

**Н. В. ЖДАНОВ, М. В. КОКШАРОВ, М. В. ГЛУХОВА**

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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»**

**ОМСК 2013**

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Омский государственный университет путей сообщения

---

Н. В. Жданов, М. В. Кокшаров, М. В. Глухова

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»

Утверждено редакционно-издательским советом университета

Омск 2013

УДК 621.1: 536.7(075.8)

ББК 31.31я73

Ж42

**Методические указания к выполнению контрольных работ по дисциплине «Термодинамика и теплопередача» / Н. В. Жданов, М. В. Кокшаров, М. В. Глухова; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2013. 36 с.**

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Термодинамика и теплопередача» и содержат две контрольные работы, в которых представлены краткие теоретические сведения по изучаемой теме, условия контрольных задач и контрольные вопросы.

Предназначены для студентов специальностей 190300 – «Подвижной состав железных дорог», 151900 – «Технология машиностроения» – очной формы обучения.

Библиогр.: 9 назв. Табл. 5.

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент А. Л. Иванов;  
канд. техн. наук, доцент А. С. Анисимов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 5  |
| Контрольная работа 1 .....   | 6  |
| Техническая термодинамика.....                                     | 6  |
| 1.1. Выбор варианта.....   | 6  |
| 1.2. Контрольные вопросы.....                                      | 6  |
| 1.3. Условия задач .....   | 8  |
| 1.4. Выбор исходных данных для контрольных задач .....             | 12 |
| 1.5. Методические указания к выполнению контрольной работы 1 ..... | 14 |
| Контрольная работа 2.....  | 24 |
| Основы теплопередачи.....  | 24 |
| 2.1. Выбор варианта.....   | 24 |
| 2.2. Контрольные вопросы.....                                      | 24 |
| 2.3. Условия задач .....   | 25 |
| 2.4. Выбор исходных данных для контрольных задач .....             | 29 |
| 2.5. Методические указания к выполнению контрольной работы 2 ..... | 31 |
| Библиографический список.....                                      | 35 |



## ВВЕДЕНИЕ

При изучении курса «Термодинамика и теплопередача» каждый студент обязан самостоятельно выполнить две контрольные работы. 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 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 требованиями ГОСТ 9867-61 числовые расчеты в решениях задач рекомендуется выполнять в единицах СИ.

*Контрольная работа 1*  
**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

**1.1. Выбор варианта**

Студент выбирает номера контрольных вопросов и задач из таблицы вариантов (табл. 1) по последней цифре шифра, а недостающие числовые данные к задачам – по предпоследней цифре шифра из табл. 2 для соответствующей задачи. Шифр соответствует последним двум цифрам номера зачетной книжки студента.

Т а б л и ц а 1

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  | 3  | 4  | 5  |
|                             | 13                    | 12 | 11 | 10 | 9  | 8  | 14 | 15 | 16 | 17 |
|                             | 18                    | 19 | 20 | 22 | 21 | 18 | 19 | 18 | 21 | 22 |
|                             | 23                    | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 25 |

**1.2. Контрольные вопросы**

- 1) Какие параметры состояния рабочего тела называют основными, в каких единицах они измеряются?
- 2) Напишите уравнение состояния идеального газа. Чем реальный газ отличается от идеального?
- 3) Дайте определение удельной теплоемкости. К каким единицам количества рабочего тела принято относить теплоемкость?
- 4) Покажите связь между теплоемкостями при постоянных объеме и давлении.
- 5) Как можно выразить изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в произвольном термодинамическом процессе?

- 6) В каком процессе изменения состояния вся подведенная к рабочему телу теплота 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 формулировки второго закона термодинамики.
- 11) Изобразите  $p$ - $v$ -диаграмму водяного пара и покажите на ней характерные линии и области.
- 12) Изобразите  $T$ - $s$ -диаграмму водяного пара и покажите на ней теплоту жидкости, парообразования и перегрева. Какая площадь  $T$ - $s$ -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 на  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -диаграммах идеальные циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = \text{const}$ , при  $p = \text{const}$  и при смешанном цикле. Дайте необходимые пояснения.
- 17) Как величина степени сжатия влияет на термический КПД идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты в процессе при  $v = \text{const}$ ? Что ограничивает увеличение степени сжатия в двигателях, работающих по этому циклу?
- 18) Пользуясь  $T$ - $s$ -диаграммой, сравните термические КПД идеальных циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания при одинаковых значениях абсолютных давления и температуры в конце подвода теплоты и при других прочих условиях.



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

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

### 1.3. Условия задач

1) В цилиндре с поршнем сжимается газ при постоянной температуре до давления (по манометру)  $p_m$ . Определить, во сколько раз уменьшится объем газа, если перед сжатием в цилиндре было разрежение  $p_{\text{вак}}$ . Барометрическое давление  $B = 750$  мм рт. ст. Изобразить процесс в  $pV$ -координатах.

2) Определять массу азота и кислорода, если каждый из этих газов находится в баллоне объемом 350 л под давлением (по манометру)  $p$  при температуре  $t$ . Определить 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, 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 мольной, массовой и объемной изобарных теплоемкостей в интервале значений температуры от  $t_1 = 200$  °С до  $t_2$ .

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

6) Какое количество теплоты надо отвести при охлаждении от начальной температуры  $t_1$  до  $t_2 = 200$  °С от 1 кг смеси идеальных газов при постоянном давлении? Массовый состав приведен в задаче 5. Массовую теплоемкость газов считать зависящей от температуры.

7) Азот массой  $G$ , кг, имеет начальное абсолютное давление  $p_1$  и  $t_1 = 17$  °С. В результате изобарного подвода тепла температура газа повысилась до  $t_2$ . Оп-

ределить объем азота в конце расширения, подведенную теплоту, работу процесса, удельные значения изменения 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, удельные значения энтальпии и энтропии в процессе, если начальные параметры воздуха были такими:  $p_1 = 100$  кПа и  $t_1 = 27$  °С. Теплоемкость газа принять не зависящей от температуры. Процесс изобразить в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.

9) В процессе расширения при постоянной температуре, равной  $127$  °С, 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 в конце расширения, 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  $U = 500$  кДж. Начальные параметры углекислого газа:  $p_1, V_1 = 0,3$  м<sup>3</sup> и  $t_1 = 527$  °С. Теплоемкость газа принята 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  $t_1 = 127$  °С 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, изменение энтальпии и работу расширения. Решение задачи иллюстрировать  $hs$ -диаграммой.

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  $hs$ -диаграммой.

14) Определить количество теплоты, необходимое для перегрева  $1$  кг пара в пароперегревателе котла до температуры  $t$  при постоянном давлении  $p$ , и

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  $hs$ -диаграммой.

15) Сухой насыщенный пар при неизменной температуре расширяется от давления  $p_1$  до  $p_2$ . Определить работу, совершенную 1 кг пара в процессе. Решение задачи иллюстрировать  $hs$ -диаграммой.

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

17) Влажный насыщенный водяной пар с давлением  $p_1$  и степенью сухости  $x$  дросселируется до давления  $p_2$ . Определить состояние пара и его параметры после дросселирования и изменение энтропии в процессе. Изобразить условный процесс в  $hs$ -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 паровой турбине 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  $hs$ -диаграммой.

19) Как изменится теоретическая скорость истечения перегретого пара давлением  $p_1$  в атмосферу ( $p_a = 0,1$  МПа), если сужающееся сопло дополнить расширяющейся частью, т. е. заменить соплом Лавалья? 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 среду с давлением  $p_2$ . Определить требуемую форму (тип) сопла, теоретическую скорость истечения и секундный массовый расход пара через сопло, если диаметр сечения, определяющего расход,  $d = 10$  мм.

21) Воздух с абсолютным давлением  $p_1$  и температурой  $t_1 = 27$  °С вытекает через суживающееся сопло с диаметром 10 мм в атмосферу (барометрическое давление  $B$  считать постоянным и равным 750 мм рт. ст.). Определить теоретическую 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  $V$  считать постоянным и равным 750 мм рт. ст.). Определить требуемый тип сопла, скорость истечения (если скоростной коэффициент сопла  $\phi = 0,9$ ) 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  $V_n = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , сжимает воздух по политропе с показателем  $n = 1,2$  от давления  $p_1 = 90 \text{ кПа}$  до абсолютного давления  $p_2$ . Частота вращения вала компрессора  $n = 23 \text{ об/с}$ . Определить секундную работу в процессе сжатия воздуха, мощность привода компрессора и температуру газа в конце процесса сжатия, если начальная температура воздуха  $t_1 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$ .

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  $1 \text{ м}^3$  всасываемого газа, если промежуточное давление в двухступенчатом компрессоре равно 300 кПа, а охлаждение воздуха после сжатия в первой ступени осуществляется до начальной температуры  $t_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Определить конечную температуру 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  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ , степень сжатия  $\epsilon$ , степень повышения давления  $\lambda$ . Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха. Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.

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

таковы:  $p_1 = 80$  кПа;  $t_1 = 47$  °С; степень сжатия  $\varepsilon$ . 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  $q_1^V$ . Начальная температура  $t_1 = 37$  °С, абсолютное давление 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.

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  $\varepsilon$ , если оба цикла осуществляются в одном диапазоне изменения температуры  $t_{\max}$  и  $t_{\min} = 17$  °С. Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха. Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.

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,  $t_1 = 17$  °С, 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 минимальной температурой первого цикла.

#### 1.4. Выбор исходных данных для контрольных задач

Выбор недостающих данных осуществляется из табл. 2 для соответствующего номера задачи.

## Исходные данные к задачам

| Номер задачи | Величина, единица измерения   | Предпоследняя цифра шифра |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|-------------------------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|              |                               | 1                         | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 0    |
| 1            | 2                             | 3                         | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
| 1            | $p_M$ , МПа                   | 0,2                       | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1,0  | 1,1  |
|              | $p_{\text{вак}}$ , мм рт. ст. | 600                       | 550  | 500  | 450  | 400  | 350  | 300  | 280  | 260  | 250  |
| 2            | $p$ , МПа                     | 12                        | 11   | 10   | 9    | 8    | 7    | 6    | 5    | 4    | 3    |
|              | $t$ , °С                      | 0                         | 5    | 7    | 10   | 15   | 17   | 20   | 25   | 27   | 30   |
| 3            | $t$ , °С                      | 300                       | 350  | 400  | 450  | 500  | 550  | 600  | 650  | 700  | 750  |
| 4            | $t_2$ , °С                    | 800                       | 750  | 700  | 650  | 600  | 550  | 500  | 450  | 400  | 350  |
| 5            | $m_{\text{CO}}$ , %           | 18                        | 17   | 16   | 15   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 16   |
|              | $m_{\text{O}}$ , %            | 12                        | 12   | 11   | 11   | 10   | 10   | 9    | 8    | 7    | 6    |
|              | $m_{\text{N}_2}$ , %          | 70                        | 71   | 73   | 74   | 76   | 75   | 75   | 75   | 75   | 78   |
| 6            | $t_1$ , °С                    | 1000                      | 950  | 900  | 850  | 800  | 750  | 700  | 650  | 600  | 550  |
| 7            | $G$ , кг                      | 1                         | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|              | $p_1$ , МПа                   | 1,5                       | 1,4  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1    | 0,9  | 0,8  | 0,7  | 0,6  |
|              | $t_2$ , °С                    | 100                       | 120  | 130  | 140  | 150  | 160  | 170  | 180  | 190  | 200  |
| 8            | $V$ , м <sup>3</sup>          | 0,2                       | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    | 1,2  |
|              | $t_2$ , °С                    | 800                       | 750  | 700  | 650  | 600  | 550  | 500  | 450  | 400  | 350  |
| 9            | $p_1$ , МПа                   | 4                         | 3,3  | 3,6  | 3,4  | 3,3  | 3    | 2,8  | 2,6  | 2,4  | 2,2  |
|              | $p_2$ , МПа                   | 2,0                       | 1,8  | 1,6  | 1,4  | 1,2  | 1    | 0,8  | 0,6  | 0,4  | 0,2  |
| 10           | $p_1$ , МПа                   | 0,6                       | 0,65 | 0,7  | 0,75 | 0,8  | 0,85 | 0,9  | 0,95 | 0,1  | 0,1  |
| 11           | $p_1$ , МПа                   | 2                         | 2,5  | 2,6  | 2,4  | 2,2  | 2    | 1,8  | 1,6  | 1,4  | 1,2  |
|              | $p_2$ , МПа                   | 0,3                       | 0,28 | 0,26 | 0,24 | 0,22 | 0,2  | 0,18 | 0,16 | 0,14 | 0,12 |
|              | $V_2$ , м <sup>3</sup>        | 30                        | 29   | 28   | 27   | 26   | 25   | 24   | 23   | 22   | 20   |
| 12           | $p_1$ , МПа                   | 20                        | 18   | 16   | 14   | 12   | 10   | 8    | 7    | 6    | 5    |
|              | $v_1$ , м <sup>3</sup>        | 0,02                      | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,06 |
|              | $p_2$ , МПа                   | 0,1                       | 0,35 | 0,35 | 0,5  | 0,18 | 0,16 | 0,35 | 0,55 | 0,4  | 0,5  |
| 13           | $p$ , МПа                     | 9                         | 10   | 9    | 10   | 8    | 8    | 6    | 6    | 5    | 5    |
|              | $t_2$ , °С                    | 500                       | 500  | 450  | 550  | 500  | 450  | 600  | 500  | 400  | 350  |
|              | $q_1$ , кДж/кг                | 600                       | 660  | 360  | 330  | 700  | 575  | 970  | 720  | 500  | 370  |
| 14           | $t$ , °С                      | 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 | 0,92 |
| 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    |

| 1  | 2                                    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|----|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 16 | p, МПа                               | 2    | 2,2  | 2,4  | 2,6  | 2,8  | 3    | 3,5  | 4    | 4,5  | 5    |
|    | 1-x                                  | 0,20 | 0,18 | 0,16 | 0,14 | 0,12 | 0,10 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,02 |
| 17 | p <sub>1</sub> , МПа                 | 5    | 4,5  | 4    | 3,5  | 2    | 2,6  | 2    | 1,8  | 1,5  | 1    |
|    | x                                    | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,97 | 0,96 | 0,95 | 0,96 |
|    | p <sub>2</sub> , МПа                 | 0,2  | 0,18 | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 0,1  | 0,2  | 0,18 | 0,16 | 0,14 |
| 18 | p <sub>2</sub> , МПа                 | 6    | 5,5  | 5    | 4,5  | 4    | 3,5  | 3    | 2,5  | 2    | 2    |
|    | t <sub>1</sub> , °C                  | 500  | 480  | 480  | 440  | 420  | 400  | 410  | 430  | 450  | 470  |
| 19 | p <sub>1</sub> , МПа                 | 4    | 3,5  | 3    | 2,8  | 2,6  | 2,4  | 2,2  | 2    | 1,8  | 1,5  |
|    | t <sub>1</sub> , °C                  | 460  | 440  | 420  | 400  | 380  | 360  | 340  | 320  | 300  | 280  |
| 20 | p <sub>1</sub> , МПа                 | 2,5  | 3    | 3,5  | 4    | 4,5  | 5    | 5,5  | 6    | 7    | 8    |
|    | t <sub>1</sub> , °C                  | 450  | 400  | 500  | 350  | 400  | 450  | 500  | 550  | 350  | 400  |
|    | p <sub>2</sub> , МПа                 | 0,3  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    | 1,2  | 1,4  | 1,5  |
| 21 | p <sub>1</sub> , МПа                 | 1,5  | 1,4  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1    | 0,2  | 0,3  | 0,7  | 0,6  |
| 22 | p <sub>1</sub> , МПа                 | 0,6  | 0,65 | 0,7  | 0,75 | 0,5  | 0,35 | 0,9  | 0,95 | 1    | 1,1  |
|    | t <sub>1</sub> , °C                  | 200  | 210  | 220  | 230  | 240  | 250  | 260  | 270  | 280  | 290  |
| 23 | p <sub>2</sub> , 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 | ε                                    | 8    | 7,5  | 7    | 8,1  | 8,6  | 6,4  | 6,2  | 6    | 5,8  | 5,6  |
|    | λ                                    | 1,6  | 1,55 | 1,5  | 1,45 | 1,4  | 1,35 | 1,3  | 1,25 | 1,2  | 1,25 |
| 26 | q <sub>1</sub> , кДж/кг              | 1000 | 975  | 950  | 925  | 900  | 875  | 850  | 825  | 80   | 775  |
|    | ε                                    | 12   | 12,2 | 12,4 | 12,6 | 12,8 | 13   | 13,2 | 13,4 | 13,7 | 14   |
| 27 | q <sub>1</sub> <sup>v</sup> , кДж/кг | 255  | 250  | 245  | 240  | 235  | 230  | 225  | 220  | 215  | 210  |
|    | p <sub>4</sub> , МПа                 | 7    | 6,8  | 6,6  | 6,4  | 6,2  | 6    | 5,9  | 5,8  | 5,7  | 5,6  |
| 28 | ε                                    | 8    | 7,8  | 7,6  | 7,4  | 7,2  | 7    | 6,8  | 6,6  | 6,4  | 6,2  |
|    | t <sub>max</sub>                     | 2000 | 1980 | 1960 | 1940 | 1920 | 1900 | 1880 | 1860 | 1830 | 1800 |
| 29 | t <sub>3</sub> , °C                  | 800  | 780  | 760  | 740  | 720  | 700  | 690  | 680  | 670  | 660  |
|    | λ                                    | 8    | 7,8  | 7,6  | 7,4  | 7,2  | 7    | 6,8  | 6,6  | 6,5  | 6,4  |
| 30 | p <sub>1</sub> , МПа                 | 10   | 9    | 8    | 7    | 6    | 5    | 4,5  | 4    | 3,5  | 3    |
|    | t <sub>1</sub> , °C                  | 550  | 530  | 500  | 480  | 450  | 400  | 420  | 440  | 460  | 480  |

### 1.5. 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 [2 – 8]:

для 1 кг –

$$pv = RT ; \quad (1.1)$$

для G кг –

$$pv = GRT , \quad (1.2)$$

где  $v$  – удельный объем идеального газа, м<sup>3</sup>/кг;

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

$\mu$  – масса 1 моля газа, кг (численно равна молекулярной массе газа);  $p$  – абсолютное давление, Па:

$$\begin{cases} p = B + p_M ; \\ p = B - p_B , \end{cases} \quad (1.3)$$

где  $p_M$  – избыточное давление, измеряемое манометром,

Па;  $p_B$  – разрежение, измеряемое вакуумметром, Па;

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

Для газовых смесей вводят понятие о так называемой средней (кажущейся) молекулярной массе смеси, значение которой определяется по выражениям: через объемные доли [3] –

$$\mu_{см} = \sum_1^n \Gamma_i \mu_i , \quad (1.4)$$

и через массовые доли –

$$\mu_{см} = 1 / \sum_1^n m_i \mu_i , \quad (1.5)$$



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

$m_i = \frac{G_i}{G}$  – массовая доля газа в смеси (отношение массы этого газа, входя-

щего в смесь, к массе всей смеси), кг;

$r_i = \frac{V_i}{V}$  – объемная доля (отношение приведенного объема какого-либо

газа, входящего в смесь, к объему всей смеси).

Формулы пересчета состава смеси [4 – 6]:

$$r_i = m_i \mu_{см} / \mu_i ; \quad (1.6)$$

$$m_i = \frac{r_i \mu_i}{\mu_{см}} ; \quad (1.7)$$

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

$$R = \sum_1^n m_i R_i , \text{ или по средней молекулярной массе смеси } R = 8314 / \mu_{см}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Для определения парциального давления отдельного компонента  $p_i$ , входящего в смесь, служат формулы  $p_i = r_i p$  и  $p_i = m_i \frac{p}{\mu_{см}}$ , где  $p$  – полное давление смеси газов, Па.

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 физических условиях ( $p_0 = 760$  мм рт. ст. = 101325 Па,  $t_0 = 0$  °С). Эти теплоемкости связаны между собой следующими зависимостями:

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = \frac{c'}{\rho_0} ; \quad (1.8)$$

$$c' = \frac{\mu c}{22,4} = \rho_0 c , \quad (1.9)$$

где  $\mu$  – молекулярная масса газа, кг/кмоль;

$\rho_0$  – плотность газа при нормальных физических 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 обо-

значают буквой  $k$ , 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 теплоемкость газов одинаковой атомности считают величиной постоянной. Значения мольных теплоемкостей и показателей адиабаты приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Значения мольных теплоемкостей и показателей адиабаты

| Газы                 | Удельная мольная 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 | 20,31  | 37,68     | 1,29 |

Зависимости теплоемкостей газов от температуры имеют нелинейный характер. В источнике [7] в табл. П.1 приведены средние мольные теплоемкости некоторых газов в пределах от 0 до  $t$ , °С. При пользовании данными указанной таблицы в необходимых случаях требуется производить интерполяцию.

Для смесей идеальных газов [5, 6] теплоемкость определяется по формулам:  
массовая –

$$c_{см} = \sum_1^n m_i c_i ; \quad (1.10)$$

объемная –

$$c'_{см} = \sum_1^n r_i c'_i ; \quad (1.11)$$

МОЛЬНАЯ —

$$\mu_{cm}^c = \sum_1^n \Gamma_i v c_i. \quad (1.12)$$

Для определения, например, средней мольной теплоемкости в пределах температуры от  $t_1$  до  $t_2$  надо из соответствующей таблицы взять теплоемкость  $\mu_{cm1}$  и  $\mu_{cm2}$  соответственно в пределах  $(0 - t_1)^\circ\text{C}$  и  $(0 - t_2)^\circ\text{C}$  (средние теплоемкости помечаются индексом  $m$ ). Затем по выражению  $\mu_m^c = \frac{\mu_{cm} t_2 - \mu_{cm} t_1}{t_2 - t_1}$  рас-

считать искомую теплоемкость.

Если в процессе участвуют  $G$  кг вещества, то количество теплоты в соответствующем процессе определяется по выражению [7]:

$$Q = G(c_{m2} t_2 - c_{m1} t_1). \quad (1.13)$$

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

$$p_1 / p_2 = (v_1 / v_2)^n; \quad (1.14)$$

$$T_2 / T_1 = (v_1 / v_2)^{n-1}; \quad (1.15)$$

$$T_2 / T_1 = (p_1 / p_2)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (1.16)$$

Для адиабатного процесса в формулах (1.14) – (1.16) показатель  $n$  заменяется показателем адиабаты  $k = c_p / c_v$ .

Изменение внутренней энергии  $u_{1-2}$ , энтальпии  $h_{1-2}$  и энтропии  $s_{1-2}$  не зависит от характера процесса и при постоянной теплоемкости 1 кг идеального газа подсчитывается по формулам:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (t_2 - t_1); \quad (1.17)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p (t_2 - t_1); \quad (1.18)$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c \ln T_2 / T_1. \quad (1.19)$$

В выражении (1.19)  $c$  – теплоемкость соответствующего процесса. Для политропного процесса теплоемкость [5]

$$c_n = \frac{n - k}{n - 1}. \quad (1.20)$$

Работа газа в политропном процессе, кДж,

$$L = \frac{u_2(T_2 - T_1)}{n - 1} = \frac{u_2(T_2 - T_1)}{n - 1} \left[ - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (1.21)$$

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

$$Q = L = GRT \ln \frac{v_2}{v_1} = GRT \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (1.22)$$

В этом процессе изменение удельной энтропии [5]

$$\Delta s_{1-2} = s_2 - s_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{q_{1-2}}{T}, \quad (1.23)$$

где  $q_{1-2} = \frac{Q}{G}$ .

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

$$l = L / G = u_1 - u_2 = c_v (t_1 - t_2) . \quad (1.24)$$

### Задачи № 12 – 18

Задачи решаются при помощи  $h_s$ -диаграммы водяного пара, практическая часть которой состоит из двух областей [1]. 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 определять состояние пара, нужно показать, в какой области диаграммы находится точка данного состояния пара. В  $h_s$ -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  $u = h - pv$  (здесь необходимо обратить внимание на соответствие размерностей всех величин).

Удельная теплота в изобарном процессе равна изменению энтальпии в этом процессе, т. е.  $q_{1-2} = h_2 - h_1$ . В изотермическом процессе  $q_{1-2} = T(s_2 - s_1)$ .

В обратимом адиабатном процессе изменения состояния пара, протекающем при постоянном значении энтропии, удельная работа  $l_{1-2} = u_1 - u_2 = (h_1 - p_1 v_1) - (h_2 - p_2 v_2)$ .

Процесс дросселирования пара условно изображается линией постоянной энтальпии.

Для влажного насыщенного пара [2 – 5] – удельный объем  $v_x = v' x + v''(1-x)$ ; энтальпия  $h_x = h' + gx$ ; энтропия  $s_x = s' + gx / T_n$ ; внутренняя энергия  $u_x = h_x - p v_x$ .

### 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 основ-

ные параметры идеального газа, и неразрывным (сплошным), когда соблюдается равенство (уравнение неразрывности):

$$Gv = fc, \quad (1.25)$$

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.

По равенству (1.25) можно определять 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 сужающееся сопло. В этом случае теоретическая скорость истечения определяется по формуле, м/с [7]:

$$c_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \text{ВТ} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (1.26)$$

Для водяного пара скорость истечения определяют по выражению:

$$c_2 = 44,76 \sqrt{h_1 - h_2}, \quad (1.27)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – соответственно энтальпия, кДж/кг, пара в начале и в конце адиабатного процесса истечения, значения энтальпии определяются по  $h_s$ -диаграмме.

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 Лаваля, где скорость в выходном сечении сопла достигает сверхкритических (сверхзвуковых) значений. В этом случае скорость на выходе из сопла определяется по формулам (1.26) – (1.27), а критическая скорость в минимальном сечении для двухатомных газов – по формуле:

$$c_{кр} = 1,08\sqrt{p_1 v_1}, \quad (1.28)$$

или

$$c_{кр} = 1,08\sqrt{RT_1} \quad (1.29)$$

Для перегретого пара:

$$c_{кр} = 44,76\sqrt{h_1 - h_{кр}}, \quad (1.30)$$

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

Площадь минимального сечения Лаваля может быть определена по уравнению неразрывности потока:

$$f_{\min} = \frac{Mv_{кр}}{c_{кр}}, \quad (1.31)$$

где  $v_{кр} = v(p/p_1)^{1/k}$  – для газов.

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

### Задачи № 23 и 24

При политропном сжатии работа одноступенчатого идеального компрессора определяется по выражению [5], кДж/с:

$$L = \frac{p_1 v_1}{m-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right], \quad (1.32)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – абсолютное давление в процессах всасывания и нагнетания, кПа;  $V_1 = V_{np}$  – подача компрессора при условиях всасывания, м<sup>3</sup>/с.

Теоретическая мощность привода компрессора в  $m$  раз больше  $L$ , т. е.  
 $N_T = m \cdot L$ .

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

$$l = \frac{m}{m-1} \left[ \beta^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right], \quad (1.33)$$

где для одноступенчатого компрессора  $\beta = p_2/p_1$  для двухступенчатого  $- l = l_I + l_{II}$ .

При определении  $l_I$  и  $l_{II}$   $\beta_I = p_{\text{пром}} / p_I$ ,  $\beta_{II} = p_2 / p_{\text{пром}}$ .

### Задачи № 25 – 29

Цикл вычерчивается в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -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 по зависимостям между начальными и конечными параметрами адиабатного процесса (см. указания к задачам 1 – 11).

В задачах 26 и 27 неизвестные значения температуры в соответствующих точках процесса определяются по формуле теплоты данного процесса. В ряде точек цикла неизвестный параметр состояния рабочего тела определяется по уравнению 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)

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'}, \quad (1.34)$$

где  $h_1$  – энтальпия пара в начале адиабатного процесса расширения пара в паровом двигателе. Значение  $h_1$  определяется по  $h$ - $s$ -диаграмме по заданным начальным параметрам пара [1];



$h_2$  – энтальпия пара в конце адиабатного процесса расширения пара (точка 2 находится на пересечении линии расширения  $s_1 = \text{const}$  с изобарой  $p_2$  заданно-го давления в конденсаторе);

$h_2'$  – энтальпия кипящей жидкости (конденсата) при заданном давлении в конденсаторе.

### *Контрольная работа 2*

## ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

### 2.1. Выбор варианта

Студент выбирает номера контрольных вопросов и задач из таблицы вариантов (табл. 4) по последней цифре шифра, а недостающие числовые данные к задачам – по предпоследней цифре шифра из табл. 5 для соответствующей задачи. Шифр соответствует последним двум цифрам номера зачетной книжки студента.

Т а б л и ц а 4

Таблица вариантов

| 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<br>10<br>20         | 2<br>9<br>19 | 3<br>8<br>18 | 4<br>7<br>17 | 5<br>6<br>16 | 1<br>5<br>15 | 2<br>6<br>14 | 3<br>7<br>13 | 4<br>5<br>12 | 13<br>9<br>11 |

### 2.2. Контрольные вопросы

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 ребрять 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?

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

### 2.3. Условия задач

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  $t_1 = 20$  °С? Коэффициент теплопроводности кирпича – 0,8 Вт/(м·К).

2) Плотность теплового потока, проходящего через стенку котла,  $q$ . Стенка котла толщиной 20 мм с внутренней стороны покрыта котельной накипью с коэффициентом теплопроводности 1,0 Вт/(м·К). Определить толщину накипи и температуру поверхности стальной стенки котла под накипью, если разность в значениях температуры наружной и внутренней поверхностей стенки  $t = 50$  К. Коэффициент теплопроводности стальной стенки принять равным 50 Вт/(м·К).

3) Паропровод диаметром 160/170 мм покрыт двухслойной изоляцией. Толщина первого слоя изоляции 30 мм, второго – 50. Коэффициенты теплопро-

водности трубы и слоев изоляции соответственно таковы, Вт/(м·К):  $\lambda_1 = 50$ ,  $\lambda_2 = 0,15$ ,  $\lambda_3 = 0,08$ . Температура внутренней поверхности паропровода  $t_1^{ст} = 300$  °С. Определить температуру внешней поверхности изоляции, если линейная плотность теплового потока  $q_l$ . Определить температуру на поверхностях раздела отдельных слоев и вычертить в масштабе график изменения температуры по толщине паропровода с изоляцией.

4) Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы площади поверхности не превышали  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности под изоляцией  $t_1^{ст}$ , температура внешней поверхности изоляции  $t_2^{ст} = 50$  °С. Определить толщину изоляции для двух случаев:

а) изоляция выполнена из совелита, для которого

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

б) изоляция выполнена из асботермита, для которого

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

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 плиты  $t_{ст}$  и температура воздуха  $t_{ж} = 20$  °С.

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  $t'_{ж} = 10$  °С, а температура стенки трубы  $t_{ст}$ . Определить количество теплоты, передаваемой воде от поверхности трубы за один час.

7) По цилиндрическому каналу диаметром  $d = 14$  мм движется вода. Расход воды  $G$ , ее температура на входе  $t'$ . На каком расстоянии от входа средняя по сечению температура воды достигнет  $t''$ , если температура внутренней поверхности канала постоянна –  $t_{ст} = 100$  °С?

8) Найти количество тепла  $q_l$ , Вт/м, которое отдает излучением и конвекцией неизолированный горизонтальный паропровод диаметром  $d = 0,3$  м, температура поверхности которого  $t_{ст}$ . Степень черноты поверхности  $\varepsilon$ , а температура воздуха в помещении  $t_b = 25$  °С.

9) Определить температуру поверхности трубопровода диаметром  $d$ , если линейная плотность результирующего потока излучением от него составляет  $q_l$ , а интегральная степень черноты поверхности  $\varepsilon$ . Температура окружающего

воздуха  $t_B = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

10) Какова толщина слоя изоляции паропровода наружным диаметром  $d_2$ , если при температуре его поверхности  $t_{CT}^2$  наружная поверхность изоляции имеет температуру  $t_3^{CT}$ , равную  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности изоляции  $\lambda = 0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Температура окружающего воздуха  $t_B = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции в окружающую среду  $\alpha$ .

11) Определить потери тепла через кладку камеры сгорания толщиной  $s_{CT} = 0,4 \text{ м}$ , площадью  $F = 8 \text{ м}^2$ . Кладка выполнена в виде плоской стенки из шамотного кирпича, коэффициент теплопроводности которого  $\lambda_{CT}$ ,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , связан с температурой зависимостью:

$$\lambda_{CT} = 0,84 - 0,0006t \quad \lambda = \quad +$$

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

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

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

14) Какую температуру поверхности будет иметь нихромовая трубка электрического нагревателя наружным диаметром  $d$ , равным  $10 \text{ мм}$ , и толщиной стенки  $1 \text{ мм}$ , если по ней проходит ток  $I$ ? Трубка расположена горизонтально и охлаждается в условиях свободной конвекции воздухом с температу-

рой  $t_b$ . Теплоотдачу излучением не учитывать. Удельное электрическое сопротивление нихрома  $\rho$  считать постоянным и равным  $1,1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

15) Определить требуемые площади поверхностей прямоточного и противоточного теплообменников для охлаждения масла в количестве  $G_1 = 0,96 \text{ кг/с}$  от температуры  $t_1' = 65 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_1'' = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ . Расход охлаждающей воды  $G_2$  равен  $0,55 \text{ кг/с}$ , а ее температура на входе в теплообменник  $t_2'$ . Расчетный коэффициент теплопередачи  $k$ . Теплоемкость масла  $c_1$  равна  $2,5 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ , теплоемкость воды  $c_2 = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ . Изобразить графики изменения температуры 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  $G_2 = 1,25 \text{ кг/с}$ ; коэффициент теплопередачи  $k = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ . Схема движения теплоносителей перекрестно-точная.

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

18) Жидкость, расход которой  $G_1$  и теплоемкость  $c_1 = 3,05 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ , охлаждается в холодильнике водой от температуры  $t_1'$  до температуры  $t_1'' = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Расход охлаждающей воды  $G_2$ , теплоемкость  $c_2 = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ . Температура воды, поступающей в холодильник,  $t_2' = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить площадь теплопередающей поверхности холодильника при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей, если коэффициент теплопередачи  $k = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$ .

19) В поверхностном маслоохладителе трансформаторное масло охлаждается от  $t_1'$  до  $t_1'' = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  водой, температура которой на входе  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Расход масла и воды соответственно  $G_1$  и  $G_2$ . Определить температуру воды на выходе из мас-лоохладителя. Средняя массовая теплоемкость масла  $c_1 = 1,88 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ,

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  $t_2 = 60$  °С, расход  $G_2$ . Коэффициент теплопередачи от газов к воде  $k = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Среднюю теплоемкость газов и воды принять таковыми:  $c_1 = 1,05$  кДж/(кг·К);  $c_2 = 4,2$  кДж/(кг·К).

## 2.4. Выбор исходных данных для контрольных задач

Выбор недостающих данных осуществляется из табл. 5 для соответствующего номера задачи.

Т а б л и ц а 5

Исходные данные к задачам

| Номер задачи | Величина, единица измерения       | Предпоследняя цифра шифра |      |      |      |     |      |      |      |      |      |
|--------------|-----------------------------------|---------------------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
|              |                                   | 1                         | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    | 7    | 8    | 9    | 0    |
| 1            | 2                                 | 3                         | 4    | 5    | 6    | 7   | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
| 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 <sub>л</sub> , 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 <sub>1</sub> <sup>ст</sup> , °С | 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 <sub>ст</sub> , °С              | 100                       | 95   | 90   | 85   | 80  | 75   | 70   | 65   | 60   | 55   |
| 6            | G, кг/с                           | 1,2                       | 1,4  | 1,6  | 1,8  | 2   | 2,2  | 2,4  | 2,6  | 2,8  | 3    |
|              | t <sub>ст</sub> , °С              | 55                        | 60   | 65   | 70   | 75  | 80   | 85   | 90   | 95   | 100  |
| 7            | G, кг/ч                           | 420                       | 460  | 500  | 550  | 600 | 650  | 700  | 750  | 800  | 850  |
|              | t', °С                            | 10                        | 15   | 20   | 25   | 30  | 35   | 40   | 45   | 50   | 55   |
|              | t'', °С                           | 95                        | 85   | 90   | 85   | 80  | 75   | 80   | 85   | 90   | 95   |
| 8            | t <sub>ст</sub> , °С              | 550                       | 520  | 500  | 480  | 460 | 440  | 420  | 400  | 380  | 350  |
|              | ε                                 | 0,9                       | 0,85 | 0,8  | 0,75 | 0,7 | 0,65 | 0,6  | 0,55 | 0,5  | 0,45 |
| 9            | d, мм                             | 0,2                       | 0,25 | 0,3  | 0,35 | 0,4 | 0,38 | 0,32 | 0,28 | 0,22 | 0,18 |
|              | q <sub>л</sub> , Вт/м             | 8,9                       | 5,7  | 7,82 | 10,3 | 13  | 14,3 | 12,4 | 11,8 | 10,1 | 8    |
|              | ε                                 | 0,3                       | 0,35 | 0,4  | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,6  | 0,65 | 0,7  | 0,75 |

| 1  | 2                                   | 2    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|----|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 10 | $d_2$ , мм                          | 50   | 100  | 150  | 175  | 200  | 250  | 300  | 350  | 375  | 400  |
|    | $t_{cr2}$ , °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   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   | 27   | 28   |
| 12 | $G$ , кг/с                          | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,17 | 0,18 | 0,19 | 0,2  |
|    | $t_2^*$ , °C                        | 25   | 24   | 23   | 22   | 21   | 20   | 19   | 18   | 17   | 16   |
|    | $t_{cr}$ , °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   |
|    | $t_B$ , °C                          | 0    | 5    | 10   | 15   | 20   | 22   | 24   | 26   | 28   | 30   |
| 14 | $I$ , А                             | 55   | 52   | 50   | 48   | 46   | 44   | 42   | 40   | 37   | 35   |
|    | $t_B$ , °C                          | 0    | 5    | 10   | 15   | 20   | 22   | 24   | 26   | 28   | 30   |
| 15 | $t_2^*$ , °C                        | 10   | 15   | 20   | 25   | 28   | 30   | 35   | 38   | 40   | 35   |
|    | $k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)        | 150  | 160  | 170  | 180  | 190  | 200  | 219  | 220  | 230  | 240  |
| 16 | $G_1$ , 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 | $G_1$ , 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  |
|    | $G_2$ , кг/с                        | 0,35 | 0,37 | 0,4  | 0,42 | 0,44 | 0,46 | 0,48 | 0,5  | 0,52 | 0,54 |
| 19 | $t_1^*$ , °C                        | 100  | 95   | 90   | 85   | 80   | 75   | 70   | 65   | 70   | 75   |
|    | $G_1$ , кг/с                        | 0,32 | 0,31 | 0,30 | 0,29 | 0,28 | 0,27 | 0,26 | 0,25 | 0,24 | 0,23 |
|    | $G_2$ , 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  | 1    |
|    | $G_1$ , кг/с                        | 12   | 11   | 10   | 9,8  | 9,6  | 9,4  | 9,2  | 9    | 8,5  | 7    |
|    | $G_2$ , кг/с                        | 5,5  | 5,2  | 5,0  | 4,8  | 4,6  | 4,4  | 4,2  | 4,0  | 4,5  | 3,5  |

## 2.5. 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  $q_1$ , Вт/м, через цилиндрическую стенку при известной температуре граничных поверхностей  $t_1^{ст}$  и  $t_{n+1}^{ст}$  используются формулы, полученные на основании закона Фурье [3]:

$$q = \frac{t_1^{ст} - t_{n+1}^{ст}}{\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i}, \quad (2.1)$$

$$q_1 = \frac{2\pi(t_1^{ст} - t_{n+1}^{ст})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \quad (2.2)$$

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 стенки, Вт/(м·К).

Для расчета плотности теплового потока через плоскую стенку можно использовать следующие формулы [3, 7]:

$$q = \alpha_1 (t_1 - t_{ст1}); \quad (2.3)$$

$$q = \alpha_2 (t_{ст2} - t_2); \quad (2.4)$$

$$q = k (t_1 - t_2), \quad (2.5)$$

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  $t_2$  – температура горячей и холодной жидкостей, омывающих стенку, °С;

$t_1^{ст}$  и  $t_2^{ст}$  – температура поверхностей стенки со стороны горячей и холодной жидкостей, °С;

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



$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} . \quad (2.6)$$

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

$$t_{\text{cp}} = 0,5(t_{\text{ст}1} + t_{\text{ст}2}) . \quad (2.7)$$

#### *Задача № 5*

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи конвекцией при обтекании пластины воздухом рекомендуются следующие критериальные уравнения [7, 9]:

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

$$Nu_{\text{ж}} = 0,57 Re^{0,5\text{ж}} ; \quad (2.8)$$

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

$$Nu_{\text{ж}} = 0,032 Re_{\text{ж}}^{0,8} . \quad (2.9)$$

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

#### *Задачи № 6 и 7*

Для нахождения среднего коэффициента теплоотдачи при течении жидкости в трубах используют следующие критериальные уравнения [3, 7]:

а) при развитом турбулентном режиме течения ( $Re > 104$ ) и  $l/d > 50$ :

$$Nu_{\text{ж}} = 0,022 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} (Pr_{\text{жст}} / Pr_{\text{ж}})^{0,25} ; \quad (2.10)$$

б) при ламинарном режиме течения:

$$Nu_{\text{ж}} = 1,4(Re_{\text{ж}} \cdot d/l)^{0,4} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,38} (Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{ст}})^{0,25} . \quad (2.11)$$

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

### Задача № 8

Для нахождения коэффициента теплоотдачи конвекцией в условиях свободного движения воздуха около горизонтальной трубы следует использовать критериальное уравнение:

$$Nu_{\text{ж}} = 0,47 \cdot Gr_{\text{ж}}^{0,35} . \quad (2.12)$$

Тепловой поток излучением может быть найден по закону Стефана – Больцмана:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{t_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right] F , \quad (2.13)$$

где  $C_0 = 5,67$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площадь поверхности излучения, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – интегральная степень черноты поверхности.

Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{л}}}{(t_{\text{ст}} - t_{\text{в}})F} . \quad (2.14)$$

### Задачи № 9 – 11

См. соответствующие пояснения к задачам № 1 – 4.

### Задача № 12

Среднее значение критерия Нуссельта при поперечном обтекании газами коридорного пучка труб определяется (при  $Re > 4 \cdot 10^5$ ) по критериальному уравнению [3]:

$$Nu_{ж} = 0,177 Re_{ж}^{0,64} C_z. \quad (2.15)$$

#### Задачи № 13, 14

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

$$q_l = I^2 r_{ст} = \alpha \pi d (t_{ст} - t_{в}), \quad (2.16)$$

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 [7]

$$Q = G_1 c_1 (t_1'' - t_1') = G_2 c_2 (t_2' - t_2''). \quad (2.17)$$

и уравнения теплопередачи

$$Q = kF \Delta t_{ср}, \quad (2.18)$$

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

$c_1$  и  $c_2$  – средняя массовая теплоемкость теплоносителей в интервалах температуры соответственно  $t_1' - t_1''$  и  $t_2' - t_2''$ , кДж/(кг·К);

$t_1'$  и  $t_2'$  – температура греющего и нагреваемого теплоносителей на входе в теплообменник, °С;

$t_1''$  и  $t_2''$  – температура греющего и нагреваемого теплоносителей на выходе из теплообменника, °С;

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

$F$  – площадь теплообменной поверхности,  $\text{м}^2$ ;

$t_{\text{ср}}$  – средний температурный напор,  $^{\circ}\text{С}$ .

При прямотоке и противотоке [3]

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (2.19)$$

где  $t_{\text{б}}$  и  $t_{\text{м}}$  – соответственно наибольшая и наименьшая разность температуры теплоносителей в теплообменнике,  $^{\circ}\text{С}$ .

Если  $t_{\text{б}} / t_{\text{м}} < 1,0$ , то с достаточной для практических расчетов точностью можно определить средний температурный напор,  $^{\circ}\text{С}$ :

$$\Delta t_{\text{ср}} = 0,5 \Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}. \quad (2.20)$$

Для перекрестной схемы движения теплоносителей

$$\Delta t_{\text{ср}} = \varphi \Delta t_{\text{ср}}^{\text{пр}}, \quad (2.21)$$

где  $\Delta t^{\text{пр}}$  – средний температурный напор при противоточной схеме,  $^{\circ}\text{С}$ .

#### Библиографический список

1. Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник / А. А. Александров, Б. А. Григорьев / МЭИ. М., 2006. 164 с.
2. Баскаков А. П. Техническая термодинамика: Учебное пособие / А. П. Баскаков, Е. Ю. Павлюк / Екатеринбург: УралЮрИздат, 2010. 127 с.
3. Карминский В. Д. Техническая термодинамика и теплопередача: Курс лекций / В. Д. Карминский. М.: Маршрут, 2005. 223 с.
4. Кирillin В. А. Техническая термодинамика: Учебник / В. А. Кирillin, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин / МЭИ. М., 2008. 495 с.
5. Киселев И. Г. Теплотехника на подвижном составе железных дорог: Учебное пособие / И. Г. Киселев / УМЦ ЖДТ. М., 2008. 277 с.
6. Сборник задач по технической термодинамике: Учебное пособие / Т. Н. Андрианова, Б. В. Дзампов и др. / МЭИ. М., 2006. 354 с.
7. Термодинамика и теплопередача: Учебное пособие / В. Н. Кузнецов, В. В. Крайнов и др. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2006. 127 с.



8. Техническая термодинамика и теплотехника: Учебное пособие / Под ред. А. А. Захаровой. М.: Академия, 2006. 272 с.

9. Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен: Учебное пособие / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев / МЭИ. М., 2006. 549 с.

*Учебное издание*

ЖДАНОВ Николай Владимирович,  
КОКШАРОВ Максим Валерьевич,  
ГЛУХОВА Мария Викторовна

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»

---

Редактор Н. А. Майорова

\*\*\*

Подписано в печать . . . .2013. Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,3. Уч.-изд. л. 2,5.

Тираж 100 экз. Заказ . . . . .

\*\*

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа  
Типография ОмГУПСа

\*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35