

По горизонтально расположенной стальной трубе [ $\lambda = 20 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ] со скоростью  $W_1$  течет вода, имеющая температуру  $t_b$ . Снаружи труба охлаждается воздухом, температура которого  $t_{\text{возд}}$ , а давление  $0,1 \text{ МПа}$ . Определить: коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  соответственно от воды к стенке трубы и от стенки трубы к воздуху; коэффициент теплопередачи  $k$  и тепловой поток  $q_{\text{ц}}$ , отнесенные к  $1 \text{ м}$  длины трубы, если внутренний диаметр равен  $d_1$ , а внешний –  $d_2$ .

**Указание.** Для определения  $\alpha_2$  принять в первом приближении температуру наружной поверхности трубы  $t_2$ , равной температуре воды  $t_b$ .

### Исходные данные для решения задачи 3

Последняя цифра номера зачетной книжки	$t_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$W_1, \text{ м/с}$	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	$t_{\text{возд}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$d_1, \text{ мм}$	$d_2, \text{ мм}$
0	120	2,5	0	18	190	210
1	130	3,6	1	16	180	200
2	140	2,7	2	14	170	190
3	150	3,8	3	12	160	180
4	160	1,9	4	10	150	170
5	170	2,1	5	8	140	160
6	180	2,3	6	6	130	150
7	190	4,2	7	4	120	140
8	200	4,3	8	2	110	130
9	210	4,4	9	0	100	120

### Методические указания по решению задач

**Третья задача** выполняется в три этапа.

1. Определение коэффициента теплоотдачи от воды к внутренней стенке  $\alpha_1$  производим в следующем порядке. Сначала находим критерий Рейнольдса  $Re_{ж1d1}$ , определяющий характер течения жидкости, и критерий Прандтля  $Pr_{ж1}$ , определяющий физические свойства жидкости, и, подставляя их в критериальное уравнение, вычисляем критерий Нуссельта  $Nu_{ж1d1}$ , характеризующий теплообмен между жидкостью и поверхностью твердого тела.

Критерий Рейнольдса определяем по формуле:

$$Re_{ж1d1} = \frac{W_1 d_1}{\nu_{ж1}}, \quad (23)$$

где  $W_1$  – скорость движения воды в трубе, м/с;

$d_1$  – внутренний диаметр трубы, м;

$\nu_{ж1}$  – кинематический коэффициент вязкости воды определяемый по табл. 4, м<sup>2</sup>/с.

Критерий Прандтля, равный  $\nu_{ж1}/a_{ж1}$ , выбираем в зависимости от температуры воды из табл. 4.

Таблица 4

**Физические параметры воды при различных температурах**

$T$	$c_p$	$\lambda$	$a \cdot 10^7$	$\mu \cdot 10^5$	$\nu \cdot 10^6$	Pr
К	кДж/(кг·К)	Вт/(м·К)	м <sup>2</sup> /с	Нс/м <sup>2</sup>	м <sup>2</sup> /с	—
393	4,250	0,686	1,71	23,7	0,252	1,47
403	4,266	0,686	1,72	21,8	0,233	1,36
413	4,287	0,685	1,72	20,1	0,217	1,26
423	4,312	0,684	1,73	18,6	0,203	1,17
433	4,346	0,683	1,73	17,4	0,191	1,10
443	4,379	0,679	1,73	16,3	0,181	1,05
453	4,417	0,675	1,72	15,3	0,173	1,00
463	4,459	0,670	1,71	14,4	0,165	0,96
473	4,505	0,663	1,70	13,6	0,158	0,93
493	4,614	0,645	1,64	12,5	0,148	0,89

Критериальное уравнение теплоотдачи при турбулентном движении жидкости в горизонтальной трубе имеет вид:

$$Nu_{ж1d1} = 0,021 Re_{ж1d1}^{0,8} \cdot Pr_{ж1}^{0,43}, \quad (24)$$

Затем находим коэффициент  $\alpha_1$  по следующей формуле:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{ж1d1} \lambda_{ж1}}{d_1}. \quad (25)$$

2. Определение коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности трубы воздуху  $\alpha_2$ , (Вт/(м<sup>2</sup>·К)).

Критериальное уравнение теплоотдачи от поверхности горизонтальной трубы воздуху при свободной конвекции последнего имеет вид:

$$\text{Nu}_{\text{ж}2d2} = 0,05(\text{Gr}_{\text{ж}2d2} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}2})^{0,25} \quad (26)$$

Критерий Прандля, характеризующий в данном случае физические свойства воздуха,

$\text{Pr}_{\text{ж}2} = \nu_{\text{ж}2}/a_{\text{ж}2}$ , где  $\nu_{\text{ж}2}$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $a_{\text{ж}2}$  – коэффициент температуропроводности воздуха, м<sup>2</sup>/с; определяем по табл. 5.

Критерий Грасгофа, характеризующий свободную конвекцию, определяем как

$$\text{Gr}_{\text{ж}2d2} = \frac{\beta_{\text{ж}2} \cdot d_2^3 \cdot \Delta t}{\nu_{\text{ж}2}^2}, \quad (27)$$

где  $\beta_{\text{ж}2}$  – коэффициент объемного расширения воздуха, равный 0,003662 1/К;

$g$  – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с<sup>2</sup>;

$d_2$  – наружный диаметр трубы, м;

$\Delta t$  – разность температур между воздухом и поверхностью трубы,

$\Delta t = t_n - t_{\text{возд}} = t_{\text{в}} - t_{\text{возд}}$ , т.к. принимаем, что температура наружной поверхности трубы равна температуре воды;

$\nu_{\text{ж}2}$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с, определяемый по табл. 5.

Таблица 5

**Физические параметры сухого воздуха при давлении  
760 мм рт. ст. и различных температурах**

$T$	$P$	$c_p$	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^7$	$\mu \cdot 10^5$	$\nu \cdot 10^6$	Pr
К	кг/м <sup>3</sup>	кДж/(кг·К)	Вт/(м·К)	м <sup>2</sup> /с	Нс/м <sup>2</sup>	м <sup>2</sup> /с	—
263	1,342	1,009	2,361	1,74	1,67	12,43	0,712
273	1,293	1,005	2,442	1,88	1,72	13,28	0,707
283	1,247	1,005	2,512	2,00	1,77	14,16	0,705
293	1,205	1,005	2,593	2,14	1,81	15,06	0,703
303	1,165	1,005	2,675	2,29	1,86	16,00	0,701
313	1,128	1,005	2,756	2,43	1,91	16,96	0,699

После нахождения критериев Gr и Pr подставляем их в критериальное уравнение, вычисляем критерий Нуссельта  $Nu_{ж2d2}$ , а затем и искомый коэффициент  $\alpha_2$

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{ж2d2}\lambda_{ж2}}{d_2}, \quad (28)$$

где  $d_2$  – наружный диаметр трубы, м;

$\lambda_{ж2}$  – коэффициент теплопроводности воздуха, определяемый по таблице 5 приложения в зависимости от температуры, Вт/(м·К);

$\nu_{ж2}$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с, определяемый по табл. 5.

После нахождения критериев Gr и Pr подставляем их в критериальное уравнение, вычисляем критерий Нуссельта  $Nu_{ж2d2}$ , а затем и коэффициент  $\alpha_2$ :

3. Определение коэффициента теплопередачи  $K$  и теплового потока  $q_{Ц}$ , отнесенного к одному метру длины трубы, производим по формулам:

$$K_{Ц} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \quad (29)$$

где  $K_{Ц}$  – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К), т.е. количество тепла, проходящее через 1 метр трубы в секунду при разности температур теплоносителей (в нашем случае воды и воздуха) в 1 К (или °С);

$\lambda=20$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности материала трубы;

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно от воды к внутренней поверхности трубы и от наружной поверхности трубы к воздуху, определенные выше, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$d_1, d_2$  – внутренний и наружный диаметр трубы (заданы), м;

$$q_{Ц} = K_{Ц} \cdot \pi (t_{в} - t_{возд}), \quad (30)$$

где  $q_{Ц}$  – тепловой поток, отнесенный к 1 м длины трубы, Вт/м;

$K_{Ц}$  – линейный коэффициент теплопередачи определяемый выше, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_{в}$  – температура воды, (°С);

$t_{возд}$  – температура воздуха, окружающего трубу, °С.