

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**  
**Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего**  
**Профессионального Образования**  
**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»**  
**(МИИТ)**

Кафедра: «Теплоэнергетика и водоснабжение  
на железнодорожном транспорте»

## **ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ**

Задание на контрольную работу №1 с методическими указаниями  
по дисциплине для студентов-бакалавров 3 курса,  
направления: «**Строительство**»

профиля: «**Промышленное и гражданское строительство**»

## ВВЕДЕНИЕ

Контрольная работа нацелена на повышение эффективности и практической направленности обучения студентов. Выполнение контрольной работы содержит элементы исследования и способствует выработке навыков в принятии обоснованных инженерно-технических решений.

Контрольные работы проводятся для проверки степени усвоения текущего учебного материала. Учебной программой изучения дисциплины «Основы гидравлики и теплотехники» предусматривается выполнение 1 контрольной работы. Темой контрольной работы является: «Расчет трубопроводов и элементов тепловой сети».

Контрольная работа содержит решение задач по следующим разделам:

Раздел 1 «Основы гидравлики»;

Раздел 2 «Основы теплотехники».

По разделу 1 необходимо решить 5 задач, по разделу 2 необходимо решить 5 задач.

Студент выбирает задачи по таблице вариантов – соответственно последней цифре своего учебного шифра. Числовые данные к задачам (Раздел 2 «Основы термодинамики») берутся по предпоследней цифре учебного шифра – из соответствующих таблиц, приведенных в конце каждого задания.

Обучаемые в часы самостоятельной работы знакомятся с заданием, изучают рекомендованную учебную литературу.

Учебные вопросы задания отрабатываются методом самостоятельного выполнения обучаемыми расчетно-графических задач.

Контроль степени усвоения учебного материала проводится методом проверки правильности выполнения обучаемыми индивидуальных заданий (контрольной работы).

Следует учитывать, что контрольная работа может быть оформлена либо письменно на бумажном носителе, либо в электронно-цифровой форме (на диске, дискете). При представлении для рецензирования контрольной работы на электронном носителе (диске, дискете) студент обязан распечатать на бумажном носителе титульный лист установленной формы и приложить к нему диск (дискету) с содержанием работы. Титульный лист подписывается студентом, на нем производится регистрация работы. На титульном листе преподавателем проставляется отметка о допуске к защите и приводится рецензия контрольной работы.

Все отмеченные рецензентом ошибки должны быть исправлены, а сделанные указания выполнены.

К экзамену студент допускается только после получения зачета по контрольным работам.

## РАЗДЕЛ 1. «ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ»

### Задача 1.1

*Задание.*

Для приема дополнительного объема воды, получающегося в процессе ее расширения при нагревании, к системе водяного отопления в верхней ее точке присоединяют расширительные резервуары, сообщающиеся с атмосферой.

Определить необходимый объем расширительного резервуара при нагревании воды от 10 до 90°C.

Коэффициент температурного расширения воды принять равным  $\beta_t=0,00045$  1/°C. Объем воды в системе  $W$ .

| Исходные данные  | Номер варианта |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                  | 0              | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| $W, \text{ м}^3$ | 2,2            | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 |

*Методические указания к решению задачи 1.1.*

Для определения необходимого объема расширительного резервуара следует использовать формулу коэффициента температурного расширения

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{W \Delta t},$$

где  $\Delta W$  - изменение объема жидкости;

$W$  - первоначальный объем жидкости;

$\Delta t$  - изменение температуры.

### Задача 1.2

*Задание.*

Прямоугольный поворотный щит (рис. 1.2) шириной  $B=4$  м и высотой  $H$  закрывает выпускное отверстие плотины. Справа от щита уровень воды  $H_1$  слева  $H_2$ , плотность воды  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>.

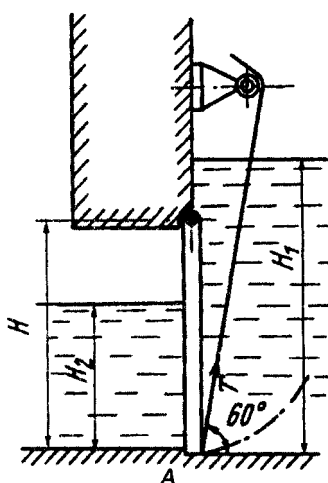


Рис. 1.2

1. Определить начальную силу  $T$  натяжения троса, не обходимую для открытия щита, если пренебречь трением в цапфах.

2. С какой силой  $P$  щит прижимается к порогу  $A$  в закрытом положении, если принять, что по боковым сторонам щита опоры отсутствуют?

3. Построить результирующую эпюру гидростатического давления на щит, предварительно построив эпюры давления на щит слева и справа.

| Исходные данные | Номер варианта |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | 0              | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| $H$ , м         | 4,5            | 3,5 | 3,0 | 4,7 | 4,0 | 3,0 | 2,5 | 3,5 | 3,0 | 4,0 |
| $H_1$ , м       | 6,0            | 5,0 | 4,0 | 5,8 | 5,2 | 3,8 | 4,2 | 4,8 | 4,5 | 5,5 |
| $H_2$ , м       | 3,2            | 2,5 | 2,0 | 3,0 | 2,8 | 1,8 | 1,5 | 2,0 | 2,2 | 1,5 |

*Методические указания к решению задачи 1.2.*

Нужно составить уравнение моментов сил, действующих на щит, относительно оси поворота щита и из него найти силу натяжения троса  $T$

$$Tl = P_1 l_1 - P_2 l_2,$$

где  $P_1$  и  $P_2$  - силы давления, действующие на щит справа и слева;  $l_1$  и  $l_2$  - плечи сил  $P_1$  и  $P_2$  относительно оси поворота щита;  $l$  - плечо силы натяжения троса.

Для определения величин  $l_1$  и  $l_2$  необходимо найти точки приложения (центры давления) сил  $P_1$  и  $P_2$ .

Плечо силы  $T$ , как катет, лежащий против угла  $30^\circ$ , составляет половину высоты отверстия плотины ( $l = H/2$ ). Величину силы  $P_A$  определяют из уравнения моментов сил относительно той же оси поворота щита

$$P_A H = P_1 l_1 - P_2 l_2.$$

### Задача 1.3

*Задание.*

На рис. 1.3 представлен водомер Вентури (участок трубы с плавным сужением потока), предназначенный для измерения расхода протекающей по трубопроводу жидкости.

Определить расход  $Q$ , если разность уровней в трубках дифференциального ртутного манометра  $h$ , диаметр трубы  $d_1$  диаметр горловины (сужения)  $d_2$ . Потерями напора в водомере пренебречь.

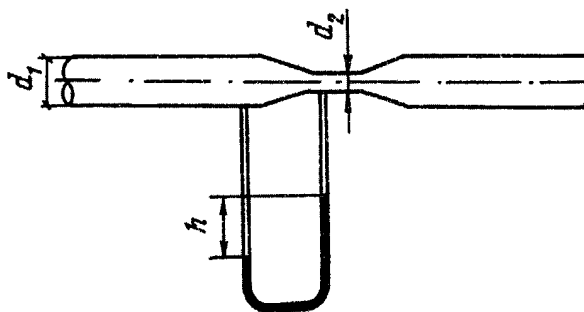


Рис. 1.3

| Исходные данные | Номер варианта |     |     |     |     |    |    |     |     |     |
|-----------------|----------------|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|
|                 | 0              | 1   | 2   | 3   | 4   | 5  | 6  | 7   | 8   | 9   |
| $D_1$ , мм      | 150            | 100 | 125 | 200 | 250 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 |
| $D_2$ , мм      | 50             | 25  | 32  | 75  | 50  | 15 | 20 | 32  | 75  | 50  |
| $h$ , см        | 10             | 15  | 12  | 8   | 20  | 10 | 12 | 16  | 9   | 18  |

*Методические указания к решению задачи 1.3.*

Следует написать уравнение Бернулли для широкого и узкого сечений водомера Вентури относительно горизонтальной плоскости сравнения, проходящей по оси трубопровода. Выразив в этом уравнении скорости в трубе  $V_1$  через скорость в горловине  $V_2$  и приняв  $\alpha_1=\alpha_2=1$ , получить из него формулу для разности пьезометрических высот в сечении 1 и 2

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma}$$

Затем, составив уравнение равновесия давлений относительно горизонтальной плоскости, проходящей через уровень ртути в левом колене дифманометра, выразить разность

пьезометрических высот  $\frac{p_1 - p_2}{\gamma}$  через показания ртутного манометра  $h$ , учитывая, что отношение удельных весов ртути и воды  $\gamma_p/\gamma_w=13,6$ , и из этого выражения получить формулу для определения искомого расхода.

**Задача 1.4**

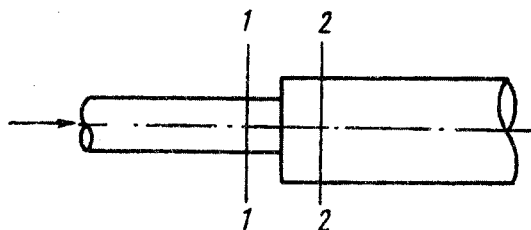
*Задание.*

Определить давление  $p_1$  в узком сечении трубопровода (рис. 1.4, сечение 1-1) при следующих условиях: давление в широкой его части равно  $p_2$ , расход воды, протекающей по трубопроводу  $Q$ , диаметры труб узкого и широкого сечений соответственно  $d_1$  и  $d_2$ .

Режим движения в трубопроводе - турбулентный.

Трубопровод горизонтален.

Удельный вес воды принять равным  $\gamma=10 \text{ кН/м}^3$ .



**Рис. 1.4**

| Исходные данные | Номер варианта |    |     |     |     |    |    |     |     |     |
|-----------------|----------------|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|
|                 | 0              | 1  | 2   | 3   | 4   | 5  | 6  | 7   | 8   | 9   |
| $p_2$ , кПа     | 50             | 60 | 80  | 20  | 30  | 45 | 40 | 70  | 80  | 100 |
| $Q$ , л/с       | 10             | 6  | 15  | 12  | 8   | 5  | 2  | 10  | 7   | 20  |
| $d_1$ , мм      | 50             | 32 | 100 | 50  | 32  | 25 | 15 | 75  | 50  | 100 |
| $d_2$ , мм      | 150            | 75 | 200 | 125 | 100 | 50 | 32 | 125 | 100 | 250 |

*Методические указания к решению задачи 1.4.*

Задача решается на основе уравнения Бернулли, составленного для сечения 1-1 и 2-2 (рис. 1.4).

Потерю напора на внезапное расширение считать равной

$$h_{1-2} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g},$$

где  $V_1$  и  $V_2$  - средние скорости движения потока в сечениях 1-1 и 2-2, которые следует предварительно определить.

### Задача 1.5

*Задание.*

Определить потери давления на длине  $l$  при движении по трубе диаметром  $d$  воды и воздуха с расходом  $Q$  при температуре  $10^\circ\text{C}$ .

Эквивалентная шероховатость трубы  $k_s = 0,1$  мм.

Как изменятся эти потери с увеличением температуры до  $80^\circ\text{C}$ ?

Плотность и вязкость воды и воздуха при указанных температурах соответственно равны:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{в}10} &= 1000 \text{ кг/м}^3; & \nu_{\text{в}10} &= 0,0131 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}; \\ \rho_{\text{возд}10} &= 1,23 \text{ кг/м}^3; & \nu_{\text{возд}10} &= 0,147 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}; \\ \rho_{\text{в}80} &= 972 \text{ кг/м}^3; & \nu_{\text{в}80} &= 0,0037 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}; \\ \rho_{\text{возд}80} &= 0,99 \text{ кг/м}^3; & \nu_{\text{возд}80} &= 0,217 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}. \end{aligned}$$

| Исходные данные | Номер варианта |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | 0              | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| $L$ , м         | 300            | 10  | 15  | 20  | 25  | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 |
| $d$ , мм        | 200            | 15  | 20  | 25  | 32  | 50  | 75  | 100 | 125 | 150 |
| $Q$ , л/с       | 100            | 0,5 | 0,8 | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 15  | 25  | 40  | 50  |

*Методические указания к решению задачи 1.5.*

Потери давления на трение по длине трубопровода следует определить по формуле Дарси

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{V^2}{2},$$

где  $V$  - средняя скорость движения потока;

$\lambda$  - коэффициент гидравлического трения, учитывающий влияние вязкости жидкости и шероховатость стенок трубы на потерю напора по длине и определяемый по различным формулам в зависимости от зоны (области) сопротивления, в которой работает трубопровод.

При ламинарном течении

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}},$$

где  $\text{Re} = \frac{Vd}{\nu}$  число Рейнольдса.

При значении критерия зоны турбулентности  $\frac{Vk_s}{\nu} \leq 10$  величину  $\lambda$  следует определять по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}.$$

При  $10 < \frac{Vk_s}{\nu} \leq 500$  величину  $\lambda$  следует определять по формуле Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{\text{Re}} + \frac{k_s}{d} \right)^{0,25}.$$

При  $\frac{Vk_s}{\nu} > 500$  величину  $\lambda$  следует определять по формуле Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{k_{\text{э}}}{d} \right)^{0,25}$$

### Задача 1.6

Задание.

Из открытого резервуара, в котором поддерживается постоянный уровень, по стальному горизонтальному трубопроводу (эквивалентная шероховатость  $k_{\text{э}}=0,1$  мм), состоящему из труб различного диаметра  $d$  и различной длины  $l$ , вытекает в атмосферу вода, расход которой  $Q$ , температура  $t^{\circ}\text{C}$  (рис. 1.6.1).

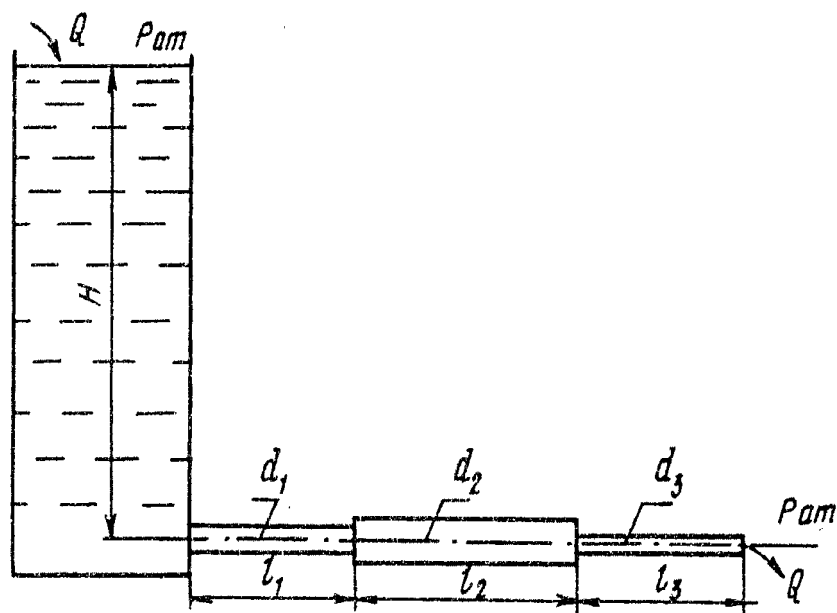


Рис. 1.5.1

Требуется:

1. Определить скорость движения воды и потери напора (по длине и местные) на каждом участке трубопровода.
2. Установить величину напора  $H$  в резервуаре.
3. Построить напорную и пьезометрическую линии.

| Исходные данные          | Номер варианта |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                          | 0              | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| $Q$ , л/с                | 0,5            | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,5 | 5,0 |
| $d_1$ , мм               | 20             | 32  | 75  | 32  | 25  | 75  | 100 | 50  | 100 | 50  |
| $d_2$ , мм               | 15             | 50  | 50  | 50  | 50  | 100 | 75  | 100 | 50  | 75  |
| $d_3$ , мм               | 20             | 32  | 25  | 25  | 75  | 50  | 50  | 50  | 100 | 100 |
| $l_1$ , м                | 1,0            | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 2,5 | 5,0 | 4,0 | 5,0 | 2,0 |
| $l_2$ , м                | 2,0            | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 5,0 | 2,5 | 4,0 | 5,0 | 4,0 |
| $l_3$ , м                | 1,0            | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 5,0 | 2,5 | 5,0 | 4,0 | 6,0 | 6,0 |
| $t$ , $^{\circ}\text{C}$ | 10             | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 40  | 30  | 20  | 10  |

Методические указания к решению задачи 1.6.

Решение задачи выполняют в следующем порядке:

1. Составляют уравнение Бернулли в общем виде для сечений 0-0 и 3-3. Сечение 0-0 совпадает со свободной поверхностью жидкости в резервуаре, сечение 3-3 - выходное сечение. При написании уравнения Бернулли следует помнить, что индексы у всех членов уравнения должны быть одинаковыми с названиями сечений, к которым они относящиеся. Например, величины, относящиеся к сечению 0-0, следует обозначить  $Z_0, p_0, \alpha_0, V_0$ .

2. Намечают горизонтальную плоскость сравнения. При горизонтальном трубопроводе в качестве таковой берут плоскость, проходящую по оси трубопровода. После этого устанавливают, чему равно каждое слагаемое, входящее в уравнение Бернулли, применительно к условиям решаемой задачи. Например,  $Z_0=H$  (искомая величина напора в резервуаре);  $p_0=p_a$  (атмосферное давление на свободной поверхности жидкости в резервуаре);  $V_0=0$  (скорость движения воды в резервуаре) и т.д.

2. После подстановки всех найденных величин в уравнение Бернулли и его преобразования записывают расчетное уравнение в буквенном выражении для определения искомой величины  $H$ .

3. Определяют скорости движения воды на каждом участке.

4. По скоростям движения воды на каждом участке вычисляют числа Рейнольдса и критерии зоны турбулентности. Значение кинематического коэффициента вязкости следует взять из Приложения 1.

По критериям зоны турбулентности устанавливают соответствующие им зоны сопротивления и вычисляют значения коэффициентов гидравлического трения  $\lambda$  на каждом участке (см. задачу 2.4).

6. Определяют потери напора по длине каждого участка ( $h_{l1}, h_{l2}, h_{l3}$ ) и в каждом местном сопротивлении (вход в трубу из резервуара  $h_{ex}$ , внезапное расширение  $h_{вр}$ , внезапное сужение  $h_{вс}$ ).

Потери напора по длине следует определить по формуле Дарси

$$h_l = \lambda \frac{l V^2}{d 2g},$$

где  $l$  - длина расчетного участка;

$\lambda$  - коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси);

$d$  - диаметр трубопровода;

$V$  - средняя скорость движения потока на рассматриваемом участке.

Потери напора в местных сопротивлениях вычисляют по формуле Вейсбаха

$$h_m = \zeta \frac{V^2}{2g},$$

где  $V$  - средняя скорость за данным сопротивлением;

$\zeta$  - безразмерный коэффициент местного сопротивления.

При вычислении потери напора на вход в трубу коэффициент местного сопротивления  $\zeta_{вх}=0,5$ . Значение коэффициента местного сопротивления при внезапном сужении трубопровода  $\zeta_{вс}$  взять в зависимости от степени сужения  $n$  (отношения площади трубы в узком сечении к площади трубы в широком сечении) из Приложения 2.

Потери напора при внезапном расширении трубопровода можно определить по формуле Борда



$$h_{\text{вп}} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g},$$

где  $V_1$ , и  $V_2$  - средние скорости течения соответственно до и после расширения.

7. После определения потерь напора по длине и в местных сопротивлениях вычисляют искомую величину - напор  $H$  в резервуаре.

8. Строят напорную линию (рис. 1.6.2). Напорная линия показывает, как изменяется

полный напор  $H = Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g}$  (полная удельная энергия) по длине потока. Значения  $H$  откладывают от осевой линии трубопровода.

При построении напорной линии нужно вертикалями выделить расчетные участки. Таких участков в данной задаче будет три. Далее в произвольно выбранном вертикальном масштабе откладывают от осевой линии величину найденного уровня жидкости в резервуаре  $H$ . Проводя по этому уровню горизонтальную линию, получают линию исходного (первоначального) напора. От уровня жидкости в резервуаре по вертикали, отвечающей сечению при входе жидкости в трубопровод, откладывают в масштабе вниз отрезок, равный потери напора при входе жидкости в трубу (потеря напора в местном сопротивлении  $h_{\text{вх}}$ ).

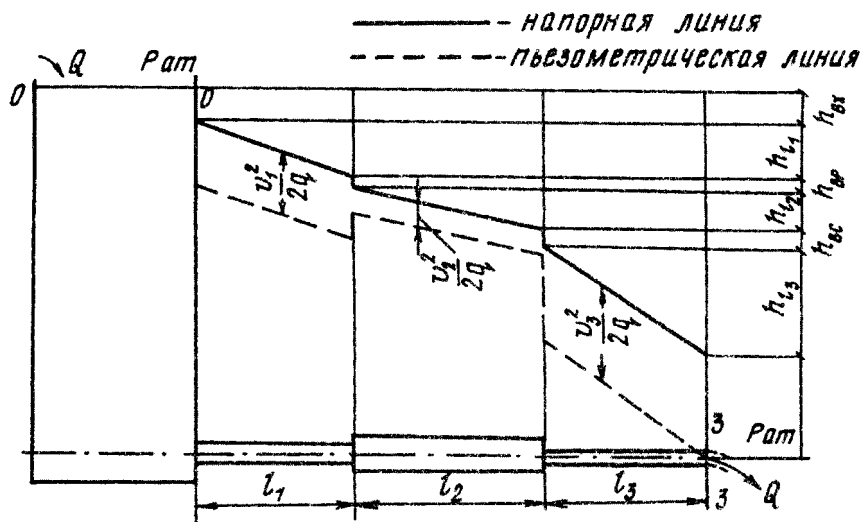


Рис. 1.5.2

На участке  $l_1$  имеет место потеря напора по длине трубопровода  $h_{l1}$ . Для получения точки, принадлежащей напорной линии в конце участка  $l_1$ , нужно от линии полного напора после входа жидкости в трубку отложить по вертикали в конце участка  $l_1$ , вниз в масштабе отрезок, соответствующий потери напора на участке  $l_1$ . Затем от точки полного напора в конце участка  $l_1$  откладывается в масштабе отрезок, соответствующий потери напора в местном сопротивлении (внезапное расширение или сужение) и так до конца трубопровода. Соединяя точки полного напора, получим напорную линию.

Пьезометрическая линия показывает, как изменяется пьезометрический напор  $Z + p/\gamma$  (удельная потенциальная энергия) по длине потока. Удельная потенциальная энергия меньше полной удельной энергии на величину удельной кинетической энергии  $\alpha V^2/(2g)$ . Поэтому, чтобы построить пьезометрическую линию, нужно вычислить на каждом участке величину  $\alpha V^2/(2g)$  и отложить ее числовое значение в масштабе вниз от напорной линии. Откладывая соответствующие значения  $\alpha V^2/(2g)$  в начале и в конце каждого участка и соединяя полученные точки, строим пьезометрическую линию.

График напорной и пьезометрической линии будет построен правильно в том случае, если при их построении были выдержаны принятые вертикальные и горизонтальные масштабы, а также верно вычислены все потери напора и все скоростные напоры  $aV^2/(2g)$ .

После построения напорной и пьезометрической линий на графике показывают все потери напора и все скоростные напоры с указанием их численных значений. Примерный вид графика приведен на рис. 1.6.2. График следует строить на миллиметровке.

## РАЗДЕЛ 2. «ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ»

### 2.1. Термодинамика

| Задания                  | Номер варианта |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                          | 1              | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 0  |
| Номера контрольных задач | 10             | 9  | 8  | 7  | 6  | 5  | 4  | 3  | 2  | 1  |
|                          | 15             | 14 | 13 | 12 | 11 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|                          | 25             | 24 | 23 | 22 | 21 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |

#### Задачи

1. В цилиндре 1 кг воздуха сжимается в одном случае по изотерме, а в другом - по политропе со средним показателем  $n = 1,2$  так, что объем уменьшается в 8 раз. Определить конечные значения температуры, давления и плотности воздуха, а также работу, изменение энтропии в процессах сжатия. Начальные параметры:  $p_1 = 750$  мм рт. ст. и  $t_1$ . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.

2. Смесь идеальных газов заданного массового состава занимает объем  $V$  при постоянном абсолютном давлении  $p$  и температуре  $t$ . Требуется определить газовую постоянную смеси, среднюю молекулярную массу, массу смеси, объемный состав смеси, а также среднюю мольную, объемную и массовую теплоемкости смеси (при  $p = \text{const}$ ) для интервала температур  $0 - t$ .

3. Смесь идеальных газов заданного массового состава (см. задачу №2) расширяется при постоянной температуре  $t = 127^\circ$  так, что отношение конечного объема к начальному равно  $V_1$ . Определить газовую постоянную, конечные параметры смеси  $p_2$  и  $V_2$ , работу расширения, количество теплоты и изменение удельной энтропии в процессе. Для смеси заданы масса  $G$  и начальное абсолютное давление  $p_1$ . Процесс изобразить в  $pV$ - и  $Ts$ -диаграммах.

4. Найти объемный состав смеси идеальных газов, заданный массовыми долями (см. задачу №2). Определить также парциальные давления компонентов смеси, если абсолютное давление смеси  $p$ .

5. В процессе политропного сжатия воздуха  $G$ , кг/с, в одноступенчатом поршневом компрессоре отводится теплота в количестве  $Q$ , кДж/с. При сжатии от начального абсолютного давления  $0,1$  МПа температура воздуха возрастает от  $15^\circ\text{C}$  до  $t_2$ . Определить показатель политропы процесса сжатия, конечное давление, удельную работу сжатия и техническую работу на получение сжатого воздуха, Дж/кг. Какова теоретически потребная мощность привода компрессора, кВт.

6. Определить показатель политропы сжатия воздуха в одноступенчатом поршневом компрессоре, если давление в процессе возрастает в  $\square$  раз, а температура газа изменяется от  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $t_2$ . Определить также теплоту процесса, работу процесса, изменение внутренней энергии и энтропии 1 кг газа.

7. Определить количество теплоты, отдаваемое каждым килограммом отработавших газов дизеля в утилизаторе, где газы при постоянном давлении охлаждаются от температуры  $t_1$  до температуры  $t_2$ . Объемный состав отработавших газов:

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

8. Диаметр цилиндров тепловозного дизеля  $D = 318$  мм, ход поршней  $S = 330$  мм, степень сжатия  $\square = 12$ . Определить теоретическую работу политропного сжатия воздуха в одном цилиндре, изменения удельных значений внутренней энергии и энтропии в процессе.

Абсолютное давление воздуха в начале сжатия  $p_1 = 95$  кПа, температура  $t_1 = 127^\circ\text{C}$ . Показатель политропы процесса сжатия  $n$ . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.

9. Воздух, имея начальную температуру  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  и абсолютное давление  $p_1$ , изотермически расширяется до давления  $p_2 = 0.1$  МПа, а затем нагревается в изохорном процессе до тех пор, пока давление вновь не станет равным  $p_1$ . Требуется определить удельный объем воздуха в конце изотермического расширения и температуру в конце изохорного подвода теплоты, а также изменения удельных значений внутренней энергии, энтальпии и энтропии в изохорном процессе. Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры. Изобразить процессы в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах.

10. 1 кг азота, имея начальную температуру  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ , расширяется при постоянном давлении  $p$ , при этом удельный объем его увеличивается в  $\square$  раз. Определить удельный объем и температуру азота в конце процесса, работу в процессе, изменения внутренней энергии и энтропии, а также подведенную теплоту. Средняя массовая теплоемкость азота имеет линейную

зависимость от температуры,  $C_{pm}^t = 1,0258 + 0,00008382 t$  кДж/кг.

11. Определить параметры состояния 1 кг воздуха в конце его адиабатного расширения от давления  $p_1$  до  $p_2 = 0,1$  МПа. Определить также работу в процессе и изменение внутренней энергии воздуха. Начальная температура  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ .

12. В установке по приготовлению дистиллированной воды для заправки системы охлаждения тепловозного дизеля насыщенный пар, имея абсолютное давление  $p_1$  и степень сухости  $x = 0.95$ , конденсируется и охлаждается до температуры  $t = 80^\circ\text{C}$  проточной водой. Какое количество воды требуется для приготовления дистиллята в сутки в количестве  $G$ , если температурный перепад проточной воды в теплообменнике установки составляет  $\Delta t_w$ ? Теплообменом рабочих тел установки с окружающей средой пренебречь.

13. В закрытом сосуде объемом  $10 \text{ м}^3$  находится влажный насыщенный водяной пар с абсолютным давлением  $p$ . В объеме пара содержится 30 кг жидкости. Определить массу парообразной фазы в сосуде и степень сухости пара.

14. Влажный насыщенный водяной пар со степенью сухости  $\chi$  перегревается при постоянном абсолютном давлении  $p$  до температуры  $t$ . На сколько градусов перегрет пар? Какое количество теплоты затрачивается на подсушку и перегрев пара?

15. 1 кг перегретого водяного пара, имея температуру  $t_1$  и энтропию  $S_1$ , охлаждается в процессе постоянного объема до состояния, когда энтальпия пара становится равной 2500 кДж/кг. Определить, состояние пара и его параметры в конце процесса, а также количество отведенной теплоты. Решение задачи иллюстрировать на  $is$ -диаграмме.

16. Влажный насыщенный водяной пар, имея начальные параметры  $t_1 = 139^\circ\text{C}$  и  $x = 0,94$ , сжимается в процессе без теплообмена с окружающей средой. При этом объем пара уменьшается в  $\square$  раз. Определить состояние и параметры пара в конце процесса сжатия, а также изменение удельной энтальпии и работу 1 кг пара в процессе, изобразить процесс в  $is$ -диаграмме.

17. Какой должна быть площадь сечения отверстия предохранительного клапана парового котла, чтобы при внезапном прекращении отбора сухого насыщенного пара из него в количестве  $G$  абсолютное давление не превысило 1,4 МПа? Атмосферное давление  $B = 750$  мм рт. ст. Потерей давления на мятие пара, теплообменом при прохождении отверстия и скоростью пара на входе в отверстие клапана пренебречь.

18. Определить основные размеры сопла Лаваля, через которое вытекает воздух в количестве 0,5 кг/с в среду с давлением 0,1 МПа. Начальные параметры газа: абсолютное давление  $p_1$  и температура  $t_1$ . Истечение считать адиабатным. Потерями энергии на трение

пренебречь. Изобразить в масштабе разрез сопла, приняв при этом угол конусности расширяющейся части равным  $10^\circ$ .

19. В дроссельном клапане парового двигателя водяной пар с начальными параметрами  $p_1$  и  $t_1$  дросселируется до давления 1 МПа, а затем адиабатно расширяется в цилиндре двигателя до давления 0,1 МПа. Определить потерю располагаемой работы пара вследствие дросселирования. Решение задачи проиллюстрировать в  $is$ -диаграмме.

20. Влажный насыщенный пар с абсолютным давлением  $p_1$  поступает в дроссельный калориметр для определения его влажности. После дросселирования до давления  $p_2 = 0.1$  МПа температура пара становится равной  $t_2$ . Какова влажность пара до дросселирования? Как возрастает удельная энтропия пара в дроссельном калориметре? Решение задачи проиллюстрировать в  $is$ -диаграмме.

21. В цилиндры двигателя внутреннего сгорания всасывается 200 кг атмосферного воздуха в час при давлении  $B = 745$  мм рт. ст., температуре  $t$  и относительной влажности  $\phi$ . Какое количество воды всасывается двигателем в час?

22. Какое количество воздуха необходимо пропустить через сушильную камеру, чтобы от материала, помещенного в нее, отвести 1 т воды? Наружный воздух при барометрическом давлении  $B = 745$  мм рт. ст., имея температуру  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  и относительную влажность  $\phi_1 = 50\%$ , в калорифере подогревается до температуры  $t_2$ , а затем воздух поступает в сушильную камеру и выходит из нее при относительной влажности  $\phi_2 = 90\%$ . Решение задачи проиллюстрировать в  $ld$ -диаграмме.

23. 1 кг газа в прямом обратимом цикле Карно совершает полезную работу  $l_0$ . Максимальное абсолютное давление воздуха 10 МПа и соответствующая абсолютная температура 1200 К. В цикле к газу подводится теплота  $q_1$ . Минимальное давление в цикле 0,1 МПа. Определить термический КПД и основные параметры во всех переходных точках цикла. Изобразить цикл в  $p\nu$  и  $Ts$ -координатах. Газовую постоянную принять  $R = 28$  Дж/кг·К.

24. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме определить степень сжатия, основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, полезную работу, подведенную и отведенную теплоту, если повышение давления в процессе сжатия  $\beta$ , а понижение температуры в процессе отвода теплоты составляет  $\Delta t$ . Рабочее тело (1 кг сухого воздуха) в начальной точке цикла имеет давление 0,1 МПа и температуру  $67^\circ\text{C}$ . Изобразить цикл в  $p\nu$  и  $Ts$ -координатах.

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

26. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты, а также степень сжатия, термический КПД и полезную работу, если заданы характеристики цикла  $\lambda$  и  $\rho$ . В начальной точке цикла  $p_1 = 0.1$  МПа и  $t_1 = 67^\circ\text{C}$ . Температура в конце адиабатного процесса сжатия рабочего тела равна  $600^\circ\text{C}$ . Рабочее тело — 1 кг сухого воздуха. Изобразить цикл в  $p\nu$  и  $Ts$ -координатах.

27. Степень повышения давления в компрессоре газотурбинной установки (ГТУ) равна  $\lambda$ ,

$$\frac{c_p}{c_u} = 1,4)$$

температура рабочего тела (для  $k = c_u$  перед соплами турбины равна  $800^\circ\text{C}$ . В идеальном

цикле ГТУ теплота подводится при постоянном давлении. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, удельную полезную работу цикла, а также изменение удельной энтропии в процессе подвода теплоты, приняв теплоемкость рабочего тела не зависящей от температуры. Начальные параметры цикла  $p_1 = 0.1$  МПа

$t_1 = 27^\circ\text{C}$ . Цикл представить в  $pV$  и  $Ts$ -координатах.

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

29. Вычислить и показать графически зависимость термического КПД Ренкина паросиловой установки от начальной температуры пара, приняв ее равной  $400, 450, 500, 550$  и  $600^\circ\text{C}$  при одинаковых значениях начального абсолютного  $p_1$  и конечного  $p_2 = 5$  кПа давления. Показать также влияние повышения начальной температуры пара в цикле на изменение степени влажности пара, выходящего из парового двигателя. Решение задачи проиллюстрировать в  $is$ -диаграмме водяного пара.

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

Числовые данные к задачам 2.1. Термодинамика

| Задача              | Величина                 | Предпоследняя цифра учебного шифра |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|---------------------|--------------------------|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
|                     |                          | 1                                  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 0   |
| 1                   | $\varepsilon$            | 8                                  | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17  |
|                     | $t, \text{C}^\circ$      | 47                                 | 40   | 37   | 30   | 27   | 20   | 17   | 10   | 7    | 0   |
| 2                   | Массовый состав смеси, % |                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |     |
|                     | $\text{CO}_2$            | 18                                 | 14   | 10   | 17   | 10   | 10   | 12   | 16   | 13   | 18  |
|                     | $\text{H}_2\text{O}$     | 1                                  | 15   | 6    | 5    | 4    | 7    | 14   | 7    | 12   | 10  |
|                     | $\text{N}_2$             | 65                                 | 45   | 76   | 70   | 80   | 60   | 47   | 62   | 54   | 46  |
|                     | $\text{O}_2$             | 16                                 | 26   | 8    | 8    | 6    | 18   | 27   | 15   | 21   | 26  |
|                     | $V, \text{м}^3$          | 2                                  | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11  |
|                     | $p, \text{МПа}$          | 1,0                                | 0,9  | 0,8  | 0,7  | 0,6  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 1,0 |
| $t, \text{C}^\circ$ | 200                      | 300                                | 400  | 500  | 600  | 600  | 500  | 400  | 300  | 200  |     |
| 3                   | $\varepsilon$            | 6                                  | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15  |
|                     | $G, \text{кг}$           | 20                                 | 19   | 18   | 17   | 16   | 15   | 14   | 13   | 12   | 10  |
|                     | $p, \text{МПа}$          | 0,6                                | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  | 1,5 |
| 4                   | $p, \text{МПа}$          | 0,1                                | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1,0 |
| 5                   | $10^3 G, \text{кг/с}$    | 60                                 | 61   | 62   | 63   | 64   | 65   | 66   | 67   | 68   | 69  |
|                     | $Q, \text{кДж/с}$        | 1,25                               | 1,3  | 1,35 | 1,4  | 1,45 | 1,5  | 1,55 | 1,6  | 1,65 | 1,7 |
|                     | $t_2, \text{C}^\circ$    | 120                                | 115  | 110  | 105  | 100  | 95   | 90   | 85   | 80   | 75  |
| 6                   | $\beta$                  | 3                                  | 3,5  | 4    | 4,5  | 5    | 5,5  | 6    | 6,5  | 7    | 7,5 |
|                     | $t_2, \text{C}^\circ$    | 75                                 | 80   | 85   | 90   | 95   | 100  | 105  | 110  | 115  | 120 |
| 7                   | $t_1, \text{C}^\circ$    | 410                                | 420  | 430  | 440  | 450  | 460  | 470  | 480  | 490  | 500 |
|                     | $t_2, \text{C}^\circ$    | 230                                | 235  | 240  | 245  | 250  | 260  | 270  | 280  | 290  | 300 |
| 8                   | $n$                      | 1,22                               | 1,24 | 1,26 | 1,28 | 1,3  | 1,29 | 1,27 | 1,25 | 1,23 | 1,2 |

|    |                             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 9  | $p_1$ , МПа                 | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  |
| 10 | $p$ , МПа                   | 7    | 6    | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    | 0,8  | 0,6  | 0,5  |
|    | $\varepsilon$               | 2    | 2,2  | 2,4  | 2,5  | 2,6  | 2,7  | 2,8  | 2,9  | 3,0  | 3,1  |
| 11 | $p_1$ , МПа                 | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1    | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,5  |
| 12 | $p$ , МПа                   | 0,22 | 0,24 | 0,25 | 0,26 | 0,28 | 0,3  | 0,32 | 0,34 | 0,35 | 0,4  |
|    | $G$ , т/сут                 | 0,5  | 1    | 1,5  | 2    | 2,5  | 3    | 3,5  | 4    | 4,5  | 5    |
|    | $\Delta t_w$ , К            | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 26   | 28   |
| 13 | $p$ , МПа                   | 1    | 1,2  | 1,4  | 1,6  | 1,8  | 2    | 2,2  | 2,4  | 2,6  | 2,8  |
| 14 | $x$                         | 0,91 | 0,9  | 0,92 | 0,94 | 0,96 | 0,98 | 0,96 | 0,94 | 0,92 | 0,9  |
|    | $p$ , МПа                   | 1    | 1,5  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 7    | 10   |
|    | $t$ , °С                    | 400  | 420  | 440  | 460  | 480  | 500  | 520  | 540  | 560  | 580  |
| 15 | $t_1$ , °С                  | 270  | 480  | 290  | 320  | 400  | 530  | 420  | 500  | 520  | 560  |
|    | $s_1$ , кДж/(кг·К)          | 7,7  | 8,2  | 7,4  | 7,5  | 7,7  | 8    | 7,3  | 7,5  | 6,7  | 7,3  |
| 16 | $\varepsilon$               | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 12   | 13   | 14   | 15   |
| 17 | $G$ , кг/с                  | 0,7  | 1,1  | 1,8  | 2,8  | 5,5  | 0,6  | 1,0  | 1,7  | 2,5  | 5    |
| 18 | $p_1$ , МПа                 | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 1    | 1,1  | 1,2  | 1    |
|    | $t_1$ , °С                  | 200  | 220  | 240  | 260  | 280  | 300  | 320  | 340  | 460  | 480  |
| 19 | $p_1$ , МПа                 | 5    | 5    | 4    | 4    | 3,5  | 3,5  | 3    | 3    | 2    | 2    |
|    | $t_1$ , °С                  | 300  | 350  | 400  | 350  | 300  | 350  | 400  | 350  | 300  | 400  |
| 20 | $p_1$ , МПа                 | 1,6  | 1,2  | 1,3  | 1,4  | 2,0  | 1,5  | 1,0  | 0,8  | 0,7  | 0,6  |
|    | $t_2$ , °С                  | 140  | 131  | 121  | 115  | 110  | 118  | 120  | 125  | 122  | 110  |
| 21 | $t_2$ , °С                  | 12   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 26   | 28   |
|    | $\varphi$ , °С              | 90   | 85   | 80   | 75   | 70   | 65   | 60   | 55   | 50   | 45   |
| 22 | $T_2$ , °С                  | 60   | 62   | 64   | 66   | 68   | 70   | 72   | 74   | 76   | 80   |
| 23 | $q_1$ , кДж/кг              | 30   | 31   | 32   | 33   | 34   | 35   | 34   | 33   | 32   | 30   |
|    | $l_1$ , кДж/кг              | 20   | 20   | 20   | 22   | 24   | 25   | 26   | 23   | 22   | 21   |
| 24 | $B$                         | 12   | 12,5 | 13   | 13,5 | 14   | 14,5 | 1,5  | 15,5 | 16   | 16,5 |
|    | $\Delta t$ , К              | 300  | 310  | 320  | 330  | 340  | 350  | 360  | 370  | 380  | 390  |
| 25 | $Q_1$ , кДж / кг            | 1000 | 950  | 900  | 850  | 800  | 750  | 700  | 650  | 650  | 600  |
|    | $\varepsilon$               | 12   | 12,5 | 13   | 13,5 | 14   | 14,5 | 15   | 15,5 | 16   | 16,5 |
| 26 | $\lambda$                   | 2,2  | 2,1  | 2,0  | 1,9  | 1,8  | 1,7  | 1,6  | 1,5  | 1,4  | 1,3  |
|    | $\rho$                      | 1,2  | 1,25 | 1,3  | 1,35 | 1,4  | 1,45 | 1,5  | 1,5  | 1,5  | 1,5  |
| 27 | $\lambda$                   | 6    | 6,2  | 6,4  | 6,6  | 6,8  | 7    | 7,2  | 7,4  | 7,6  | 7,8  |
| 28 | $V_1$ , м <sup>3</sup> /мин | 3    | 3,5  | 4    | 4,5  | 5    | 5,5  | 6    | 6,5  | 7    | 7,5  |
|    | $p_2$ , бар                 | 7    | 6,5  | 6    | 5,5  | 5    | 4,8  | 4,6  | 4,4  | 4,2  | 4    |
| 29 | $P_1$ бар                   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  | 120  |
| 30 | $p_1$ , бар                 | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  |
|    | $t_1$ , °С                  | 400  | 420  | 440  | 460  | 480  | 500  | 520  | 540  | 560  | 580  |
|    | $p_2$ , бар                 | 10   | 10   | 10   | 15   | 15   | 20   | 20   | 30   | 40   | 500  |

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ТЕРМОДИНАМИКИ

## Задачи 1-11

Задачи составлены по следующим разделам технической термодинамики: уравнение состояния идеального газа, смесь идеальных газов, теплоемкость, первый закон термодинамики и основные термодинамические процессы.

При решении этих задач могут быть использованы следующие формулы и выражения.

Уравнения состояния идеального газа:

$$pV = RT \text{ (для 1 кг газа), или } pV = GRT \text{ ( для } G \text{ кг газа ),}$$

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

$\mu$  - масса 1 кмоль газа, кг (численно равна молекулярной массе газа).

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

через объемные доли

$$\mu_{см} = \sum_1^n r_i \mu_i,$$

через массовые доли

$$\mu_{см} = 1/\sum m_i/\mu_i,$$

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

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

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

Формулы пересчета состава смеси:

$$r_i = m_i \mu_{см} / \mu_i; \quad m_i = r_i \mu_i / \mu_{см}.$$

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

$$R = \sum_1^n m_i R_i$$

или через среднюю молекулярную массу смеси:

$$R = 8314 / \mu_{см} \text{ Дж / (кгК).}$$

Для определения парциального давления отдельного компонента  $p_i$ , входящего в смесь, служат формулы

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

где  $p$  - общее давление смеси газов;

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

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = \frac{c'}{\rho_0} \quad \text{и} \quad c' = \frac{\mu c}{22.4} = c \rho_0$$

где  $\mu$  — молекулярная масса газа;  $\rho_0$  — плотность газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>. Теплоемкости являются функциями термодинамического процесса.



Разность массовых теплоемкостей при постоянном давлении  $c_p$  и постоянном объеме  $c_v$  равна газовой постоянной:

$$c_p - c_v = R$$

Отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме (показатель адиабаты) обозначают буквой  $k$ , т. е.

$$K = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = \frac{c_p}{c_v}.$$

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

Теплоемкость газа зависит от его температуры. В приближенных расчетах часто пренебрегают этой зависимостью, т.е. теплоемкость газов одинаковой атомности считают величиной постоянной.

Ниже приведены примерные значения молярных теплоемкостей и показателя адиабаты газов.

| 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 многоатомны | 29,31                       | 37,68     | 1,29 |

Зависимость теплоемкости газов от температуры имеет нелинейный характер. В прил.1 приведены средние теплоемкости некоторых газов в пределах от  $0^\circ \text{C}$  до  $t$ . При пользовании этой таблицей в необходимых случаях проводится интерполяция.

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

объемная теплоемкость  $c'_{cm} = \sum_1^n r_i c'_i$ , и молярная теплоемкость  $\mu c_{cm} = \sum_1^n r_i \mu c_i$

Для нахождения, например, средней теплоемкости в интервале температур  $t_1$  до  $t_2$  надо из соответствующей таблицы взять теплоемкость — соответственно в пределах  $0^\circ - t_1$  и  $0^\circ - t_2$  и по выражению

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

Если в процессе участвуют  $G$  кг вещества, то количество теплоты в соответствующем процессе  $Q = G(c_{m2}t_2 - c_{m1}t_1)$ .

В  $p_v$  - диаграмме линия, изображающая политропный процесс, имеет уравнение  $p v^n = \text{const}$ , где  $n$  — показатель политропы. Связь между основными параметрами рабочего тела в политропном процессе выражается следующими формулами:

$$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n; \quad T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1}; \quad T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{n-1}{n}}$$

Для адиабатного процесса в этих формулах показатель  $n$  заменяется показателем  $k = c_p/c_v$ .

Изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии не зависит от характера процесса и при постоянной теплоемкости для 1 кг идеального газа подсчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} u_2 - u_1 &= c_v (t_2 - t_1); \\ i_2 - i_1 &= c_p (t_2 - t_1); \\ S_2 - S_1 &= c \ln (T_2/T_1); \end{aligned}$$

В последнем выражении  $c$  — теплоемкость газа в соответствующем процессе. Для политропного процесса

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

Удельная работа в политропном процессе, Дж/кг,

$$l = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2)$$

или

$$l = \frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

Для адиабатного процесса:  $n = k$ , для изобарного процесса:  $n = 0$ .

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

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

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

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

Изменение удельной энтропии в изотермическом процессе, Дж/кг·К

$$S_2 - S_1 = R \ln v_2/v_1$$

Следует помнить, что  $T \text{ } ^\circ\text{K} = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15$

### Задачи 12-13

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

В задаче 13 по заданному давлению надо в соответствующей таблице насыщенного пара найти значения удельных объемов кипящей жидкости  $v'$  и пара  $v''$ . Объем жидкости в сосуде  $V_{ж} = G_{ж} v'$ . Масса парообразной фазы  $G_n = V_n/v''$ .

### Задачи 14-16

Задачи решаются при помощи  $i$ -диаграммы водяного пара, практическая часть которой состоит из двух областей. Ниже пограничной кривой сухого насыщенного пара (степень сухости  $x = 1$ ) будет область влажного насыщенного пара ( $0 < x < 1$ ), выше — область перегретого пара. Поэтому, когда в задаче требуется определить состояние пара, то нужно показать, в какой области диаграммы находится точка данного состояния пара. В  $i$ -диаграмме в области влажного пара соответствующие изобара и изотерма совпадают и изображаются одной линией, так как в этой области определенному давлению соответствует определенная температура насыщения. В области перегретого пара изотермы отклоняются от изобар вправо, асимптотически приближаясь к горизонтальной линии.

Удельная внутренняя энергия пара  $u = i - pv$  (здесь необходимо обратить внимание на соответствие размерностей всех величин).

Удельная теплота в изобарном процессе равна изменению энтальпии в этом процессе, т.е.  $q = i_2 - i_1$ .

В обратимом адиабатном процессе изменения состояния пара, протекающем при постоянном значении энтропии, удельная работа процесса

$$l = u_1 - u_2 = (i_1 - p_1 v_1) - (i_2 - p_2 v_2).$$

## Задачи 17-20

Задачи составлены на процессы истечения и дросселирования газов и паров. Процесс истечения принимается без теплообмена, т.е. адиабатным, для которого в указаниях к задачам 1-11 приведены формулы, связывающие основные параметры идеального газа, и неразрывным (сплошным), когда соблюдается равенство (уравнение неразрывности).

$$G v = f c$$

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

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

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

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

В этой формуле величины  $p$  и  $v$  имеют соответственно следующие единицы измерения: Па, м<sup>3</sup>/кг.

Для водяного пара скорость истечения определяют по формуле

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

где  $i_1$  и  $i_2$  - соответственно энтальпии, кДж/кг, пара в начале и конце адиабатного процесса истечения, определяемые по  $i$ s-диаграмме.

Критическое отношение давлений  $(p_2/p_1)_{кр}$  для двухатомных газов, в том числе для воздуха ( $k=1,4$ ), равно 0,528, а для перегретого водяного пара — 0,546.

Если истечение происходит при  $(p_2/p_1) < (p_2/p_1)_{кр}$ , то применяют расширяющееся сопло Лавая, где скорость в выходном сечении сопла достигает сверхкритических (сверхзвуковых) значений. В этом случае скорость на выходе из сопла определяется по приведенной выше формуле, а критическая скорость в минимальном сечении для двухатомных газов — по формуле

$$c_{кр} = 1,08 \sqrt{p_1 v_1}, \text{ или } c_{кр} = 1,08 \sqrt{RT_1}.$$

Для перегретого пара

$$c_{кр} = 44,76 \sqrt{i_1 - i_{кр}}$$

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

Площадь минимального сечения сопла Лавая может быть определена из уравнения неразрывности потока

$$f_{\min} = \frac{M v_{кр}}{c_{кр}}$$

где  $v_{кр} = v_1 (p_1/p_{кр})^{1/k}$  для газов. Для водяного пара величина  $v_{кр}$  может быть определена по  $i$ s-диаграмме.

Так как в процессе адиабатного дросселирования газа его энтальпия не изменяется, то линия, изображающая условно этот процесс в  $i$ s-диаграмме, будет параллельна оси  $s$ .

## Задачи 21-22

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

### Задачи 23-27

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

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

В задаче 25 неизвестное значение температуры в соответствующей точке процесса определяется из формулы теплоты данного процесса. В ряде точек цикла неизвестный параметр состояния рабочего тела находится из уравнения состояния идеального газа. Если в данной задаче определены термический КПД  $\eta_t$  и удельная полезная работа  $l_o$ , то удельное количество подведенной теплоты в цикле  $q_1 = \eta_t l_o$ , а отведенной  $q_2 = q_1 - l_o$ .

### Задача 28

Если объем всасываемого газа —  $V_1$ , м<sup>3</sup>/с, то теоретическая секундная работа (мощность) процесса политропного сжатия

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

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

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

$$L = p^1 V^1 \ln (p^2/p^1).$$

### Задачи 29 и 30

Термический КПД теоретического паросилового цикла (цикла Ренкина)

$$\eta_1 = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'}$$

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

$i_2$  - энтальпия пара в конце адиабатного процесса расширения пара в паровом двигателе (точка 2 находится на пересечении линии расширения  $S_1 = \text{const}$  с изобарой  $p_2$  заданного давления в конденсаторе, рис.);

$i_2'$  –энтальпия кипящей жидкости (конденсата) при заданном давлении в конденсаторе. Значение  $i_2'$  берется из табл. 2 приложения.

Процесс дросселирования пара условно изображают линией постоянной энтальпии.

## 2.2. Теплопередача

| Задания                  | Номер варианта |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                          | 1              | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 0  |
| Номера контрольных задач | 1              | 3  | 5  | 7  | 9  | 10 | 8  | 6  | 4  | 2  |
|                          | 20             | 18 | 16 | 14 | 12 | 19 | 17 | 15 | 13 | 11 |
|                          | 29             | 28 | 26 | 24 | 22 | 29 | 27 | 25 | 23 | 21 |
|                          | 30             | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |

### Задачи

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

2. По стальному паропроводу с внутренним диаметром  $d_1$  и толщиной стенки  $\delta_1 = 8$  мм протекает перегретый пар с температурой  $t_1$ . Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной  $\delta_2$ , коэффициент теплопроводности которой  $\lambda_2 = 0,1$  Вт/(м·К). Температура окружающего воздуха  $t_2 = 25^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи со стороны пара и окружающего воздуха соответственно равны:  $\alpha_1 = 250$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $\alpha_2 = 12$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить потери тепла  $q_1$  на 1 пог.м паропровода, а также температуру наружной поверхности изоляции. Коэффициент теплопроводности стали  $\lambda_1$  принять равным 35 Вт/(м·К).

3. Коэффициент теплопередачи через наружное ограждение (стену) помещения  $k$ , коэффициент теплоотдачи от воздуха внутри помещения к поверхности стены  $\alpha_1$ . Определить, на сколько градусов изменится температура внутренней поверхности стены, если температура наружного воздуха понизится на  $25^\circ\text{C}$ , а температура воздуха внутри помещения уменьшится на  $5^\circ\text{C}$ .

4. Теплопровод покрыт двумя слоями изоляции, имеющими одинаковую толщину  $\delta$ . Средний диаметр второго слоя  $d_{m2}$  в  $n$  раз больше среднего диаметра первого слоя  $d_{m1}$ , а коэффициент теплопроводности изоляции второго слоя в  $n$  раз меньше коэффициента теплопроводности первого слоя. На сколько процентов изменится потеря тепла (линейная плотность теплового потока  $q_1$ , Вт/пог.м), если при неизменных температурах наружной и внутренней поверхности слои изоляции поменять местами?

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

6. По стальному неизолированному трубопроводу диаметром 80 x 5 мм течет холодильный агент, температура которого  $t_2 = -20^\circ\text{C}$ . Температура воздуха в помещении, где

проходит трубопровод,  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха  $\alpha_1 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{-К})$ , со стороны холодильного агента  $\alpha_2 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{-К})$ . На сколько процентов снизится потеря холода, если трубопровод покрыть слоем изоляции с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2$  толщиной  $\delta_2$ ?

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

Температура газов в камере сгорания  $t_1$ , температура холодного воздуха  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи со стороны газов и воздуха соответственно  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

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

9. Плоская стальная стенка толщиной  $\delta_{\text{ст}} = 10 \text{ мм}$  омывается с одной стороны дымовыми газами с температурой  $t_1 = 950^\circ\text{C}$ , а с другой стороны — водой с температурой  $t_2 = 250^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопередачи со стороны газов и со стороны воды соответственно  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Коэффициент теплопроводности материала стенки  $\lambda_{\text{ст}} = 50 \text{ Вт}/(\text{м-К})$ . Определить плотность теплового потока через стенку и температуру ее поверхностей со стороны газов и воды для случая чистой стенки, а также для случая, когда она покрыта слоем накипи с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{\text{н}} = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м-К})$  толщиной  $\delta_{\text{н}}$ . Для обоих случаев показать графически распределение температуры по толщине стенки.

10. Голый металлический провод диаметром  $d = 4 \text{ мм}$  имеет температуру поверхности  $t^{\text{cm}} = 95^\circ\text{C}$ . Активное электрическое сопротивление провода  $r = 4 \cdot 10^3 \text{ Ом}/\text{м}$ . Коэффициент теплоотдачи от поверхности провода к окружающему воздуху  $\alpha$ . Температура воздуха  $t_{\text{в}}$ . Какой будет температура поверхности этого провода  $t_{\text{ст}}$  под слоем изоляции толщиной  $\delta = 3 \text{ мм}$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  при неизменном токе и прочих равных условиях? Определить также максимальное значение тока в изолированном проводе, если первоначальную температуру провода считать предельно допустимой. Дайте объяснение полученным результатам.

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

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

13. По трубе с внутренним диаметром  $d = 50 \text{ мм}$  течет вода со средней скоростью  $w$ . Средняя температура воды  $t_{\text{ж}}$ , температура стенки трубы  $t_{\text{ст}}$  постоянна. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи и количество передаваемого в единицу времени тепла (линейную плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}$ ), если относительная длина трубы  $l/d = 100$ .

14. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании пучка коридорно расположенных труб диаметром  $d = 20 \text{ мм}$ , если средняя определяющая

скорость воздуха в пучке  $w$ , средняя температура воздуха  $t_e$ . Какова средняя линейная плотность теплового потока в пучке  $q_l$ , если температура поверхности трубы  $t'_s$  постоянна и равна  $200^\circ\text{C}$ ? Поправкой на число рядов труб пренебречь.

15. По трубе диаметром  $d = 40$  мм движется воздух при давлении  $p = 0,1$  МПа. Расход воздуха  $G$ , температура воздуха на входе  $t'_s$ . Какой должна быть длина трубы, имеющей температуру стенки  $t_{ct} = 100^\circ\text{C}$ , чтобы температура воздуха на выходе была  $t''_s$ ?

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

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

18. Горизонтальный трубопровод с наружным диаметром  $d = 0,25$  м, длиной  $l = 20$  м имеет температуру поверхности  $t_{ct}$ , степень черноты поверхности  $\varepsilon_1 = 0,72$ . Определить количество тепла, которое отдает трубопровод в окружающую среду излучением и конвекцией, кВт (в условиях свободного движения воздуха), если температура воздуха  $t_b = 23^\circ\text{C}$ . Как изменится суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением (отношение суммарного удельного теплового потока к разности температур поверхности и среды), если при прочих неизменных условиях путем специального покрытия уменьшить степень черноты поверхности до  $\varepsilon_2$ ?

19. Трубопровод диаметром  $d_1 = 150$  мм, имеющий температуру поверхности  $t_1$  и степень черноты  $\varepsilon = 0,75$ , окружен цилиндрическим экраном диаметром  $d_2$ , обе поверхности которого имеют степень черноты  $\varepsilon_2$ . Определить потери тепла излучением на 1 пог. м трубопровода при температуре окружающей среды  $t_2 = 27^\circ\text{C}$ , приняв ее поглощательную способность равной единице. На сколько процентов будут больше указанные потери при тех же условиях для трубопровода без экрана?

20. Для измерения температуры движущегося с относительно небольшой скоростью горячего воздуха в канале установлена термопара, показания которой  $t_T$ . Какова действительная температура воздуха, если коэффициент теплоотдачи от потока воздуха к спаю  $\alpha$ , степень черноты спаю  $\varepsilon = 0,82$ , а температура стенок канала  $t_{ct}$ ?

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

22. Определить расход греющего пара и требуемую площадь теплообменной поверхности пароводяного подогревателя для подогрева  $G_w$  воды  $t_w = 10^\circ\text{C}$  до  $t''_w = 80^\circ\text{C}$ . Давление греющего пара  $p$ , степень сухости  $x$ . Поверхность нагрева теплообменника состоит из стальных труб:  $d_H = 30$  мм;  $d_{вн} = 24$  мм;  $\lambda = 50$  Вт/(м·К). Коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к стене  $\alpha_1 = 6000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), от стенки к воде  $\alpha_2 = 5500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Температуру конденсата на выходе из теплообменника принять равной температуре насыщения, соответствующей давлению  $p$ . Тепловыми потерями пренебречь.

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

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

расход охлаждаемого масла  $C_m = 20$  кг/с;

расход охлаждаемой воды  $G_w = 30$  кг/с;

температура воды на входе в холодильник  $t'_w$ ;  
температура масла на входе в холодильник  $t'_m = 85^\circ\text{C}$ ;  
коэффициент теплопередачи  $k$ ;  
удельная теплоемкость масла  $C_m = 2,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

Схема движения теплоносителей противоточная.

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

- температура воздуха на входе в охладитель  $t'_b = 115^\circ\text{C}$ ;
- температура воздуха на выходе из охладителя  $t''_b = 65^\circ\text{C}$ ;
- расход воздуха  $G_B$ ;
- температура охлаждающей воды на входе в охладитель  $t'_w$ ;
- расход охлаждающей воды  $G_w = 1,25 \text{ кг/с}$ ;
- коэффициент теплопередачи  $k = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

Схемы движения теплоносителей:

- а) противоточная;
- б) прямоточная.

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

- а) на входе в теплообменник  $t''_1 = 200^\circ\text{C}$ ,  $t'_1 = 20^\circ\text{C}$ ;
- б) на выходе из теплообменника  $t''_1, t''_2$ .

Расход греющего теплоносителя  $G_1$ , теплоемкость  $c_1 = 4,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . Площадь теплообменной поверхности теплообменника  $F = 25 \text{ м}^2$ . Определить средний коэффициент теплопередачи  $k$  при заданной схеме движения теплоносителей. На сколько процентов увеличится количество передаваемого тепла, если при неизменных температурах теплоносителей на входе в теплообменник его площадь поверхности теплообмена будет в два раза больше, т.е.  $50 \text{ м}^2$ ? Значение коэффициента теплопередачи считать неизменным.

26. Определить плотность теплового потока через плоскую стенку нагревательной печи, состоящую из двух слоев кладки: шамотного кирпича толщиной  $\delta_1 = 0,56 \text{ м}$  и диамитового кирпича  $\delta_2 = 0,24 \text{ м}$ , если температура внутренней поверхности кладки равна  $t''_1$ , а температура наружного воздуха  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности внутреннего слоя кладки  $\lambda_1 = 0,95 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , наружного слоя  $\lambda_2 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Коэффициент теплоотдачи конвекцией со стороны наружной поверхности  $\alpha_k = 8,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , а ее степень черноты  $\varepsilon$ .

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

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

(Теплоотдачу пластин не учитывать).

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

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

$$\alpha_k = 2,75(t_{ст} - t_b)^{0,25}$$



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

29. В трубчатом калорифере воздух нагревается насыщенным водяным паром давлением  $P=0,1$ Мпа. Температура воздуха на входе  $t'_в = 20^0$ С. Площадь теплообменной поверхности  $F = 1$ м<sup>2</sup>. Определить температуру воздуха на выходе из калорифера  $t''_в$ , если его расход составляет  $G_в = 0,1$ кг/с, а коэффициент теплопередачи равен  $k, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

### Числовые данные к задачам 2.1. Теплопередача

| Задача | Величина                                   | Предпоследняя цифра учебного шифра |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|--|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|        |  | 1                                  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 0    |
| 1      | $t^1, ^\circ\text{C}$                      | 30                                 | 29   | 23   | 27   | 26   | 25   | 24   | 23   | 22   | 21   |
|        | $t^3, ^\circ\text{C}$                      | -8                                 | -7   | -6   | -5   | -4   | -3   | -2   | -1   | 0    | 0    |
| 2      | $d_1, \text{мм}$                           | 250                                | 240  | 230  | 220  | 210  | 200  | 190  | 180  | 170  | 160  |
|        | $\delta_2, \text{мм}$                      | 150                                | 140  | 130  | 120  | 110  | 100  | 90   | 80   | 70   | 60   |
|        | $t_1, ^\circ\text{C}$                      | 450                                | 440  | 430  | 420  | 410  | 400  | 350  | 300  | 250  | 200  |
| 3      | $k, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$          | 0,80                               | 0,90 | 0,94 | 1,00 | 1,20 | 1,24 | 1,30 | 1,34 | 1,40 | 1,60 |
|        | $\alpha_1, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$   | 6,9                                | 7,2  | 7,6  | 8,0  | 9,6  | 10,0 | 10,4 | 10,8 | 11,2 | 12,5 |
| 4      | $n$  | 1,4                                | 1,5  | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2,0  | 2,1  | 2,2  | 2,3  |
| 5      | $t^1, ^\circ\text{C}$                      | 5                                  | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   |
|        | $\delta_{ст}, \text{м}$                    | 0,37                               | 0,41 | 0,40 | 0,50 | 0,39 | 0,42 | 0,48 | 0,61 | 0,70 | 0,92 |
|        | $\lambda_{ст}, \text{Вт/м} \cdot \text{К}$ | 1,10                               | 1,04 | 0,87 | 0,92 | 0,58 | 0,50 | 0,44 | 0,40 | 0,30 | 0,19 |
| 6      | $\lambda_2, \text{Вт/м} \cdot \text{К}$    | 0,05                               | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,14 |
|        | $\delta_2, \text{мм}$                      | 50                                 | 55   | 60   | 65   | 70   | 75   | 80   | 85   | 90   | 95   |
| 7      | $t_1, ^\circ\text{C}$                      | 1400                               | 1350 | 1300 | 1250 | 1200 | 1150 | 1100 | 1050 | 1000 | 950  |
|        | $\alpha_1, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$   | 50                                 | 55   | 60   | 65   | 70   | 75   | 80   | 85   | 90   | 100  |
|        | $\alpha_2, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$   | 28                                 | 27   | 26   | 25   | 24   | 23   | 22   | 21   | 20   | 19   |
| 8      | $t^1, ^\circ\text{C}$                      | 150                                | 200  | 250  | 275  | 300  | 325  | 350  | 400  | 450  | 500  |
|        | $d_2, \text{мм}$                           | 250                                | 275  | 300  | 325  | 350  | 400  | 450  | 500  | 550  | 600  |
| 9      | $\alpha_1, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$   | 80                                 | 75   | 70   | 65   | 60   | 55   | 50   | 45   | 40   | 35   |
|        | $\alpha_2, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$   | 2800                               | 2750 | 2700 | 2650 | 2600 | 2550 | 2500 | 2450 | 2400 | 2350 |
|        | $\delta_н, \text{мм}$                      | 2                                  | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 6    | 5    | 4    |
| 10     | $t_в, ^\circ\text{C}$                      | 12                                 | 14   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 26   | 28   | 30   |
|        | $\alpha, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$     | 20                                 | 19   | 18   | 17   | 16   | 15   | 14   | 13   | 12   | 11   |
|        | $\lambda, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$    | 0,25                               | 0,24 | 0,23 | 0,22 | 0,2  | 0,20 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,15 |
| 11     | $w_0, \text{м/с}$                          | 10                                 | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   |
|        | $t_0, ^\circ\text{C}$                      | 80                                 | 90   | 100  | 120  | 140  | 160  | 180  | 200  | 225  | 250  |
|        | $d_0, \text{мм}$                           | 100                                | 120  | 140  | 160  | 180  | 200  | 220  | 240  | 260  | 280  |
| 12     | $t_в, ^\circ\text{C}$                      | 60                                 | 70   | 80   | 90   | 100  | 120  | 140  | 160  | 180  | 200  |
|        | $G, \text{кг/ч}$                           | 25                                 | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 55   | 60   | 65   | 70   |
| 13     | $w, \text{м/с}$                            | 0,4                                | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,3  |
|        | $t_ж, ^\circ\text{C}$                      | 70                                 | 65   | 60   | 55   | 50   | 45   | 40   | 35   | 30   | 25   |
|        | $t_{ст}, ^\circ\text{C}$                   | 100                                | 95   | 90   | 85   | 80   | 75   | 70   | 65   | 60   | 55   |
| 14     | $w, \text{м/с}$                            | 6,0                                | 6,5  | 7,0  | 7,5  | 8,0  | 8,5  | 9,0  | 9,5  | 10   | 11   |
|        | $t_в, ^\circ\text{C}$                      | 30                                 | 35   | 40   | 45   | 50   | 55   | 60   | 65   | 70   | 75   |
| 15     | $G \cdot 10^3, \text{кг/с}$                | 19                                 | 18   | 17   | 16   | 15   | 14   | 13   | 12   | 11   | 10   |

|    |   |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
|----|---|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
|    | $t'_B, ^\circ\text{C}$                          | 5     | 10    | 15    | 20    | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   |
|    | $t''_B, ^\circ\text{C}$                         | 25    | 30    | 35    | 40    | 45   | 50   | 55   | 60   | 65   | 70   |
| 16 | $G, \text{кг/ч}$                                | 420   | 460   | 500   | 550   | 600  | 650  | 700  | 750  | 800  | 850  |
|    | $t', ^\circ\text{C}$                            | 10    | 15    | 20    | 25    | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 55   |
|    | $t'', ^\circ\text{C}$                           | 85    | 85    | 90    | 85    | 80   | 75   | 80   | 85   | 90   | 95   |
| 17 | $p, \text{МПа}$                                 | 1,005 | 0,010 | 0,025 | 0,050 | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  |
|    | $t_{ct}, ^\circ\text{C}$                        | 10    | 15    | 20    | 22    | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   |
| 18 | $t_{ct}, ^\circ\text{C}$                        | 300   | 290   | 280   | 270   | 260  | 250  | 240  | 230  | 220  | 210  |
|    | $\varepsilon_2$                                 | 0,30  | 0,28  | 0,26  | 0,25  | 0,24 | 0,22 | 0,20 | 0,16 | 0,12 | 0,10 |
| 19 | $t^1, ^\circ\text{C}$                           | 400   | 420   | 450   | 480   | 500  | 520  | 540  | 560  | 580  | 600  |
|    | $d_2, \text{мм}$                                | 300   | 280   | 260   | 240   | 220  | 200  | 190  | 180  | 170  | 160  |
|    | $\varepsilon_3$                                 | 0,30  | 0,28  | 0,26  | 0,24  | 0,22 | 0,20 | 0,18 | 0,15 | 0,12 | 0,10 |
| 20 | $t_r, ^\circ\text{C}$                           | 250   | 270   | 300   | 320   | 350  | 370  | 400  | 420  | 450  | 470  |
|    | $t_{ct}, ^\circ\text{C}$                        | 110   | 140   | 150   | 180   | 190  | 200  | 220  | 250  | 270  | 300  |
|    | $\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ | 25    | 28    | 35    | 37    | 40   | 45   | 48   | 50   | 52   | 55   |
| 21 | $d, \text{мм}$                                  | 0,20  | 0,25  | 0,30  | 0,35  | 0,40 | 0,38 | 0,32 | 0,28 | 0,22 | 0,18 |
|    | $q_i, \text{кВт}/\text{пог} \cdot \text{м}$     | 3,90  | 5,70  | 7,82  | 10,3  | 13,0 | 14,3 | 12,4 | 11,8 | 10,1 | 8,78 |
|    | $\varepsilon$                                   | 0,30  | 0,35  | 0,40  | 0,45  | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,75 |
| 22 | $G_w, \text{т/ч}$                               | 8     | 9     | 10    | 12    | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   |
|    | $p, \text{МПа}$                                 | 0,10  | 0,15  | 0,20  | 0,25  | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 | 0,60 |
|    | $x$   | 0,90  | 0,92  | 0,93  | 0,94  | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1,00 |
| 23 | $t'_w, ^\circ\text{C}$                          | 66    | 67    | 68    | 69    | 70   | 71   | 72   | 73   | 74   | 75   |
|    | $k, \text{кВт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$       | 1,00  | 1,05  | 1,10  | 1,15  | 1,20 | 1,25 | 1,30 | 1,35 | 1,40 | 1,45 |
| 24 | $G_B, \text{кг/с}$                              | 1,1   | 1,2   | 1,3   | 1,4   | 1,5  | 1,6  | 1,7  | 1,8  | 1,9  | 2,0  |
|    | $t''_w, ^\circ\text{C}$                         | 38    | 36    | 34    | 32    | 30   | 28   | 26   | 24   | 22   | 22   |
| 25 | $t''_1, ^\circ\text{C}$                         | 40    | 42    | 44    | 46    | 48   | 50   | 52   | 56   | 58   | 60   |
|    | $t''_2, ^\circ\text{C}$                         | 26    | 30    | 32    | 36    | 38   | 40   | 42   | 44   | 46   | 50   |
|    | $G_1, \text{кг/с}$                              | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9  | 1,0  | 1,1  | 1,2  | 1,3  | 1,4  |
| 26 | $t^1, ^\circ\text{C}$                           | 800   | 850   | 900   | 950   | 1000 | 1050 | 1100 | 1150 | 1200 | 1250 |
|    | $\varepsilon$                                   | 0,60  | 0,62  | 0,64  | 0,68  | 0,70 | 0,72 | 0,74 | 0,76 | 0,78 | 0,8  |
| 27 | $\varepsilon$                                   | 0,40  | 0,45  | 0,50  | 0,55  | 0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,75 | 0,80 | 0,85 |
|    | $t_B, ^\circ\text{C}$                           | 30    | 27    | 25    | 22    | 20   | 17   | 15   | 10   | 5    | 0    |
|    | $t_{ct}, ^\circ\text{C}$                        | 350   | 320   | 300   | 280   | 250  | 220  | 200  | 180  | 150  | 120  |
| 28 | $t^{cm}, ^\circ\text{C}$                        | 110   | 120   | 130   | 140   | 150  | 160  | 170  | 180  | 190  | 200  |
|    | $\varepsilon$                                   | 0,1   | 0,15  | 0,2   | 0,25  | 0,3  | 0,35 | 0,4  | 0,45 | 0,5  | 0,55 |
| 29 | $k, \text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$        | 31    | 32    | 33    | 34    | 35   | 36   | 37   | 38   | 39   | 40   |
| 30 | $t''_{w2}, ^\circ\text{C}$                      | 60    | 65    | 70    | 75    | 80   | 85   | 90   | 95   | 100  | 110  |

### Методические указания к решению задач 2.1. Теплопередача

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

$$q = \frac{t_1^{cm} - t_{n+1}^{cm}}{\sum_1^n \delta_i \lambda_i} \quad (1)$$

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

где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $n$  - число отдельных слоев в стенке;  $\delta_i$  - толщина каждого слоя стенки, м;  $\lambda_i$  - коэффициент теплопроводности каждого слоя, Вт/(м·К).'

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

$$q_I = \frac{\pi(t_1^{CT} - t_3^{CT})}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 d_{m1}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 d_{m2}}},$$

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

Относительное изменение линейной плотности теплового потока при перемене слоев изоляции местами

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

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

$$\alpha_1(t_1 - t_1^{cm}); \quad (4)$$

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

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

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи со стороны горячей и холодной жидкостей, омывающих стенку, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_1$  и  $t_2$  - температуры жидкостей, омывающих стенку;  $t_1^{cm}$  и  $t_2^{cm}$  - температуры поверхностей стенки со стороны горячей и холодной жидкостей;  $k$  - коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$$k = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i + 1/\alpha_2} \quad (7)$$

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

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

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

$$q_I = \alpha_1(t_1 - t_1^{cm})\pi d_1; \quad (8)$$

$$q_I = \alpha_2(t_{n+1}^{cm} - t_2)\pi d_2 \quad (9)$$

Исключая неизвестные величины  $t_1^{cm}$ , получим

$$q_1 = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{1/\alpha_1 d_1 + \sum_1^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + 1/\alpha_2 d_2},$$

где  $n$  - число слоев в цилиндрической стенке.

Для нахождения толщины слоя изоляции трубы в задаче 8 следует сначала определить линейную плотность теплового потока (по заданным величинам  $\alpha_2$ ,  $t_1^{cm}$ ,  $t_2$  и  $d_2$ ) и требуемое термическое сопротивление изоляции (см. формулу 2):

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

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

$$q_1 = \alpha (t_{ст} - t_в) \pi d_1 = I^2 r,$$

где  $r$  - активное электрическое сопротивление провода, Ом/м.

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

$$q_1 = \alpha (t_{из} - t_в) \pi d_2. \quad (13)$$

Максимальный ток определяется по предельно допустимой температуре  $t_1^{cm \max}$  из уравнения

$$q_1^{\max} = \frac{\pi(t_1^{cm \max} - t_в)}{2\lambda \ln \frac{d+2\delta}{d} + 1/\alpha_2 d_2} \quad (14)$$

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

$$\frac{w_m d_m}{\nu_m} = \frac{w_0 d_0}{\nu_0}; \quad \frac{\nu_m}{\alpha_m} = \frac{\nu_0}{\alpha_0}.$$

Для нахождения значений коэффициентов конвективной теплоотдачи в задачах 12, 13, 14, 15, 16 и 18 рекомендуется воспользоваться формулами, приведенными в контрольных вопросах 9-12. В формулах индекс "ж" указывает, что величины отнесены к определенной температуре  $t_{ж}$ , т.е. средней температуре жидкости (среды).

Средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>-К), при пленочной конденсации пара на поверхности горизонтальной трубы может быть определен по зависимости 8-3 [5] или по формуле

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

где  $A = 5400 \lambda^3 r \rho / \nu$ ;  $\Delta T = T_H - T_{ст}$ ;  $r$  - теплота парообразования (конденсации), кДж/кг.

Значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , плотности  $\rho$  и коэффициента кинематической вязкости  $\nu$  конденсата здесь отнесены к средней температуре пленки  $t_{cp} = 0,5(t_H + t_{ст})$ .

Температура насыщения  $t_H$  определяется по заданному давлению пара из таблиц насыщенного водяного пара. Из этих же таблиц находят значение теплоты парообразования.

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

$$Q_{л} = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 \right] \pi dl, \quad (16)$$

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

Исходя из закона Ньютона – Рихмана, приведенный коэффициент теплоотдачи излучением,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$

$$\alpha_{л} = \frac{Q_{л}}{\pi dl(t_{cm} - t_e)}. \quad (17)$$

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

$$Q_{1 \rightarrow 3} = Q_{3 \rightarrow 2}, \text{ т.е.} \\ C_{1 \rightarrow 3} = \left[ \left( \frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 \right] F_1 = C_{3 \rightarrow 2} \left[ \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_e}{100} \right)^4 \right] F_2, \quad (18)$$

$$\text{где } C_{3 \rightarrow 1} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon} + \left( \frac{F_1}{F_2} \right) \left( \frac{1}{\varepsilon_3} - 1 \right)};$$

$$C_{3 \rightarrow 2} = \varepsilon_2 C_0, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$$

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

$$\alpha(t_B - t_T) = \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{cm}}{100} \right)^4 \right]. \quad (19)$$

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

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

$$Q = G_1 G_1 (t_1' - t_1'') = G_2 G_2 (t_2'' - t_2') \quad (20)$$

и уравнения теплопередачи

$$Q = k F \Delta t_{cp}, \quad (21)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  — расходы греющего и нагреваемого теплоносителей,  $\text{кг/с}$ ;  $C_1$  и  $C_2$  - средние массовые теплоемкости теплоносителей в интервалах температур соответственно  $t_1' - t_1''$  и  $t_2' - t_2''$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $t_1'$  и  $t_2'$ , - температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на входе в теплообменник;  $t_1''$  и  $t_2''$  - температуры греющего и нагреваемого теплоносителей на выходе из теплообменника;  $k$  — коэффициент теплопередачи,  $(\text{кВт/м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $F$  — площадь теплообменной поверхности,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta t_{cp}$  — средний температурный напор.

При прямотоке и противотоке

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{\ln \Delta t_{\delta} / \Delta t_{m}},$$

где  $\Delta t_{\delta}$  и  $\Delta t_{m}$  - соответственно наибольшая и наименьшая разности температур теплоносителей в теплообменнике.

Если  $\Delta t_{\delta} / \Delta t_{m} < 1,7$ , то с достаточной для практических расчетов точностью

$$\Delta t_{cp} = 0,5(\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\mu}).$$

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

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

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

## ПРИЛОЖЕНИЯ К РАЗДЕЛУ 1 «ГИДРАВЛИКА»

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Значения кинематического коэффициента вязкости воды при различной температуре

|                             |        |        |        |       |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $t, ^\circ\text{C}$         | 0      | 10     | 20     | 30    | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     | 90     |
| $\nu, \text{cm}^2/\text{c}$ | 0,0178 | 0,0131 | 0,0101 | 0,009 | 0,0066 | 0,0058 | 0,0048 | 0,0040 | 0,0036 | 0,0030 |

### ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения коэффициента  $\zeta_{вс}$

|                       |      |     |      |      |     |     |      |     |      |     |   |
|-----------------------|------|-----|------|------|-----|-----|------|-----|------|-----|---|
| $n=\omega_2/\omega_1$ | 0,01 | 0,1 | 0,2  | 0,3  | 0,4 | 0,5 | 0,6  | 0,7 | 0,8  | 0,9 | 1 |
| $\zeta_{вс}$          | 0,41 | 0,4 | 0,38 | 0,36 | 0,4 | 0,3 | 0,27 | 0,2 | 0,16 | 0,1 | 0 |

**ПРИЛОЖЕНИЯ К РАЗДЕЛУ 2 «ТЕПЛОТЕХНИКА»**

Табл.1.

Средние объемные теплоемкости газов при  $P=\text{const}$  в интервале температур  $0=t, ^\circ\text{C}$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К).

| <b>t, °C</b> | <b>CO<sub>2</sub></b> | <b>N<sub>2</sub></b> | <b>O<sub>2</sub></b> | <b>H<sub>2</sub>O</b> | <b>Воздух</b> |
|--------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------|
| 0            | 1,600                 | 1,299                | 1,306                | 1,494                 | 1,297         |
| 100          | 1,700                 | 1,300                | 1,318                | 1,505                 | 1,300         |
| 200          | 1,737                 | 1,304                | 1,335                | 1,522                 | 1,307         |
| 300          | 1,863                 | 1,311                | 1,356                | 1,542                 | 1,317         |
| 400          | 1,930                 | 1,321                | 1,387                | 1,565                 | 1,329         |
| 500          | 1,989                 | 1,332                | 1,398                | 1,590                 | 1,343         |
| 600          | 2,041                 | 1,345                | 1,417                | 1,615                 | 1,456         |
| 700          | 2,088                 | 1,359                | 1,434                | 1,641                 | 1,371         |
| 800          | 2,131                 | 1,372                | 1,450                | 1,668                 | 1,384         |
| 900          | 2,169                 | 1,385                | 1,465                | 1,696                 | 1,398         |
| 1000         | 2,204                 | 1,397                | 1,478                | 1,723                 | 1,410         |
| 1100         | 2,235                 | 1,409                | 1,489                | 1,750                 | 1,421         |
| 1200         | 2,264                 | 1,420                | 1,501                | 1,777                 | 1,433         |
| 1300         | 2,290                 | 1,431                | 1,511                | 1,803                 | 1,443         |
| 1400         | 2,314                 | 1,441                | 1,520                | 1,828                 | 1,453         |
| 1500         | 2,335                 | 1,450                | 1,529                | 1,853                 | 1,462         |
| 1600         | 2,356                 | 1,459                | 1,538                | 1,876                 | 1,471         |
| 1700         | 2,374                 | 1,467                | 1,546                | 1,900                 | 1,479         |
| 1800         | 2,392                 | 1,475                | 1,554                | 1,921                 | 1,487         |
| 1900         | 2,407                 | 1,482                | 1,562                | 1,942                 | 1,494         |
| 2000         | 2,422                 | 1,489                | 1,569                | 1,963                 | 1,501         |



Табл.2.

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения  
(аргумент-давление)

| $p$ ,<br>МПа | $t$ ,<br>°C | $v'$ ,<br>м <sup>3</sup> /кг | $v''$ ,<br>м <sup>3</sup> /кг | $i'$ ,<br>кДж/кг | $i''$ ,<br>кДж/кг | $r$ ,<br>кДж/кг | $S'$ ,<br>кДж/(кг·К) | $S''$ ,<br>кДж/(кг·К) |
|--------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| 1            | 2           | 3                            | 4                             | 5                | 6                 | 7               | 8                    | 9                     |
| 0,003        | 24,1        | 0,00100                      | 45,67                         | 101,0            | 2545              | 2444            | 0,354                | 8,578                 |
| 0,004        | 28,98       | 0,00100                      | 34,80                         | 121,4            | 2554              | 2433            | 0,422                | 8,475                 |
| 0,005        | 32,90       | 0,00101                      | 28,19                         | 137,8            | 2561              | 2423            | 0,476                | 8,395                 |
| 0,10         | 99,63       | 0,00104                      | 1,694                         | 417,5            | 2676              | 2258            | 1,303                | 7,361                 |
| 0,12         | 104,8       | 0,00105                      | 1,429                         | 439,4            | 2684              | 2244            | 1,361                | 7,299                 |
| 0,14         | 109,3       | 0,00105                      | 1,237                         | 458,4            | 2691              | 2232            | 1,411                | 7,248                 |
| 0,16         | 113,3       | 0,00105                      | 1,092                         | 475,4            | 2697              | 2221            | 1,455                | 7,203                 |
| 0,18         | 116,9       | 0,00106                      | 0,978                         | 490,7            | 2702              | 2211            | 1,494                | 7,164                 |
| 0,20         | 120,3       | 0,00106                      | 0,886                         | 504,7            | 2707              | 2202            | 1,530                | 7,128                 |
| 0,40         | 143,6       | 0,00108                      | 0,462                         | 604,7            | 2738              | 2143            | 1,776                | 6,897                 |
| 0,60         | 158,8       | 0,00110                      | 0,315                         | 670,4            | 2756              | 2086            | 2,931                | 6,760                 |
| 0,80         | 170,4       | 0,00112                      | 0,240                         | 720,9            | 2768              | 2047            | 2,046                | 6,662                 |
| 1,0          | 179,9       | 0,00113                      | 0,194                         | 762,6            | 2777              | 2014            | 2,138                | 6,585                 |
| 1,2          | 187,9       | 0,00114                      | 0,163                         | 798,4            | 2783              | 1985            | 2,216                | 6,521                 |
| 1,4          | 195,0       | 0,00115                      | 0,141                         | 830,1            | 2788              | 1958            | 2,284                | 6,466                 |
| 1,6          | 201,4       | 0,00116                      | 0,1237                        | 858,6            | 2792              | 1934            | 2,344                | 6,419                 |
| 1,8          | 207,1       | 0,00117                      | 0,1103                        | 884,6            | 2795              | 1910            | 2,398                | 6,376                 |
| 2,0          | 212,4       | 0,00118                      | 0,0995                        | 908,6            | 2797              | 1889            | 2,446                | 6,337                 |
| 2,2          | 217,2       | 0,00119                      | 0,0906                        | 930,9            | 2799              | 1868            | 2,492                | 6,302                 |
| 2,4          | 221,8       | 0,00119                      | 0,0832                        | 951,9            | 2800              | 1848            | 2,533                | 6,269                 |
| 2,6          | 226,0       | 0,00120                      | 0,0769                        | 971,7            | 2801              | 1829            | 2,574                | 6,239                 |
| 2,8          | 230,0       | 0,00121                      | 0,0714                        | 990,5            | 2802              | 1811            | 2,611                | 6,210                 |
| 3,0          | 233,8       | 0,00122                      | 0,0666                        | 1008,4           | 2802              | 1793            | 2,646                | 6,183                 |
| 3,5          | 242,5       | 0,00123                      | 0,0570                        | 1049,8           | 2801              | 1751            | 2,725                | 6,122                 |
| 4,0          | 250,3       | 0,00125                      | 0,0494                        | 1087,5           | 2799              | 1712            | 2,797                | 6,067                 |
| 4,5          | 257,4       | 0,00127                      | 0,0440                        | 1122,2           | 2796              | 1674            | 2,861                | 6,017                 |
| 5,0          | 263,9       | 0,00129                      | 0,0394                        | 1154,6           | 2793              | 1638            | 2,924                | 5,971                 |

Табл.3.

Физические свойства сухого воздуха при давлении 760 мм рт.ст.

| <b>t,</b><br><b>°C</b> | <b><math>\rho</math>,</b><br><b>кг/м<sup>3</sup></b> | <b><math>c_{cp}</math>,</b><br><b>кДж/(кг·К)</b> | <b><math>\lambda \cdot 10^2</math>,</b><br><b>Вт/(мК)</b> | <b><math>a \cdot 10^6</math>,</b><br><b>м<sup>2</sup>/с</b> | <b><math>\mu \cdot 10^6</math>,</b><br><b>(N·с)/м<sup>2</sup></b> | <b><math>\gamma \cdot 10^6</math>,</b><br><b>м<sup>2</sup>/с</b> | <b>Pr</b> |
|------------------------|--|--|---|---|---|--|-----------|
| -20                    | 1,395  | 1,009  | 2,28  | 16,2  | 16,2  | 11,61  | 0,716     |
| -10                    | 1,342  | 1,009  | 2,36  | 17,4  | 16,7  | 12,43  | 0,712     |
| 0                      | 1,293  | 1,005  | 2,44  | 18,8  | 17,2  | 13,28  | 0,707     |
| 10                     | 1,247  | 1,005  | 2,51  | 20,0  | 17,6  | 14,16  | 0,705     |
| 20                     | 1,205  | 1,005  | 2,59  | 21,4  | 18,1  | 15,06  | 0,703     |
| 30                     | 1,165  | 1,005  | 2,67  | 22,9  | 18,6  | 16,00  | 0,701     |
| 40                     | 1,128  | 1,005  | 2,76  | 24,3  | 19,1  | 16,96  | 0,699     |
| 50                     | 1,093  | 1,005  | 2,83  | 25,7  | 19,6  | 17,95  | 0,698     |
| 60                     | 1,060  | 1,005  | 2,90  | 27,2  | 20,1  | 18,97  | 0,696     |
| 70                     | 1,029  | 1,009  | 2,96  | 28,6  | 20,6  | 20,02  | 0,694     |
| 80                     | 1,000  | 1,009  | 3,05  | 30,2  | 21,1  | 21,09  | 0,692     |
| 90                     | 0,972  | 1,009  | 3,13  | 31,9  | 21,5  | 22,10  | 0,690     |
| 100                    | 0,946  | 1,009  | 3,21  | 33,6  | 21,9  | 23,13  | 0,688     |
| 120                    | 0,898  | 1,009  | 3,34  | 36,8  | 22,8  | 25,45  | 0,686     |
| 140                    | 0,854  | 1,013  | 3,49  | 40,3  | 23,7  | 27,80  | 0,684     |
| 160                    | 0,815  | 1,017  | 3,64  | 43,9  | 24,5  | 30,09  | 0,682     |
| 180                    | 0,779  | 1,022  | 3,78  | 47,5  | 25,3  | 32,49  | 0,681     |
| 200                    | 0,746  | 1,026  | 3,93  | 51,4  | 26,0  | 34,85  | 0,680     |

Табл.4.

## Физические свойства воды на линии насыщения

| $t$ ,<br>$^{\circ}\text{C}$ | $\rho \cdot 10^{-5}$ ,<br>Па | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $I$ ,<br>кДж/кг | $c_p$ ,<br>кДж/(кг·К) | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·К) | $\alpha \cdot 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | $\mu \cdot 10^6$ ,<br>(N·с)/м <sup>2</sup> | $\nu \cdot 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | Pr    |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------------|--|--|---|-------|
| 0                           | 1,013                        | 999,9                         | 0               | 4,212                 | 0,560                   | 13,2                                       | 1788                                       | 1,789                                   | 13,5  |
| 10                          | 1,013                        | 999,7                         | 42,04           | 4,191                 | 0,580                   | 13,8                                       | 1306                                       | 1,306                                   | 9,45  |
| 20                          | 1,013                        | 998,2                         | 83,91           | 4,183                 | 0,597                   | 14,3                                       | 1004                                       | 1,006                                   | 7,03  |
| 30                          | 1,013                        | 995,7                         | 125,7           | 4,174                 | 0,612                   | 14,7                                       | 801,5                                      | 0,805                                   | 5,45  |
| 40                          | 1,013                        | 992,2                         | 167,5           | 4,174                 | 0,627                   | 15,1                                       | 653,3                                      | 0,659                                   | 4,36  |
| 50                          | 1,013                        | 988,1                         | 209,3           | 4,174                 | 0,640                   | 15,5                                       | 549,4                                      | 0,556                                   | 3,59  |
| 60                          | 1,013                        | 983,1                         | 251,1           | 4,179                 | 0,650                   | 15,8                                       | 469,9                                      | 0,478                                   | 3,03  |
| 70                          | 1,013                        | 977,8                         | 293,0           | 4,187                 | 0,662                   | 16,1                                       | 406,1                                      | 0,415                                   | 2,58  |
| 80                          | 1,013                        | 971,8                         | 335,0           | 4,195                 | 0,669                   | 16,3                                       | 355,1                                      | 0,365                                   | 2,23  |
| 90                          | 1,013                        | 965,3                         | 377,0           | 4,203                 | 0,676                   | 16,5                                       | 314,9                                      | 0,326                                   | 1,97  |
| 100                         | 1,013                        | 958,4                         | 419,1           | 4,220                 | 0,684                   | 16,8                                       | 282,5                                      | 0,295                                   | 1,75  |
| 120                         | 1,98                         | 943,1                         | 503,7           | 4,250                 | 0,686                   | 17,1                                       | 237,4                                      | 0,252                                   | 1,47  |
| 140                         | 3,61                         | 926,1                         | 589,1           | 4,287                 | 0,685                   | 17,2                                       | 201,4                                      | 0,217                                   | 1,26  |
| 160                         | 6,18                         | 907,4                         | 657,4           | 4,346                 | 0,681                   | 17,8                                       | 173,6                                      | 0,191                                   | 1,10  |
| 180                         | 10,03                        | 886,9                         | 763,3           | 4,417                 | 0,672                   | 17,2                                       | 153,0                                      | 0,173                                   | 1,03  |
| 200                         | 15,55                        | 863,0                         | 852,5           | 4,505                 | 0,658                   | 17,0                                       | 136,4                                      | 0,158                                   | 0,932 |
| 220                         | 23,20                        | 840,3                         | 943,7           | 4,614                 | 0,640                   | 16,5                                       | 124,6                                      | 0,148                                   | 0,898 |
| 240                         | 33,48                        | 813,6                         | 1037,5          | 4,760                 | 0,617                   | 16,0                                       | 114,8                                      | 0,141                                   | 0,883 |
| 260                         | 46,94                        | 784,0                         | 1135,7          | 4,980                 | 0,593                   | 15,2                                       | 105,9                                      | 0,135                                   | 0,892 |
| 280                         | 64,19                        | 750,7                         | 1236,7          | 5,300                 | 0,565                   | 14,3                                       | 98,1                                       | 0,131                                   | 0,917 |
| 300                         | 85,92                        | 712,5                         | 1344,9          | 5,760                 | 0,532                   | 13,0                                       | 91,2                                       | 0,128                                   | 0,986 |