	75,634	7712,5	0,9667	331,0	1,772
2600	-1,89	271,26	73,759	7521,3	0,9473	330,2	1,802
2800	-3,19	269,96	71,921	7333,9	0,9281	329,4	1,832
3000	-4,49	268,66	70,121	7150,4	0,9093	328,6	1,863
3200	-5,79	267,36	68,358	6970,5	0,8907	327,8	1,894
3400	-7,09	266,06	66,631	6794,4	0,8724	327,0	1,927
3600	-8,39	264,76	64,939	6621,9	0,8544	326,2	1,959
3800	-9,69	263,46	63,282	6453,0	0,8368	325,4	1,993
4000	-10,98	262,17	61,660	6287,6	0,8193	324,6	2,027
4200	-12,28	260,87	60,072	6125,7	0,8022	323,8	2,063
4400	-13,58	259,57	58,518	5967,1	0,7854	323,0	2,098
4600	-14,88	258,27	56,996	5811,9	0,7688	322,2	2,135
4800	-16,18	256,97	55,506	5660,0	0,7525	321,4	2,173
5200	-18,77	254,38	52,622	5365,9	0,7206	319,7	2,250
5400	-20,07	253,08	51,226	5223,6	0,7051	318,9	2,290

Таблица П. 6

## Теплоёмкость газов

<i>t</i>	Воздух $\mu = 28,97$			Азот $\mu = 28,013$		
	$c_p$	$c_v$	$k = \frac{c_p}{c_v}$	$c_p$	$c_v$	$k = \frac{c_p}{c_v}$
°C	кДж/(кг·К)			кДж/(кг·К)		
-50	1,00191	0,7147	1,402	1,0	0,7419	1,400
-25	1,0023	0,7151	1,401	1,0	0,7419	1,400
0	1,0032	0,7159	1,401	1,0	0,7419	1,400
25	1,0040	0,7168	1,400	1,0	0,7423	1,400
50	1,0057	0,7184	1,399	1,0	0,7432	1,399
75	1,0073	0,7201	1,398	1,0	0,7440	1,399
100	1,0098	0,7226	1,397	1,0	0,7444	1,399
125	1,0128	0,7256	1,395	1,0	0,7465	1,398
150	1,0157	0,7285	1,394	1,0	0,7490	1,396
175	1,0199	0,7327	1,392	1,0	0,7515	1,395
200	1,0241	0,7369	1,389	1,0	0,7549	1,393
250	1,0337	0,7465	1,384	1,0	0,7628	1,389
300	1,0446	0,7574	1,379	1,0	0,7725	1,384
350	1,0563	0,7691	1,373	1,0	0,7829	1,379
400	1,0680	0,7808	1,368	1,0911	0,7942	1,374
450	1,0798	0,7926	1,362	1,1036	0,8968	1,368
500	1,0919	0,8047	1,357	1,1158	0,8189	1,362
550	1,1036	0,8164	1,352	1,1279	0,8311	1,357
600	1,1149	0,8277	1,347	1,1396	0,8428	1,352
650	1,1258	0,8399	1,342	1,1510	0,8541	1,348
700	1,1355	0,8487	1,338	1,1618	0,8633	1,344
750	1,1455	0,8583	1,334	1,1723	0,8754	1,339
800	1,1547	0,8675	1,331	1,1824	0,8855	1,335
850	1,1631	0,8759	1,133	1,1916	0,8947	1,332
900	1,1706	0,8834	1,325	1,1999	0,9031	1,329
950	1,1777	0,8905	1,322	1,2079	0,9110	1,326
1000	1,1844	0,8972	1,320	1,2154	0,9186	1,323
1050	1,1911	0,9039	1,317	1,2225	0,9257	1,320
1100	1,1970	0,9028	1,315	1,2292	0,9324	1,318
1150	1,2024	0,9152	1,314	1,2355	0,9387	1,316
1200	1,2079	0,9207	1,312	1,2414	0,9445	1,314
1250	1,2129	0,9257	1,310	1,2468	0,9500	1,312
1300	1,2179	0,9307	1,308	1,2518	0,9550	1,311
1350	1,2225	0,9353	1,307	1,2569	0,9600	1,309
1400	1,2267	0,9395	1,305	1,2615	0,9646	1,308
1450	1,2309	0,9437	1,304	1,2657	0,9688	1,307
1500	1,2347	0,9475	1,303	1,2694	0,9726	1,306

Таблица П. 7

## Физические параметры твёрдых материалов

Материал	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$t$ °C	$\lambda$ Вт/(м·К)	$c_p$ кДж/(кг·К)
Алюминий чистый	2700	20	238	0,900
		100	238	0,946
Алюминиевый сплав Д19	2760	25	138	0,879
		100	151	0,963
		300	172	1,047
Бронза хромистая	8900	25	221	0,377
		600	314	0,396
Вольфрам	19300	20	167	0,134
		500	121	0,142
Железо	7880	100	74	0,461
Золото	19300	20	311	0,126
Медь	8960	100	385	0,389
		400	365	0,406
Олово	7300	20	65,8	0,226
Платина	21500	20	69,8	0,133
Свинец	11300	20	34,9	0,128
Серебро	10500	20	418,7	0,247
Углеродистая сталь	7850	20	51,8	0,461
		300	44,4	0,574
		600	35,6	0,749
Сталь хромоникелевая	7900	100	15,6	0,515
		400	21,1	0,574
		700	24,8	0,616
Титан	4505	20	54,3	0,151
		500	13,7	0,590
		700	12,9	0,607
Титановый сплав ВТ-3	4510	100	8,8	0,460
		300	11,3	0,544
		600	15,4	0,712
Чугун	7500	20	33,7	0,502
Астратек	390	20	0,02	2...5,8
Асbestosовый картон	900	—	$0,14+0,00019 \cdot t$	0,816
Войлок строительный	300	0	0,052	1,88
Лед	920	0	2,256	2,261
Мипора (органика)	$\leq 20$	25	0,04	1,422
Пенопласти	50...200	20	0,052	1,38
Резина обыкновенная	1200	0	0,157	1,38
Слюдя	290	0	0,582	0,879
Стекло	2500	100	0,814	0,779
Минеральная стекловата	200	—	$0,047+0,87 \cdot t$	0,84
Текстолит	1300	20	0,233	1,465
Фторопласт	2120	0	0,25	3,856
Эбонит	1200	20	0,163	1,43

Таблица П. 8

Степень черноты  $\varepsilon$  различных материалов

Наименование материала	$t, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon$
<b>Алюминий:</b>		
• полированный	225...575	0,039...0,057
• шероховатый	26	0,055
<b>Железо:</b>		
• свежеобработанное наждаком	20	0,242
• окисленное	100	0,36
• литое не обработанное	925...1115	0,87...0,95
• полированное	425...1020	0,144...0,377
<b>Кирпич:</b>		
• красный	20	0,93
• шероховатый шамотный	1100	0,75
<b>Лак:</b>		
• черный матовый	40...95	0,96...0,98
• черный глянцевый	40...95	0,87
• белый	40...95	0,80...0,95
<b>Краска:</b>		
• алюминиевая	130...335	0,35
• масляная различных цветов	100	0,92...0,96
Золото полированное	225...635	0,018...0,035
Медь полированная	80...115	0,018...0,023
Никель полированный	225...375	0,07...0,087
Резина мягкая серая	24	0,859
Сажа ламповая	20...1000	0,96
Смоченная металлическая поверхность	20	0,98
Вода	0...100	0,95...0,963
Снег	—	0,96
Стекло гладкое	22	0,937
Бумага белая	19	0,924

Таблица П. 9

## Физические свойства воды в состоянии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	$v_n \cdot 10^5, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	999,9	4,212	55,1	1,789	13,67
10	999,7	4,191	57,4	1,306	9,52
20	998,2	4,183	59,9	1,006	7,02
30	995,7	4,174	61,8	0,805	5,42
50	992,2	4,174	63,5	0,659	4,31
60	988,1	4,174	64,8	0,556	3,54
70	983,2	4,179	65,9	0,478	2,98
80	977,8	4,187	66,8	0,415	2,55
90	971,8	4,195	67,4	0,365	2,21
100	965,3	4,208	68,0	0,326	1,95

### Приложение 3. КРИТЕРИИ СОСТОЯНИЯ

Таблица П. 10

#### Критерии подобия

<b>Критерий</b>	<b>Наименование</b>	<b>Физический смысл</b>
$Re = \frac{wd}{v}$	<b>Критерий режима течения – Критерий Рейнольдса</b>	Характеризует гидродинамический режим потока и определяет соотношение в нём сил инерции и трения
$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$	<b>Безразмерный коэффициент теплоотдачи – Критерий Нуссельта</b>	Характеризует соотношение между интенсивностями конвективной теплоотдачи и теплопроводности в пограничном слое потока
$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2}$	<b>Критерий подобия сил давления – Критерий Эйлера</b>	Характеризует соотношение сил давления и инерции в потоке
$Pe = \frac{wl}{a}$	<b>Критерий теплового подобия – Критерий Пекле</b>	Характеризует соотношение конвективного и молекулярного переносов теплоты в потоке.
$Pr = \frac{v}{a}$	<b>Критерий подобия температурных и скоростных полей – Критерий Прандтля</b>	Характеризует меру подобия скоростных и температурных полей, а также свойства потоков
$Fr = \frac{w^2}{gl}$	<b>Критерий гравитационного подобия – Критерий Фруда</b>	Характеризует соотношение сил инерции и тяжести в однородном потоке
$Ar = \frac{gL^3}{\Delta \rho v^2}$	<b>Критерий гравитационной конвекции – Критерий Архимеда</b>	Характеризует соотношение архимедовой подъёмной силы, обусловленной различием плотностей тяжёлой и легкой фаз, и сил молекулярного трения в потоке
$St = \frac{\alpha}{c \rho u}$	<b>Критерий Сентона</b>	Характеризует соотношение между интенсивностью теплоотдачи и удельной энтальпией потока
$Ra = Gr Pr$	<b>Критерий Рэлея</b>	Характеризует интенсивность возмущений температурного и скоростного полей под действием гравитационных сил
$Gr = \frac{g \beta d^3 \Delta T}{v^2}$	<b>Критерий термогравитационной конвекции – Критерий Грасгофа</b>	Характеризует соотношение сил молекулярного трения и подъёмной силы, обусловленной различием плотностей в различных точках
$Fo = \frac{a \tau}{l^2}$	<b>Число Фурье – Критерий тепловой гомохронности</b>	Характеризует скорость изменения температурного поля
$Ho = \frac{w \tau}{l}$	<b>Критерий гидродинамической гомохронности</b>	Характеризует скорость изменения скоростного поля
$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda_{cm}}$	<b>Число Био – Критерий теплового подобия</b>	Характеризует связь между полями температур в твёрдом теле и условиями теплоотдачи на его поверхности

**Приложение 4. ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»  
(ФГБОУ ВПО ИрГУПС)

Факультет транспортных систем  
Кафедра «Вагоны и вагонное хозяйство»  
Дисциплина «Термодинамика и теплопередача»

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА  
К.420100.190303.65.ПЗ

Вариант 33

Выполнил:

студент гр. ПСЖ.3-11-3  
00733

№ зачётной книжки студента  
Игнатьев А.Д.

Подпись

Проверил  
доцент Иванов В.П.

Подпись

Иркутск 2015

## 1 Задание по разделу: Термодинамика

### 1.1 Контрольные вопросы (5, 8)

**Вопрос 5.** Что называется термодинамической системой? Виды термодинамических систем.

#### **Ответ:**

**Термодинамической системой** называется рассматриваемая в данной задаче совокупность макроскопических тел (т. е. тел, состоящих из большого числа микрочастиц), которые могут обмениваться энергией и веществом между собой и с окружающей их средой. (*Например, стакан, в который только что налили горячий чай, и окружающая среда – воздух. Стакан нагревается, чай остывает и притом часть теплоты уходит в окружающую среду, т. е. воздух в помещении чуть-чуть нагревается*). В частном случае термодинамическая система может состоять из одного тела.

Система называется **гомогенной**, если состав и физические свойства во всех ее частях одинаковы или меняются непрерывно (без скачков). (*Например, воздух в аудитории. Его состав везде один и тот же, а температура немножко меняется*) В противном случае система является **гетерогенной**. Гетерогенная система состоит из нескольких гомогенных областей, называемых **фазами** (*например, топливный бак, частично заполненный бензином, а частично его парами*).

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	К.420100.190303.65.ПЗ		
Выполнил		Игнатьев					
Принял		Иванов В.П.					
Проверил		Иванов В.П.					
Контрольная работа						Литера	Лист
						2	7
						ИрГУПС гр. ПСЖ.3-11-3	

Частным случаем гомогенной системы является **однородная** система, состав и физические свойства (температура, давление и т. п.) во всех частях которой одинаковы.

**Вопрос 8.** Какой должна быть форма канала для разгона дозвукового газового потока?

**Ответ:**

В общем случае изменение скорости газового потока может быть вызвано различными воздействиями, как, например, подводом или отводом теплоты и работы, изменением площади проходного сечения канала или трением. Воздействие на газовый поток путём изменения площади поперечного сечения канала  $F$  называется **геометрическим воздействием**.

За счет изменения формы канала, т. е. выполнения его суживающимся в направлении движения газа (как говорят, *конфузорным*), можно увеличить скорость изначально дозвукового газового потока.

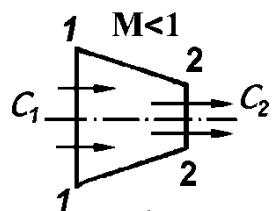
Специально спрофилированный канал, предназначенный для разгона потока и получения струи газа или жидкости, называется **соплом**.

При энергоизолированном течении изменение скорости газового потока и его плотности носит противоположный характер, т. е. при увеличении скорости плотность снижается и наоборот. Поэтому, как следует из уравнения неразрывности, **форма канала, необходимая для разгона или торможения потока**, (т. е. характер изменения площади поперечного сечения  $F = G/c\rho$  в направлении течения) **определяется соотношением между интенсивностью изменения**

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Пист
					3

*скорости и интенсивностью изменения плотности газа, т. е.  
изменением величины ср.*

При малых и умеренных дозвуковых скоростях потока изменение скорости сопровождается незначительным изменением плотности. Следовательно, для разгона дозвукового потока требуется уменьшение площади проходных сечений вдоль канала (рис. 1).



**Рис. 1. Канал для разгона  
газового потока**

В суживающейся части такого сопла поток можно разогнать только до скорости, равной скорости звука.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

К.420100.190303.65.ПЗ

Лист	4

## 1.2 Задачи (3, 14)

### Задача 3

В закрытом сосуде объёмом  $V = 300$  л находится воздух при давлении  $p_1 = 0,8$  МПа и температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ .

Какое количество теплоты необходимо подвести для того, чтобы температура воздуха увеличилась до  $t_2 = 120^\circ\text{C}$ ?

Дано:

$$V = 300 \text{ л};$$

$$p_1 = 0,8 \text{ МПа};$$

$$t_1 = 20^\circ\text{C};$$

$$t_2 = 120^\circ\text{C}.$$

Определить:  $Q$ .

Решение:

Пользуясь уравнением состояния, определяем массу воздуха, находящегося в сосуде:

$$M = \frac{V p_1}{R T_1} = \frac{0,3 \cdot 0,8 \cdot 10^6}{287 \cdot 293,15} = 2,85 \text{ кг},$$

где  $V = 300 \text{ л} = 0,3 \text{ м}^3$ ;

$$T_1 = t_1 + 273,15 = 20 + 273,15 = 293,15 \text{ К}.$$

Для двухатомных газов, считая теплоёмкость величиной постоянной, имеем

$$\mu c_v = 20,93 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}},$$

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Письм
					5

следовательно, теплоёмкость воздуха

$$c_v = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{20,93}{28,96} = 0,7226 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

где

$$\mu = 28,9 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \text{ — молярная масса воздуха.}$$

Количество подведённой теплоты

$$Q = Mc_v(T_2 - T_1) = 2,85 \cdot 0,7226(393,15 - 293,15) = 205,94 \text{ кДж.}$$

**Ответ:** к воздуху необходимо подвести 205,94 кДж теплоты.

### **Задача 3**

В газовом двигателе смесь газа и воздуха адиабатно сжимается так, что к концу сжатия ее температура оказывается на 200°C ниже температуры самовоспламенения газа. В начале сжатия  $p_1 = 0,09 \text{ Мпа}$  и температура  $t_1 = 70^\circ\text{C}$ . Показатель адиабаты  $k = 1,36$ ,  $R = 314 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , температура самовоспламенения равна  $650^\circ\text{C}$ .

Определить величину работы сжатия и степень сжатия  $\varepsilon = v_1/v_2$ .

#### **Дано:**

$$t_1 = 70^\circ\text{C};$$

$$t_2 = 650 - 200 = 450^\circ\text{C};$$

$$p_1 = 0,09 \text{ МПа};$$

$$R = 314 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К});$$

$$k = 1,36.$$

**Определить:**  $l$ ;  $\varepsilon = v_1/v_2$ .

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист	6
					K.420100.190303.65.П3	

**Решение:**

Из соотношения параметров в адиабатном процессе имеем

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

Откуда

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}} = \left[\frac{(450 + 273,15)}{(70 + 273,15)}\right]^{\frac{1}{1,36-1}} = 7,92.$$

Работа сжатия определяется по выражению

$$l = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2) = \frac{314}{1,36-1}(343,15 - 723,15) = -331,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

**Ответ:** степень сжатия  $\varepsilon = 7,92$ ; работа сжатия  $l = -331,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

**2 Задание по разделу: Теплопередача**

**2.1 Контрольные вопросы (2, 17)**

**Вопрос 2**

// ..... //

**2.2 Задачи (9, 12)**

// ..... //

***Оформление задания по второму разделу  
выполнять по аналогии с первым разделом!***

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Лист	7
					K.420100.190303.65.ПЗ	

Учебное издание

**Бронникова Елена Михайловна  
Матвиенко Александр Сергеевич**

## **ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

Задание на контрольную работу  
с методическими указаниями  
для студентов заочной формы обучения

Редактор *М.Н. Щербакова*  
Компьютерная верстка *И.В. Колчанова,*  
*А.С. Матвиенко*

Подписано в печать 00.00.2015.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 2,75. Уч.-изд. л. 2,87.  
План 2015 г. Тираж 100 экз. Заказ

Типография ИрГУПС, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

## ДЛЯ ЗАМЕТОК

## ДЛЯ ЗАМЕТОК