

**Задание 1.** Определить конвективный тепловой поток от пластины к воде при следующих условиях: длина  $l = 2,0$  м и ширина пластины  $b = 1,0$  м, температура  $T_c = 420$  К; температура воды  $T_{ж} = 300$  К; коэффициент теплоотдачи пластины  $\alpha = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

### Решение

Определим конвективный тепловой поток по формуле Ньютона:

$$Q = \alpha(T_c - T_{ж})F$$

$$F = bl$$

$$Q = \alpha(T_c - T_{ж})bl$$

Подставим числовые значения:

$$Q = 50 \cdot (420 - 300) \cdot 1 \cdot 2 = 12000 \quad \text{Вт}$$

**Задание 2.** Гладкая плита шириной  $b = 1$  м и длиной  $l = 1,2$  м обдувается воздухом со скоростью  $w_0 = 8$  м/с. Определить средний коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  и полный тепловой поток  $Q$ , если температура пластины  $t_c = 60^\circ\text{C}$  и температура воздуха  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$ .

### Решение

Определим коэффициент теплопроводности и кинематическую вязкость воздуха при  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$  по [таблице](#)

$$\lambda_{\text{ж}} = 0,0259 \text{ (Вт/(м }^\circ\text{C))} \quad \nu_{\text{ж}} = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Определим число Рейнольдса  $Re$  для воздуха:

$$Re_{t_{\text{ж}}} = \frac{wl}{\nu_{\text{ж}}} \quad Re_{t_{\text{ж}}} = \frac{8 \cdot 1,2}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 6,35 \cdot 10^5$$

В зависимости от величины  $Re$  выбираем критериальное уравнение для определения критерия  $Nu$ :

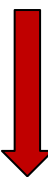
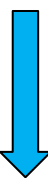
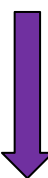
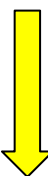
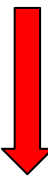
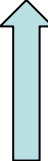
$$\overline{Nu}_{t_{\text{ж}}} = 0,032 Re_{t_{\text{ж}}}^{0,8} \quad \overline{Nu}_{t_{\text{ж}}} = 0,032 \cdot (6,35 \cdot 10^5)^{0,8} = 1420$$

Определим средний коэффициент теплоотдачи:

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu}_{t_{\text{ж}}} \lambda_{\text{ж}}}{l} \quad \bar{\alpha} = \frac{1420 \cdot 0,0259}{1,2} = 30,6 \text{ (Вт/(м }^\circ\text{C))}$$

Физические свойства сухого воздуха  
( $P_B = 760$  мм рт. ст.  $\approx 1,01 \cdot 10^5$  Па)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-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
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724



Определим конвективный тепловой поток по формуле Ньютона:

$$Q = \bar{\alpha} F \Delta t \quad F = bl \quad \Delta t = t_c - t_{\text{ж}}$$

$$Q = \bar{\alpha} bl (t_c - t_{\text{ж}})$$

$$Q = 17,6 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot (60 - 20) = 1470$$

**Задание 3.** Определить средний по длине коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, теряемое плоской тонкой пластиной в условиях вынужденной конвекции, при следующих условиях: длина  $l = 2,0$  м и ширина пластины  $b = 1,0$  м, температура  $t_c = 100^\circ\text{C}$ ; скорость потока воздуха  $w_0 = 3,0$  м/с и его температура  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$ .

$$\bar{\alpha} = 11,5 \text{ м} \cdot \text{C}^{\circ} \quad Q = 100$$

**Задание 4.** Определить среднее значение коэффициент теплоотдачи и тепловой поток передаваемой при течении воды в горизонтальной трубе диаметром  $d = 3$  мм и длиной  $l = 0,5$  м, если скорость воды  $w = 0,3$  м/с, средняя по длине трубы температура воды  $t_{ж} = 60^\circ\text{C}$  и средняя температура стенки  $t_c = 20^\circ\text{C}$ .

### Решение

Определим коэффициент теплопроводности, кинематическую вязкость воды, критерий Прандтля при  $t_{ж} = 60^\circ\text{C}$  и  $t_c = 20^\circ\text{C}$  по [таблице](#)

$$\lambda_{ж} = 0,65 \text{ (Вт/м } \cdot ^\circ\text{C)} \quad \nu_{ж} = 0,478 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad \text{Pr}_{ж} = 2,98 \quad \text{Pr}_c = 7,02$$

Определим число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{ж} = \frac{wd}{\nu_{ж}} \quad \text{Re}_{ж} = \frac{0,3 \cdot 0,003}{0,478 \cdot 10^{-6}} = 1883$$

Течение жидкости ламинарное и  $l/d > 10$ , поэтому

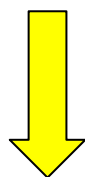
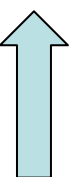
$$\text{Nu}_{ж} = 1,4 \left( \text{Re}_{ж} \frac{d}{l} \right)^{0,4} \text{Pr}_{ж}^{0,33} \left( \frac{\text{Pr}_{ж}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25}$$

Подставим числовые значения:

$$\text{Nu}_{ж} = 1,4 \cdot \left( 1883 \cdot \frac{0,003}{0,5} \right)^{0,4} \cdot 2,98^{0,33} \cdot \left( \frac{2,98}{7,02} \right)^{0,25} = 4,27$$

Таблица П.3. Физические свойства воды в состоянии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ $\text{кг/м}^3$	$c_p,$ $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\lambda,$ $10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\nu,$ $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$\beta,$ $10^{-4} \text{ К}^{-1}$	$\sigma,$ $10^{-4} \text{ Н/м}$	Pr
0	999,9	4,212	55,1	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	999,7	4,191	57,4	1,306	+0,70	741,6	9,52
20	998,2	4,183	59,9	1,006	1,82	726,9	7,02
30	995,7	4,174	61,8	0,805	3,21	712,2	5,42
40	992,2	4,174	63,5	0,659	3,87	696,5	4,31
50	988,1	4,174	64,8	0,556	4,49	676,9	3,54
60	983,2	4,179	65,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	977,8	4,187	66,8	0,415	5,70	643,5	2,55
80	971,8	4,195	67,4	0,365	6,32	625,9	2,21
90	965,3	4,208	68,0	0,326	6,95	607,2	1,95
100	958,4	4,220	68,3	0,295	7,52	588,6	1,75



Средний коэффициент теплоотдачи определим по формуле:

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d}$$

Подставим числовые значения:

$$\alpha = 0,27 \cdot \frac{0,65}{0,003} = 925 \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$$

Переданный тепловой поток определим по формуле:

$$Q = \pi d l \alpha (t_{\text{ж}} - t_{\text{с}})$$

Подставив числовые значения получаем:

$$Q = 3,14 \cdot 0,003 \cdot 0,5 \cdot 925 \cdot (60 - 20) = 174$$



**Задание 5.** По трубе диаметром  $d = 60$  мм и длиной  $l = 2,1$  м протекает воздух со скоростью  $w = 5$  м/с. Определить значение среднего коэффициента теплоотдачи, если средняя температура воздуха  $t_{\text{ж}} = 100^\circ\text{C}$ .

### Решение

Определим коэффициент теплопроводности и кинематическую вязкость воздуха при  $t_{\text{ж}} = 100^\circ\text{C}$  по [таблице](#)

$$\lambda_{\text{ж}} = 0,0321 \text{ Вт/(м}\cdot\text{C)} \quad \nu_{\text{ж}} = 23,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Определим число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu_{\text{ж}}} \quad \text{Re}_{\text{ж}} = \frac{5 \cdot 0,06}{23,13 \cdot 10^{-6}} = 12970$$

В этом случае критерий Нуссельта для воздуха определяется по формуле:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,018 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,8}$$

Подставим числовые значения:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,018 \cdot 12970^{0,8} = 35,13$$

Средний коэффициент теплоотдачи определим по формуле:

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d}$$

Подставим числовые значения:

$$\alpha = \frac{35 \cdot 0,0321 \text{ Вт/м}\cdot\text{С}}{0,06} = 18,8 \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{С}$$

Так как  $l/d = 2,1/0,06 = 35 < 50$ , то необходимо ввести поправку  $\varepsilon_l$  из [таблицы](#)

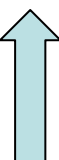
$$\varepsilon_l = 1,04$$

Тогда окончательно получим:

$$\alpha' = \alpha \varepsilon_l \quad \alpha' = \frac{35 \cdot 0,0321 \text{ Вт/м}\cdot\text{С}}{0,06} \cdot 1,04 = 19,6 \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{С}$$

Значения зависимости  $\varepsilon_l = f(l/d, Re_{d\text{ж}})$  при турбулентном режиме

$Re_{d\text{ж}}$	$l/d$								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1
$1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1



**Задание 6.** Через трубу диаметром  $d = 50$  мм и длиной  $l = 3$  м со скоростью  $w = 0,8$  м/с протекает вода. Определить средний коэффициент теплоотдачи, если средняя температура воды в трубе  $t_{ж} = 50^{\circ}\text{C}$ , а средняя температура стенки  $t_c = 70^{\circ}\text{C}$ .

### Решение

Определим коэффициент теплопроводности, кинематическую вязкость воды, критерий Прандтля при  $t_{ж} = 50^{\circ}\text{C}$  и  $t_c = 70^{\circ}\text{C}$  по [таблице](#)

$$\lambda_{ж} = 0,648 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)} \quad \nu_{ж} = 0,556 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad \text{Pr}_{ж} = 3,54 \quad \text{Pr}_c = 2,55$$

Определим число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{ж} = \frac{wd}{\nu_{ж}} \quad \text{Re}_{ж} = \frac{0,8 \cdot 0,05}{0,556 \cdot 10^{-6}} = 71900$$

Так как  $l/d = 60 > 50$ , то поправка на влияние длины трубы  $\varepsilon_l = 1$ .

Формула для расчёта критерия Нуссельта будет следующей:

$$\text{Nu}_{ж} = 0,021 \text{Re}_{ж}^{0,8} \text{Pr}_{ж}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}_{ж}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25}$$

$$\text{Nu}_{ж} = 0,021 \cdot 71900^{0,8} \cdot 3,54^{0,43} \cdot \left( \frac{3,54}{2,55} \right)^{0,25} = 302$$

Средний коэффициент теплоотдачи определим по формуле:

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d}$$

$$\alpha = \frac{302 \cdot 0,648}{0,05} = 3910 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$$

**Задание 7.** Через трубу диаметром  $d = 50$  мм и длиной  $l = 3$  м изогнутую в виде змеевика диаметром  $D = 600$  мм со скоростью  $w = 0,8$  м/с протекает вода. Определить средний коэффициент теплоотдачи, если средняя температура воды в трубе  $t_{\text{ж}} = 50^\circ\text{C}$ , а средняя температура стенки  $t_{\text{с}} = 70^\circ\text{C}$ .

$$\varepsilon_{\text{R}} = 1 + 1,77 \frac{d}{R} = 1 + 3,54 \frac{d}{D}$$

$$\alpha_{\text{из}} = \alpha \varepsilon_{\text{R}} = \alpha \left( 1 + 3,54 \frac{d}{D} \right)$$

$$\alpha_{\text{из}} = 3910 \cdot \left( 1 + 3,54 \cdot \frac{0,05}{0,6} \right) = 5060 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

**Задача 8.** Определить потерю тепла путём конвекции вертикальным неизолированным паропроводом диаметром  $d = 100$  мм и высотой  $h = 4$  м, если температура наружной стенки  $t_c = 170^\circ\text{C}$ , а температура среды (воздуха)  $t_{\text{ж}} = 30^\circ$ .

### Решение

Определим коэффициент теплопроводности, кинематическую вязкость воздуха и критерий Прандтля при  $t_{\text{ж}} = 30^\circ\text{C}$  и  $t_c = 170^\circ\text{C}$  по [таблице](#)

$$\lambda_{\text{ж}} = 0,0267 \text{ Вт/(м}\cdot\text{C)} \quad \nu_{\text{ж}} = 16,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad \text{Pr}_{\text{ж}} = 0,701 \quad \text{Pr}_c = 0,682$$

$$\text{Для воздуха:} \quad \left( \frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} = \left( \frac{0,701}{0,682} \right)^{0,25} = 1,007 \approx 1 \quad \beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{303} \text{ К}^{-1}$$

$$\text{Определим число Грасгофа:} \quad \text{Gr}_{\text{ж}} = \frac{\beta h^3 g (t_c - t_{\text{ж}})}{\nu_{\text{ж}}^2}$$

Подставим числовые значения:

$$\text{Gr}_{\text{ж}} = \frac{4^3 \cdot 9,81 \cdot (170 - 30)}{303 \cdot (16 \cdot 10^{-6})^2} = 1,133 \cdot 10^{12} \quad \text{Gr}_{\text{ж}} \text{Pr}_{\text{ж}} = 1,133 \cdot 10^{12} \cdot 0,701 = 7,9 \cdot 10^{11}$$

Выбираем критериальное уравнение для числа Нуссельта:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,15 (\text{Gr}_{\text{ж}} \text{Pr}_{\text{ж}})^{0,33}$$

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,15 \cdot (7,9 \cdot 10^{11})^{0,33} = 1390$$

Средний коэффициент теплоотдачи определим по формуле:

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{h} \quad \alpha = 390 \cdot \frac{0,0267}{4} = 9,28 \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Потери теплоты определим по формуле:

$$Q = \alpha(t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) \pi dh$$

$$Q = 9,28 \cdot (170 - 30) \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 4 = 1630$$



**Задача 9.** Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности плоской воздушной прослойки толщиной  $\delta = 25$  мм и плотность теплового потока через неё. Температура горячей поверхности  $t_{c1} = 150^\circ\text{C}$ , холодной —  $t_c = 50^\circ\text{C}$ .

### Решение

Определим среднюю температуру воздушной прослойки:

$$t_{\text{ж}} = \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2} \quad t_{\text{ж}} = \frac{150 + 50}{2} = 100^\circ\text{C}$$

По [таблице](#) для этой температуры определим коэффициент теплопроводности, кинематическую вязкость и число Прандтля:

$$\lambda_{\text{ж}} = 0,021 \text{ (Вт/м К)} \quad \nu_{\text{ж}} = 23,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad \text{Pr}_{\text{ж}} = 0,688$$

Определим число Грасгофа по формуле:

$$Gr_{\text{ж}} = \frac{\beta g \delta^3 (t_{c1} - t_{c2})}{\nu_{\text{ж}}^2} \quad Gr_{\text{ж}} = \frac{9,81 \cdot 0,025^3 \cdot (150 - 50)}{373 \cdot (23,13 \cdot 10^{-6})^2} = 7,68 \cdot 10^4$$

$$Gr_{\text{ж}} \text{Pr}_{\text{ж}} = 7,68 \cdot 10^4 \cdot 0,688 = 5,28 \cdot 10^4$$

Тогда уравнение для коэффициента конвекции будет иметь вид:

$$\varepsilon_{\text{к}} = 0,18 (Gr_{\text{ж}} \text{Pr}_{\text{ж}})^{0,25} \quad \varepsilon_{\text{к}} = 0,18 \cdot (5,28 \cdot 10^4)^{0,25} = 2,73$$

Выражение для эквивалентного коэффициента теплопроводности имеет вид:

$$\lambda_{\text{эк}} = \varepsilon_k \lambda_{\text{ж}} \quad \lambda_{\text{эк}} = \frac{0,77}{0,025} \cdot 0,0321 = 0,088 \quad .$$

Плотность теплового потока определим по формуле:

$$q = \frac{\lambda_{\text{эк}}}{\delta} (t_{\text{c1}} - t_{\text{c2}})$$

$$q = \frac{0,088}{0,025} \cdot (150 - 100) = 352 \quad 2$$

**Задача 10.** Определить коэффициент теплоотдачи в поперечном потоке воздуха для трубы диаметром  $d = 20$  мм, если температура воздуха равна  $t_{\text{ж}} = 30^\circ\text{C}$ , скорость потока  $w = 5$  м/с, угол атаки равен  $\psi = 60^\circ$ .

### Решение

Определим коэффициент теплопроводности и кинематическую вязкость воздуха при температуре  $t_{\text{ж}}$ :

$$\lambda_{\text{ж}} = 0,0267 \text{ (Вт/м}\cdot\text{К)} \quad \nu_{\text{ж}} = 16,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Вычислим число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu_{\text{ж}}} \quad \text{Re}_{\text{ж}} = \frac{5 \cdot 0,02}{16 \cdot 10^{-6}} = 6250$$

При таком значении  $\text{Re}_{\text{ж}}$  дальнейшие расчёты проводятся по формуле:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,245 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,60} \quad \text{Nu}_{\text{ж}} = 0,245 \cdot 6250^{0,60} = 46,42$$

Отсюда коэффициент теплоотдачи будет равен:

$$\alpha = \text{Nu}_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d} \quad \alpha = 46,42 \cdot \frac{0,0267}{0,02} = 61,97 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$$

При учёте угла атаки получим следующий результат:

$$\alpha_{\psi} = \varepsilon_{\psi} \alpha \quad \varepsilon_{\psi} = 0,94 \quad \alpha_{\psi} = 0,94 \cdot 61,97 = 58,25 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$$

**Задача 11.** Определить коэффициент теплоотдачи в поперечном потоке воды для трубы диаметром  $d = 20$  мм, если температура воды равна  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$ , температура трубы  $t_{\text{с}} = 40^\circ\text{C}$ , а скорость потока  $w = 0,5$  м/с.

### Решение

Определим коэффициент теплопроводности, кинематическую вязкость, число Прандтля для воды при температуре  $t_{\text{ж}}$  и  $t_{\text{с}}$ :

$$\lambda_{\text{ж}} = 0,599 \text{ (Вт/м К)} \quad \cdot \quad \nu_{\text{ж}} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad \text{Pr}_{\text{ж}} = 7,02 \quad \text{Pr}_{\text{с}} = 4,31$$

Определим число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu_{\text{ж}}} \quad \text{Re}_{\text{ж}} = \frac{0,5 \cdot 0,02}{1,0 \cdot 10^{-6}} = 10000$$

Критерий Нуссельта определим по формуле:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,28 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,60} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,36} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{с}}} \right)^{0,25}$$

Подставим числовые значения и получим распределение температур внутри стенки:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,28 \cdot (10^4)^{0,6} \cdot 7,02^{0,36} \cdot \left( \frac{7,02}{4,31} \right)^{0,25} = 160$$

Средний коэффициент теплоотдачи определим по формуле:

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d} \quad \alpha = 60 \left( \frac{0,599}{0,02} \right) = 4790 \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

**Задание 12.** Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток на единицу длины в поперечном потоке воздуха трубы при следующих условиях: диаметр трубы  $d = 30$  мм; температура поверхности стенки трубы  $t_c = 80^\circ\text{C}$ ; температура воздуха  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$ ; скорость ветра  $w_{\text{ж}} = 5$  м/с.

### Решение

Определим коэффициент теплопроводности, кинематическую вязкость воздуха и критерий Прандтля при  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$  и  $t_c = 80^\circ\text{C}$  по [таблице](#)

$$\lambda_{\text{ж}} = 0,0259 \text{ Вт/(м}\cdot\text{C)} \quad \nu_{\text{ж}} = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad \text{Pr}_{\text{ж}} = 0,703 \quad \text{Pr}_c = 0,692$$

Определим число Рейнольдса  $Re$  для воздуха:

$$Re_{\text{ж}} = \frac{w_{\text{ж}} d}{\nu_{\text{ж}}} \quad Re_{\text{ж}} = \frac{5 \cdot 0,03}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 9960$$

В зависимости от величины  $Re$  выбираем критериальное уравнение для определения критерия  $Nu$ :

$$Nu_{\text{ж}} = 0,28 Re_{\text{ж}}^{0,60} Pr_{\text{ж}}^{0,36} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25} = \left( \frac{0,703}{0,692} \right)^{0,25} = 1,004 \approx 1$$

$$Nu_{\text{ж}} = 0,28 Re_{\text{ж}}^{0,60} Pr_{\text{ж}}^{0,36}$$

$$Nu_{\text{ж}} = 0,28 \cdot 9960^{0,60} \cdot 0,703^{0,36} = 61,80$$

Коэффициент теплоотдачи определим по формуле:

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d}$$

Подставим числовые значения:

$$\alpha = \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К} \frac{0,0259}{0,03} = 53,35$$

Тепловой поток с единицы длины трубы определим по формуле:

$$q_l = \alpha (t_c - t_{\text{ж}}) \pi d$$

Вычисления дают следующий результат:

$$q_l = \text{Вт/м} \cdot (80 - 20) \cdot 3,14 \cdot 0,03 = 302$$

**Задание 13.** Определить коэффициент теплоотдачи для восьмирядного коридорного пучка при диаметре  $d = 40$  мм, относительном расстоянии по ширине пучка  $x_1/d = 1,8$  и глубине  $x_2/d = 2,3$ . Средняя температура воздуха  $t_{\text{ж}} = 300^\circ\text{C}$ , средняя скорость в узком сечении  $w_{\text{ж}} = 10$  м/с и угол атаки  $\psi = 60^\circ$ .

### Решение

Определим коэффициент теплопроводности и кинематическую вязкость воздуха при  $t_{\text{ж}} = 300^\circ\text{C}$  по [таблице](#)

$$\lambda_{\text{ж}} = 0,046 \text{ (Вт/м}\cdot\text{К)} \quad \cdot \quad \nu_{\text{ж}} = 48,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Вычислим число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{w_{\text{ж}} d}{\nu_{\text{ж}}} \quad \text{Re}_{\text{ж}} = \frac{10 \cdot 0,04}{48,33 \cdot 10^{-6}} = 8276$$

При полученном числе Рейнольдса критерий Нуссельта определяем по формуле:

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,194 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,65} \quad \text{Nu}_{\text{ж}} = 0,194 \cdot 8276^{0,65} = 68,3$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи для труб третьего и всех последующих рядов равно:

$$\alpha' = \text{Nu}_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d} \quad \alpha' = 68,3 \cdot \frac{0,046}{0,04} = 78,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$$



Средний коэффициент теплоотдачи пучка труб при угле атаки  $\psi = 90^\circ$ :

$$\alpha_{\text{пуч}} = \frac{(0,6 + 0,9 + 6)\alpha'}{8} \quad \alpha_{\text{пуч}} = \frac{(0,6 + 0,9 + 6) \cdot 78,5}{8} = 73,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Внесём поправку на угол атаки. При  $\psi = 60^\circ$   $\varepsilon_\psi = 0,94$ :

$$\alpha'_{\text{пуч}} = \varepsilon_\psi \alpha_{\text{пуч}} \quad \alpha_{\text{пуч}} = \frac{73,6}{0,94} = 78,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

**Задание 14.** Определить коэффициент теплоотдачи провода электровоздухонагревателя при следующих условиях: диаметр провода  $d = 1,0$  см, максимально допустимая температура  $t_c = 90^\circ\text{C}$ ; скорость потока воздуха  $w_0 = 3,0$  м/с и его температура  $t_{\text{ж}} = 10^\circ\text{C}$ . Найти допустимую силу тока, если удельное сопротивление  $\rho = 0,04$  Ом·мм<sup>2</sup>/м.

### Решение

Определим коэффициент теплопроводности, кинематическую вязкость воздуха и критерий Прандтля при  $t_{\text{ж}} = 10^\circ\text{C}$  по [таблице](#)

$$\lambda_{\text{ж}} = 0,0251 \text{ Вт/(м}\cdot\text{C)} \quad \nu_{\text{ж}} = 14,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \quad \text{Pr}_{\text{ж}} = 0,705 \quad \text{Pr}_{\text{c}} = 0,69$$

Определим число Рейнольдса  $Re$  для воздуха:

$$Re_{\text{ж}} = \frac{w_0 d}{\nu_{\text{ж}}} \quad Re_{\text{ж}} = \frac{3 \cdot 0,01}{14,16 \cdot 10^{-6}} = 2120$$

В зависимости от величины  $Re$  выбираем критериальное уравнение для определения критерия  $Nu$ :

$$Nu_{\text{ж}} = 0,28 Re_{\text{ж}}^{0,60} Pr_{\text{ж}}^{0,36} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{c}}} \right)^{0,25} \quad \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{c}}} \right)^{0,25} = \left( \frac{0,705}{0,69} \right)^{0,25} = 1,005 \approx 1$$

$$Nu_{\text{ж}} = 0,28 Re_{\text{ж}}^{0,60} Pr_{\text{ж}}^{0,36}$$

$$Nu_{\text{ж}} = 0,28 \cdot 2120^{0,60} \cdot 0,705^{0,36} = 24,45$$

Коэффициент теплоотдачи определим по формуле:

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d}$$

Подставим числовые значения:

$$\alpha = \frac{34,45}{0,01} \cdot \frac{0,0251}{0,01} = 61,37 \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{С}$$

Определим допустимую силу тока  $I$  в проводе, приравняв тепловую мощность тока к тепловому потоку:

$$I^2 R = \alpha(t_c - t_{\text{ж}}) \pi d l \quad R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{4l}{\pi d^2} \quad I^2 \rho \frac{4l}{\pi d^2} = \alpha(t_c - t_{\text{ж}}) \pi d l$$

$$I = \sqrt{\frac{\alpha(t_c - t_{\text{ж}}) \pi^2 d^3}{4\rho}} = \frac{\pi d}{2} \sqrt{\frac{\alpha(t_c - t_{\text{ж}}) d}{\rho}}$$

Подставим числовые значения:

$$I = \frac{3,14 \cdot 0,01}{2} \cdot \sqrt{\frac{61,37 \cdot (90 - 10) \cdot 0,01}{4 \cdot 10^{-8}}} = 50$$