

2. Теплообмен при поперечном обтекании труб и пучков

6. Средний коэффициент теплоотдачи при обтекании одиночной трубы жидкостью или газом:

$$\text{при } Re_d = 40 \dots 10^3 \quad \overline{Nu} = 0,52 Re_d^{0,5} \cdot Pr^{0,37} \varepsilon_t \varepsilon_\varphi; \quad (4.19)$$

$$\text{при } Re_d = 10^3 \dots 2 \cdot 10^5 \quad \overline{Nu} = 0,26 Re_d^{0,6} \cdot Pr^{0,37} \varepsilon_t \varepsilon_\varphi; \quad (4.20)$$

$$\text{при } Re_d = 2 \cdot 10^5 \dots 10^7 \quad \overline{Nu} = 0,023 Re_d^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \varepsilon_t \varepsilon_\varphi. \quad (4.21)$$

$$\text{При нагревании жидкости} \quad \varepsilon_t = \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}; \quad (4.22)$$

$$\text{при охлаждении жидкости} \quad \varepsilon_t = \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,20} \quad (4.23)$$

Приведенные формулы используются при числах $Pr \geq 0,6$, ε_φ определяется в зависимости от угла атаки φ (угол между вектором скорости и осью трубы) по рис. 4.1.

В (4.19)—(4.21) определяющий размер — диаметр трубы d . Определяющая температура — средняя температура жидкости или газа — $\bar{t}_ж$ (кроме Pr_c). Скорость потока определяется по узкому поперечному сечению канала в безграничном потоке $w_{\text{опр}} = w_\infty$.

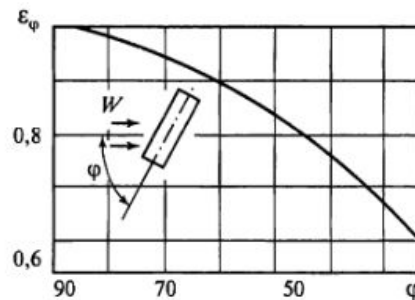
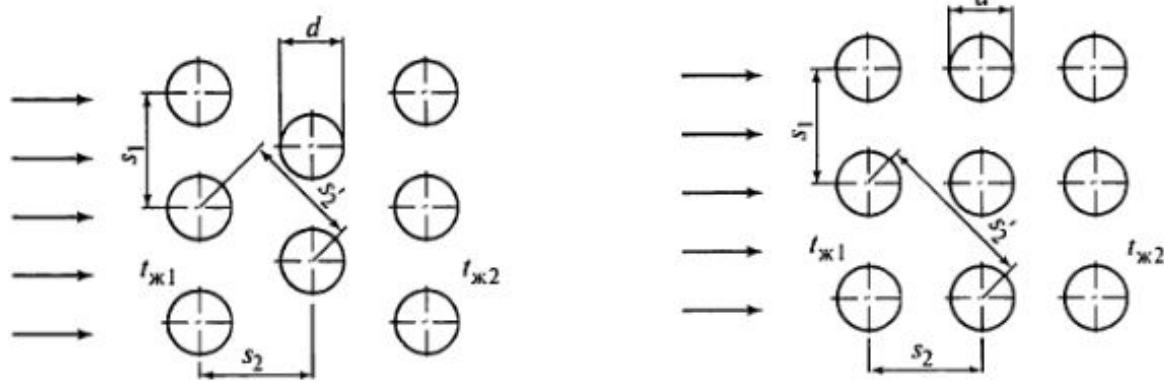


Рис. 4.1. Поправка на влияние угла атаки при поперечном обтекании трубы (пучка труб)



7. Средний коэффициент теплоотдачи трубы в глубинном (начиная с третьего ряда) ряду пучка при $\varphi = 90^\circ$, $10^3 < Re_d < 2 \cdot 10^5$: шахматный пучок (рис. 4.2)

$$\text{при } \frac{s_1}{s_2} < 2 \quad \overline{Nu} = 0,35 \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^{0,2} Re_d^{0,6} Pr^{0,36} \varepsilon_t; \quad (4.24)$$

$$\text{при } \frac{s_1}{s_2} > 2 \quad \overline{Nu} = 0,4 Re_d^{0,6} Pr^{0,36} \varepsilon_t; \quad (4.25)$$

коридорный пучок (рис. 4.3):

$$\overline{Nu} = 0,27 Re_d^{0,63} Pr^{0,36} \varepsilon_t. \quad (4.26)$$

8. Средний коэффициент теплоотдачи при обтекании всего пучка труб жидкостью или газом, $10^3 < Re_d < 2 \cdot 10^5$:

$$\overline{Nu}_{\text{пуч}} = \overline{Nu}_{\text{ж}} \varepsilon_\varphi \varepsilon_z. \quad (4.27)$$

В (4.27) $\overline{Nu}_{\text{ж}}$ определяется по (4.24)—(4.26), ε_φ — по рис. 4.1, ε_z находится в зависимости от числа рядов труб в пучке z по рис. 4.4.

В (4.24)—(4.27) s_1 — поперечный шаг; s_2 — продольный шаг труб в пучке. Определяющий размер — диаметр трубы d . Определяющая температура — средняя температура жидкости или газа

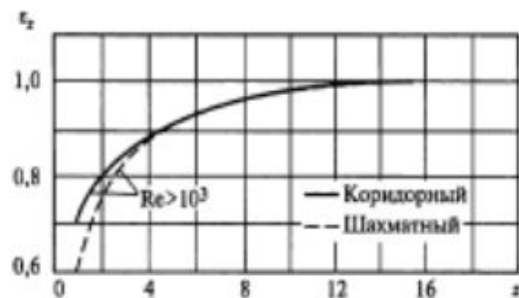


Рис. 4.4. Поправка на влияние числа рядов труб в пучке по ходу газа

$\bar{t}_{\text{ж}} = 0,5(t_{\text{ж1}} + t_{\text{ж2}})$ (кроме Pr_2). Скорость потока определяется в сечении, проходящем через оси поперечного ряда труб.

В теплообменнике «газ — газ» разреженный пучок труб омывается дымовыми газами. Температура набегающего потока $t_{\text{ж1}} = 800$ °С, а скорость $w_{\infty} = 15$ м/с. Для газов, протекающих внутри труб, $t_{\text{ж2}} = 300$ °С и $\alpha_2 = 90$ Вт/(м² · К). Трубы диаметром и толщиной стенки $d_2 \times \delta = 32 \times 5$ мм изготовлены из стали 12Х1МФ, допустимая рабочая температура которой 550 °С. Найдите среднюю температуру наружной поверхности трубы и температуру в первой критической (лобовой) точке и сопоставьте найденные значения с допустимой рабочей температурой стали.

Решение. При $t_{ж1} = 800$ °С для дымовых газов $\lambda = 0,0915$ Вт/(м·К); $\nu = 131,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $Pr = 0,60$. Расчет теплоотдачи проводим по формулам, справедливым при обтекании одиночной трубы. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{15 \cdot 0,032}{131,8 \cdot 10^{-6}} = 3641.$$

Среднее число Нуссельта

$$\overline{Nu} = 0,26 \cdot 3641^{0,6} \cdot 0,6^{0,37} = 29,4,$$

и коэффициент теплоотдачи

$$\overline{\alpha}_1 = 29,4 \frac{0,0915}{0,032} = 84,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Вычисляем число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи в первой критической точке трубы ($\varphi = 0$):

$$Nu = 1,14 \cdot 3641^{0,5} \cdot 0,60^{0,37} = 56,9;$$

$$\alpha = 56,9 \frac{0,0915}{0,032} = 162,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Теплопроводность стали $\lambda = 40$ Вт/(м·К). Средняя плотность теплового потока

$$\overline{q} = \frac{800 - 300}{\frac{1}{90} + \frac{0,005}{40} + \frac{1}{84,2}} = 21\,645 \text{ Вт/м}^2.$$

Местная плотность теплового потока при $\varphi = 0$

$$q = \frac{800 - 300}{\frac{1}{90} + \frac{0,005}{40} + \frac{1}{162,7}} = 28\,825 \text{ Вт/м}^2.$$

Средняя температура стенки

$$\overline{t}_c = 800 - \frac{21\,645}{84,2} = 543 \text{ °С}.$$

Температура стенки в критической точке

$$t_c = 800 - \frac{28\,825}{162,7} = 623 \text{ °С}.$$

Ответ. Средняя температура стенки трубы меньше, а температура в лобовой точке больше допустимой.

Найдите средний коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании дымовыми газами пакета труб экономайзера парового котла. Экономайзер собран из плоских змеевиков с шахматным расположением труб диаметром и толщиной стенки 32×6 мм, причем $s_1/d = 2,4$, а $s_2/d = 1,8$, а число рядов равно 40. Скорость газов в узком сечении $w_{уз} = 14$ м/с. Их температура на входе в пакет труб 520 °С, а на выходе из него 380 °С.

Как изменится α в задаче, если шахматный порядок расположения труб заменить коридорным?

ТЕПЛООБМЕН В ТРУБАХ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. Вязкостный режим — $Re < 2300$, $(Gr Pr) \leq 3 \cdot 10^5$, стабилизированное течение.

А. $t_c = \text{const}$ и постоянные свойства жидкости (по $\bar{t}_ж$).

1) Начальный термический участок:

$$l_{н.т} = 0,055Pe d. \quad (5.1)$$

2) Местная теплоотдача при $\left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d}\right) \leq 0,03$:

$$Nu_{0x} = 1,03 \left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d}\right)^{-1/3}. \quad (5.2)$$

3) Средняя по длине теплоотдача при $\left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d}\right) \leq 0,05$:

$$\overline{Nu}_{0l} = 1,55 \left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d}\right)^{-1/3}. \quad (5.3)$$

4) Стабилизированный теплообмен ($x \geq l_{н.т}$):

$$Nu_0 = Nu_\infty = 3,66. \quad (5.4)$$

Б. $t_c = \text{const}$ и переменные свойства капельной жидкости ($0,07 \leq \mu_c/\mu_ж \leq 1500$).

5) Местная $\left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \leq 0,01\right)$, средняя $\left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \leq 0,05\right)$ и стабилизированная ($x \geq l_{н.т}$) теплоотдача:

$$Nu/Nu_0 = \left(\frac{\mu_c}{\mu_ж}\right)^{-0,14}, \quad (5.5)$$

где Nu_0 вычисляется соответственно по формулам (5.2)—(5.4), а входящие во все критерии подобия свойства жидкости выбирают по $\bar{t} = 0,5(t_c + \bar{t}_ж)$.

В. $q_c = \text{const}$ и постоянные свойства жидкости (по $\bar{t}_ж$).

6) Начальный термический участок:

$$l_{н.т} = 0,07 \text{ Pe } d. \quad (5.6)$$

7) Местная теплоотдача при любых значениях $\left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right)$:

$$\text{Nu}_{0,x} = 4,36 + 1,31 \left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right)^{-1/3} \exp\left(-13 \sqrt{\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}}\right). \quad (5.7)$$

8) Средняя теплоотдача при $\left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right) \leq 0,07$:

$$\overline{\text{Nu}}_{0,l} = 1,5 \text{ Nu}_{0,x=l}, \quad (5.8)$$

где $\text{Nu}_{0,x=l}$ рассчитывают по (5.7).

9) Стабилизированный теплообмен при $\left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right) \geq 0,04$:

$$\text{Nu}_0 = \text{Nu}_\infty = 4,36. \quad (5.9)$$

Г. $q_c = \text{const}$ и переменные свойства капельной жидкости ($0,04 \leq \mu_c / \mu_ж \leq 1$).

10) Местная теплоотдача $\left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right) \leq 0,04$:

$$\text{Nu}_x / \text{Nu}_{0,x} = (\mu_c / \mu_ж)^{-1/6}, \quad (5.10)$$

где $\text{Nu}_{0,x}$ определяют по (5.7), а свойства жидкости — по $\bar{t} = 0,5 (t_c + \bar{t}_ж)$.

11) Стабилизированный теплообмен ($x \geq l_{н.т}$):

$$\text{Nu}_\infty = 4,36 \left(\frac{\mu_c}{\mu_ж}\right)^{-0,14}. \quad (5.11)$$

2. Вязкостно-гравитационный режим — $\text{Re} < \text{Re}_{\text{кр}1}$, $(\text{Gr}_q \text{Pr}) > 3 \cdot 10^5$, стабилизированное течение (свойства выбирают по $t_ж$).

А. Горизонтальная труба.

12) Критическое число Рейнольдса

$$\text{Re}_{\text{кр}1} = 2300 + 1740 \ln(1 + 10^{-4} \text{Gr}_q \text{Pr}), \quad (5.12)$$

где $\text{Gr}_q = \frac{g \beta d^4 q}{\nu^2 \lambda}$; $\text{Gr}_q \text{Pr} \leq 10^8$; $0,6 \leq \text{Pr} \leq 10$.

13) Средняя по окружности теплоотдача ($q_c = \text{const}$ или $t_c = \text{const}$) при $\left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right) \geq 4 \cdot 10^{-4}$ ($50 < \text{Re} < \text{Re}_{\text{кр}1}$; $\text{Gr}_q \text{Pr} < 4 \cdot 10^7$; $0,6 \leq \text{Pr} \leq 10$):

$$\frac{\overline{\text{Nu}}_x}{\text{Nu}_{0x}} = [1 + (\text{Gr}_q \text{Pr} / B)^4]^{0,045}, \quad (5.13)$$

где Nu_{0x} находят по формуле (5.7),

$$B = 5 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right)^{-1} \quad \text{при} \quad \left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right) \leq 1,7 \cdot 10^{-3};$$

$$B = 1,8 \cdot 10^4 + 55 \left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right)^{-1,7} \quad \text{при} \quad \left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right) > 1,7 \cdot 10^{-3}.$$

Замечание. В рассматриваемом случае при нагревании локальная теплоотдача в нижней точке окружности примерно в 4 раза больше теплоотдачи в верхней ее точке; при охлаждении — наоборот.

При значениях $\left(\frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d}\right) \geq 1$ формула (5.13) преобразуется к виду:

$$\overline{\text{Nu}}_x = 4,36 \left[1 + \left(\frac{\text{Gr}_q \text{Pr}}{1,8 \cdot 10^4} \right)^4 \right]^{0,045} \quad (5.13a)$$

Б. Вертикальная труба (при течении жидкости снизу вверх и ее нагревании или при течении сверху вниз при охлаждении жидкости).

14) Осевое расстояние для верхней границы нарушения устойчивости вязкостно-гравитационного течения:

$$\frac{1}{\text{Re}_{\text{кр}1} \text{Pr}} \frac{x_{\text{кр}}}{d} = 1,29 \left(\frac{\text{Gr}_q}{\text{Re}} \right)^{-0,8}, \quad (5.14)$$

где $\text{Re}_{\text{кр}1}$ определяется по (5.12).

15) Местная теплоотдача при $3 \cdot 10^{-4} < \frac{1}{\text{Pe}} \frac{x}{d} < \frac{1}{\text{Re}_{\text{кр}1} \text{Pr}} \frac{x_{\text{кр}}}{d}$, $250 < \text{Re} < 2 \cdot 10^3$, $\text{Gr}_q / \text{Re} < 2,6 \cdot 10^4$ и $0,6 \leq \text{Pr} \leq 10$:

$$\frac{\text{Nu}_x}{\text{Nu}_{0x}} = \left(1 + \frac{\text{Gr}}{\text{Re} B} \right)^{0,27}, \quad (5.15)$$

где Nu_{0x} находят по формуле (5.7),

$$B = 5,4 \left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1} + 312 \left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{1/4} \quad \text{при} \quad \left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right) \leq 0,07;$$

$$B = 240 \quad \text{при} \quad \left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right) > 0,07.$$

3. Турбулентный режим — $Re > 4 \cdot 10^3$, $Gr_q < 10^7$ (свойства по $\bar{t}_ж$).

16) Стабилизированный теплообмен $x/d \geq 20$ ($l_{н.т} \approx 20d$).

A. Для газов и капельных жидкостей.

Формула Михеева

$$Nu_{\infty} = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \varepsilon_t, \quad (5.16)$$

где $\varepsilon_t = \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}$

Формула Петухова

$$Nu_{\infty} = \frac{\frac{\xi}{8} Pe}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} \varepsilon_t, \quad (5.17)$$

где

$$\xi = [0,79 \ln (Re/8)]^{-2}, \text{ свойства по } \bar{t}_ж;$$

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \right)^{-n} \quad \text{— для капельной жидкости } (n = 0,11 \text{ при нагревании};$$

$n = 0,25$ при охлаждении);

$$\varepsilon_t = \left(\frac{T_c}{T_{ж}} \right)^{-n} \quad \text{— для газов } [n = 0,36 \text{ при охлаждении}; n = 0,5 \text{ при}$$

нагревании в области $0,4 \leq (T_c/T_{ж}) \leq 4$].

Б. Для газов и капельных жидкостей в кольцевом канале ($Pr = 0,7 \dots 100$):

на внутренней стенке ($1,2 \leq d_2/d_1 \leq 14$)

$$Nu_{d_{\text{экв}}} = 0,017 Re_{d_{\text{экв}}}^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,18} \varepsilon_l; \quad (5.18)$$

на внешней стенке ($0 \leq d_1/d_2 \leq 1$)

$$Nu_{d_{\text{экв}}} / Nu_{\infty d_{\text{экв}}} = 1 - \frac{0,45}{2,4 + Pr} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^{0,6}, \quad (5.19)$$

где $d_{\text{экв}} = d_2 - d_1$; ε_l — смотри экспликацию к формуле (5.16); $Nu_{\infty d_{\text{экв}}}$ определяют по (5.16).

В. Для жидких металлов в круглой трубе ($Pr = 0,001 \dots 0,1, l_{\text{н.т}} \rightarrow 0$,

свойства выбираются по $\frac{t_c + t_j}{2}$):

при $q_c = \text{const}$

$$Nu_{\infty} = 7 + 0,025 Pe^{0,8}; \quad (5.20)$$

при $t_c = \text{const}$

$$Nu_{\infty} = 5 + 0,025 Pe^{0,8}. \quad (5.21)$$

17) Средняя по длине теплоотдача ($Pr = 0,5 \dots 200$)

$$\overline{Nu}_l = Nu_{\infty} \varepsilon_l, \quad (5.22)$$

где Nu_{∞} рассчитывают по (5.16) или (5.17), $\varepsilon_l = 1 + \frac{2}{l/d}$ при $\frac{l}{d} < 50$

и $\varepsilon_l = 1$ при $\frac{l}{d} \geq 50$.

4. Турбулентная смешанная конвекция в горизонтальной трубе

при $q_c = \text{const}$ (нагрев), $Gr_q = 10^7 \dots 10^{10}$, $Re = (0,6 \dots 20) 10^4$, $Pr = 0,7 \dots 8$, $x/d = 20 \dots 100$.

18) На нижней образующей

$$\frac{Nu_{\pi}}{Nu_{\infty}} = 1 + 0,035 \left(\frac{Gr_q}{Gr_{q_{пп}}} \right)^{0,43} \quad (5.23)$$

19) На верхней образующей

$$\frac{Nu_{\pi}}{Nu_{\varphi=0}} = \left[1 + \left(\frac{Gr_q}{Gr_{q_{пп}}} \right)^3 \right]^{0,048}, \quad (5.24)$$

где Nu_{∞} находят по (5.17),

$$Gr_{q_{пп}} = 3 \cdot 10^{-5} Pr^{0,5} Re^{2,75} [1 + 2,4(Pr^{2/3} - 1) Re^{1/8}].$$

Замечание. Влияние турбулентной смешанной конвекции на средний коэффициент теплоотдачи в указанной области изменения определяющих критериев не превышает 15...20 %, хотя при $Gr_q \approx 10^{10}$ отношение $Nu_{\pi}/Nu_{\varphi=0} \approx 2...3$ в зависимости от числа Re.

Рассчитайте средний коэффициент теплоотдачи при течении трансформаторного масла по трубке диаметром $d = 8$ мм и длиной $l = 1,2$ м. Температура стенки $\bar{t}_c = 60$ °С, а $\bar{t}_ж = 40$ °С. Скорость течения масла $w = 0,6$ м/с.

Решение. При средней температуре $t = 0,5(\bar{t}_ж + \bar{t}_c) = 50$ °С для трансформаторного масла $\nu = 7,58 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 0,108$ Вт/(м·К); $a = 6,80 \cdot 10^{-8}$ м²/с; $Pr = 111$; $\beta = 7,05 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹. При $\bar{t}_c = 60$ °С $\mu_c = 49,5 \cdot 10^{-4}$ Па·с, при $\bar{t}_ж = 40$ °С $\mu_ж = 89,4 \cdot 10^{-4}$ Па·с.

Для определения режима течения масла находим число Рейнольдса:

$$Re = \frac{0,6 \cdot 0,008}{7,58 \cdot 10^{-6}} = 633.$$

Режим течения масла в трубке ламинарный. Для того чтобы установить, оказывает ли влияние на теплоотдачу свободная конвекция, вычисляем число Рэлея:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta t d^3}{\nu^2} Pr = \frac{9,81 \cdot 7,05 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \cdot 0,008^3}{(7,58 \cdot 10^{-6})^2} 111 = 1,2 \cdot 10^5.$$

Так как $Ra < 3 \cdot 10^5$, то влияние свободной конвекции мало и режим течения масла вязкостный. Вычисляем комплекс:

$$\frac{1}{Re} \frac{l}{d} = \frac{1}{633 \cdot 111} \frac{1,2}{0,008} = 2,13 \cdot 10^{-3}.$$

Находим среднее число Нуссельта и $\bar{\alpha}$:

$$\overline{Nu} = 1,55 \left(\frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \right)^{-0,14} = 1,55 (2,13 \cdot 10^{-3})^{-1/3} \left(\frac{49,5}{89,4} \right)^{-0,14} = 13,08 ;$$

$$\bar{\alpha} = 13,08 \frac{0,108}{0,008} = 176 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Ответ. Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha} = 176 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

В трубе диаметром $d = 14$ мм движется вода. Ее средняя температура $t_{ж} = 50$ °С, а число $Re = 1500$. Вычислите отношение $l_{н.т}/d$ и значение α за пределами $l_{н.т}$. Физические свойства воды считайте постоянными, $t_c = \text{const}$.

Найдите средний коэффициент теплоотдачи при движении дымовых газов по трубам воздухоподогревателя парового котла. Средняя температура дымовых газов $t_{ж1} = 265$ °С, а средняя температура воздуха $t_{ж2} = 145$ °С. Трубы стальные, их внутренний диаметр $d = 50$ мм, толщина стенки $\delta = 1,5$ мм. Коэффициент теплоотдачи от стенок труб к воздуху $\alpha_2 = 76$ Вт/(м² · К). Скорость дымовых газов составляет 14 м/с.

Определить коэффициент теплоотдачи в первой ступени теплообменного аппарата атомного реактора. Средняя скорость теплоносителя ($Na-25\%$, $K-75\%$) $W=5\text{ м/с}$, средняя температура $t=400^\circ\text{C}$. Диаметр трубы, по которой течет теплоноситель, равен $d=30\text{ мм}$. Тепловой поток по длине трубы принять постоянным.

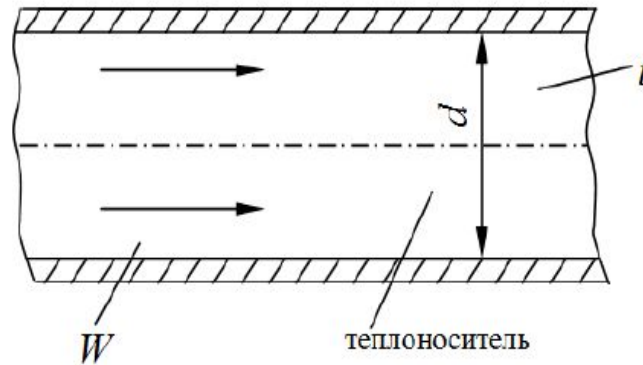
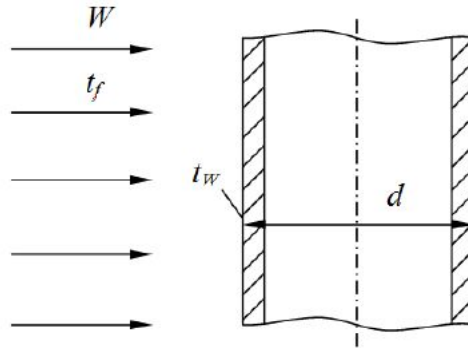


Рисунок 2.14

Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток на единицу длины в поперечном потоке воздуха для трубы $d = 36$ мм, если температура ее поверхности $t_w = 80$ °C, температура воздуха $t_f = 20$ °C и скорость $W = 5$ м/с. Параметры воздуха при $t_f = 20$ °C: коэффициент теплопроводности $\lambda_f = 2,593 \cdot 10^{-2}$ Вт/м·град, коэффициент кинематической вязкости $\nu_f = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с.



Для теплообменного устройства определить коэффициент теплоотдачи от горячего воздуха, протекающего по коробу квадратного сечения ($\ell = 500$ мм), к стенкам труб, по которым протекает вода. Средняя по длине температура воздуха в устройстве $t_f = 600$ °С, длина устройства 4 м, средняя скорость воздуха $W = 18$ м/с, расстояние между центрами труб $S_1 = S_2 = 150$ мм, диаметр трубы $d = 75$ мм, количество труб – 9.

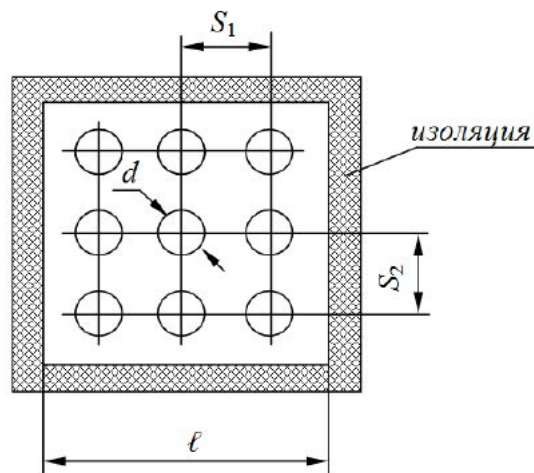


Рисунок 2.17

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ