

ТЕПЛОМАССООБМЕН

Задачи.

**Конвективный
теплообмен**

№ 3

2016 год

- **Пример № 1.**

Рассчитать коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от стенки трубы подогревателя воды. Длина трубы $l = 2$ м, внутренний диаметр трубы $d_{\text{вн}} = 16$ мм, скорость течения воды $v_{\text{ж}} = 0,995$ м/с, средняя температура воды $t_{\text{ж}} = 40$ °С, а стенки трубы $t_{\text{с}} = 100$ °С. Теплофизические свойства воды [1] при $t_{\text{ж}} = 40$ °С: $\lambda_{\text{ж}} = 0,634$ Вт/(м·К); $\nu_{\text{ж}} = 0,659 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\text{Pr}_{\text{ж}} = 4,3$; $\text{Gr} = 20,72 \cdot 10^6$; при $t_{\text{с}} = 100$ °С $\text{Pr}_{\text{с}} = 1,75$.

1.Теплотехнические расчеты промышленных печей.

Мастрюков Б.С. – М.: Изд-во «Металлургия», 1972. – 368 с.

Решение.

- Рассчитаем значение число Рейнольдса:

$$Re_{\text{ж}} = \frac{\overline{w}_{\text{ж}} \cdot d_{\text{вн}}}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{0,995 \cdot 0,016}{0,659 \cdot 10^{-6}} = 2,42 \cdot 10^4.$$

Поскольку $Re_{\text{ж}} > 10^4$, режим течения жидкости турбулентный, поэтому воспользуемся формулой

$$Nu_c = c \left(Re_{\text{г}} \cdot Pr_{\text{г}} \cdot \frac{d}{l} \right)^m \cdot \left(Gr_{\text{г}} \cdot Pr_{\text{г}} \cdot \frac{d}{l} \right)^n$$

и приложением 4 для определения числа Нуссельта

$$Nu = 0,21 \cdot \left(2,42 \cdot 10^4 \cdot 4,3 \cdot \frac{0,016}{2,0} \right)^{0,8} \cdot \left(0,31 \cdot 10^7 \cdot 4,3 \cdot \frac{0,016}{2,0} \right)^{0,07} = 102,5$$

- Определим коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d} = 102,5 \cdot \frac{0,634}{0,016} = 4061,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

- Отношение $\frac{l}{d_{\text{вн}}} > 50,$

следовательно, $\alpha = \bar{\alpha}$ и тепловой поток находим по уравнению

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

$$Q = 4061,6 \cdot 3,14 \cdot 0,016 \cdot 2,0 \cdot (100 - 40) = 24487 \text{ Вт}.$$

- **Пример № 2.**

- Для отопления гаража используют трубу, в которой протекает горячая вода. Рассчитать коэффициент теплоотдачи и конвективный тепловой поток, если размеры трубы $d_{\text{н}} = 0,1$ м, $l_{\text{тр}} = 10$ м, а температура стенки трубы $t_{\text{с}} = 85$ °С и воздуха $t_{\text{ж}} = 20$ °С.

- **Литература:**

1.Теплотехнические расчеты промышленных печей.

Мастрюков Б.С. – М.: Изд-во «Металлургия», 1972. – 368 с.

Решение.

Средняя температура стенки: $\bar{t}_{\text{ст}} = \frac{t_{\text{ж}} + t_{\text{с}}}{2} = \frac{85 + 20}{2} = 52,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$

Теплофизические свойства воздуха при средней температуре [1]:

$$\lambda_{\text{в}} = 2,84 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$\nu_{\text{в}} = 18,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\text{Pr}_{\text{в}} = 0,697;$$

Определим коэффициент объемного расширения

$$\beta = 1/T = 1/(273 + 52,5) = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}.$$

1. Определим безразмерное число Грасгофа

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_c - t_{ж}) \cdot d^3}{\nu^2}$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} (85 - 20) \cdot (0,1)^3}{(18,2 \cdot 10^{-6})^2} = 5,97 \cdot 10^6.$$

- 2. По значению произведения

$$Gr \cdot Pr = 5,97 \cdot 10^6 \cdot 0,697 = 4,16 \cdot 10^6$$

- в табл. 1 находим значение коэффициента $c = 0,54$ и показателя степени $n = 0,25$.
- Определим критерий Нуссельта по формуле:

$$\overline{Nu} = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n = 0,54 \cdot (4,16 \cdot 10^6)^{0,25} = 24,4.$$

- Вычисляем коэффициент конвективной теплоотдачи по формуле:

$$\overline{\alpha} = \overline{Nu} \cdot \frac{\lambda}{d_H} = 24,4 \cdot \frac{2,84 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 6,93 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

- 3. Определяем конвективный тепловой поток находим по уравнению:

$$Q = \bar{\alpha} \cdot F \cdot (t_c - t_{\text{ж}}) = \alpha \cdot \pi \cdot d_{\text{н}} \cdot l_{\text{тр}} \cdot (t_c - t_{\text{ж}})$$

$$Q = 6,93 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot (85 - 20) = 1415 \text{ Вт.}$$

- **Пример № 3.**
- Вычислить потери тепла в единицу времени с 1 м^2 поверхности пода, свода и боковых стен лабораторной электропечи сопротивления; размеры кожуха составляют $0,6 \times 0,5 \times 0,75 \text{ м}$. Температура кожуха $t_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, температура воздуха в помещении $t_b = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение.

- 1. Плотность теплового потока на наружной поверхности печи определим из уравнения:

$$q = \alpha \cdot (t_c - t_{\text{ж}})$$

- При заданных значениях температур на поверхности кожуха и окружающей среды вдали от стенки решение задачи сводится к определению коэффициента теплоотдачи.

□ **Коэффициент теплоотдачи при свободном движении жидкости** определяем по формуле

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n,$$

□ а коэффициент и показатель степени из таблицы 1.

- В рассматриваемой задаче определяющая температура для всех поверхностей °C,

$$\bar{t} = \frac{t_{\text{ж}} + t_{\text{с}}}{2} = \frac{80 + 20}{2} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

- При этой температуре для воздуха:

$$\square \nu_{\text{в}} = 17,95 \cdot 10^{-6};$$

$$\square \lambda_{\text{в}} = 2,83 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)};$$

$$\square \text{Pr} = 0,698;$$

$$\square \beta = 1/(\text{ } + 273) = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}.$$

- За определяющий размер при расчете коэффициента теплоотдачи свободной конвекцией боковых стен принимается их высота $H = 0,5$ м, при расчете коэффициента теплоотдачи свода и пода – наименьшая сторона $a = 0,6$ м (рисунок).

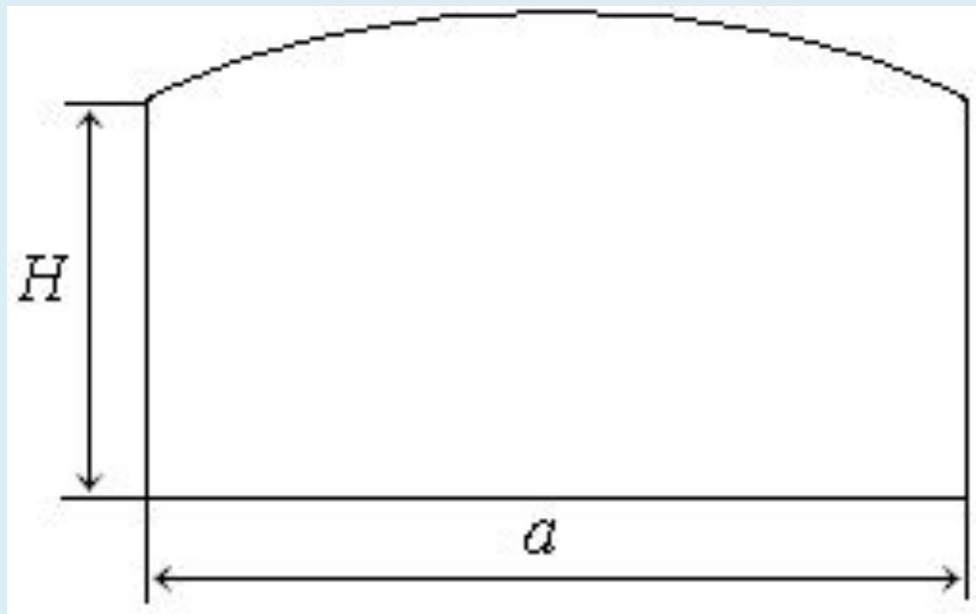


Рисунок. **Вид с торца лабораторной электропечи**
высота $H = 0,5$ м; ширина $a = 0,6$ м; длина $b = 0,75$ м

- 2. Значение комплекса $(Gr \cdot Pr)$ **для боковых стен** определим из равенства

$$(Gr \cdot Pr) = \frac{g \cdot H^3}{\nu_B^2} \beta \cdot \Delta t \cdot Pr$$

$$(Gr \cdot Pr) = \frac{9,81 \cdot (0,5)^3}{(17,95 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 0,698 = 4,94 \cdot 10^8.$$

- По полученному значению комплекса $(Gr \cdot Pr)$ в таблице 1 находим значение коэффициента $c = 0,135$ и показателя степени $n = 0,333$.

- 3. Определим *коэффициент теплоотдачи для вертикальных стен*, Вт/(м²·град)

$$\overline{Nu} = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n.$$

$$\overline{Nu} = 0,135 \cdot (4,94 \cdot 10^8)^{0,333} = 106.$$

- Вычисляем коэффициент конвективной теплоотдачи для вертикальных стен по формуле:

$$\overline{\alpha} = \overline{Nu} \cdot \frac{\lambda_{\text{в}}}{H} = 106 \cdot \frac{2,83 \cdot 10^{-2}}{0,5} = 6,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

- 4. Значение комплекса $(Gr \cdot Pr)$ *для горизонтальных стен* определим из равенства

$$(Gr \cdot Pr) = \frac{g \cdot a^3}{\mathbf{v}_B^2} \beta \cdot \Delta t \cdot Pr$$

$$(Gr \cdot Pr) = \frac{9,81 \cdot (0,6)^3}{(17,95 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 3,1 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 0,698 = 8,54 \cdot 10^8.$$

- По полученному значению комплекса $(Gr \cdot Pr)$ в таблице 1 находим значение коэффициента $c = 0,135$ и показателя степени $n = 0,333$.

- 5. Определим *коэффициент теплоотдачи для горизонтальных стен*, Вт/(м²·град)

$$\overline{Nu} = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n.$$

$$\overline{Nu} = 0,135 \cdot (8,54 \cdot 10^8)^{0,333} = 127.$$

- Вычисляем коэффициент конвективной теплоотдачи для вертикальных стен по формуле:

$$\overline{\alpha} = \overline{Nu} \cdot \frac{\lambda_{\text{в}}}{a} = 127 \cdot \frac{2,83 \cdot 10^{-2}}{0,6} = 6,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

- 6. Поскольку теплоотдающая поверхность свода обращена кверху, полученное значение коэффициента теплоотдачи следует увеличить на 30 %, т.е. $\alpha_{\text{св}} = 1,3 \cdot 6,0 = 7,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а теплоотдающая поверхность пода обращена к низу, поэтому полученное значение коэффициента теплоотдачи следует уменьшить на 30%, т.е. $\alpha_{\text{под}} = 0,7 \cdot 6,0 = 4,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

□ 7. Вычислим плотности теплового потока по формуле:

$$q = \alpha \cdot (t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}).$$

□ Со свода печи:

$$q_{\text{св}} = 7,8 \cdot (80 - 20) = 468 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

□ С боковых поверхностей

$$q_{\text{бок.ст}} = 6,0 \cdot (80 - 20) = 360 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

□ С пода печи

$$q_{\text{под}} = 4,2 \cdot (80 - 20) = 252 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

- **Пример № 4.**

- Определить коэффициент теплоотдачи и количество переданной теплоты при течении воды в горизонтальной трубе диаметром $d = 0,008$ м и длиной, $l = 6$ м, если скорость течения воды $w = 0,1$ м/с; температура воды $t_{\text{ж}} = 80$ °С; температура стенки трубы $t_{\text{ст}} = 20$ °С.

Решение.

- Теплофизические свойства воды при $t_{\text{ж}} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$:
 - $\lambda_{\text{ж}} = 0,675 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
 - $\nu_{\text{ж}} = 0,365 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
 - $\beta_{\text{ж}} = 6,32 \cdot 10^{-4} \text{ (1/К)}$
 - $\text{Pr}_{\text{ж}} = 2,21$.
- При температуре стенки $T_{\text{ст}} = 293 \text{ К}$: $\text{Pr}_{\text{ст}} = 7,02$.
- При этих значениях рассчитаем число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ж}d} = \frac{w \cdot d}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{0,1 \cdot 0,008}{0,365 \cdot 10^{-6}} = 2190.$$

- Значение критерия Нуссельта определим из уравнения:

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = 0,15 \cdot Re_{\text{жд}}^{0,33} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} \cdot Gr_{\text{жд}}^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25}.$$

$$Re_{\text{жд}}^{0,33} = 13,2$$

$$Pr_{\text{ж}}^{0,43} = 1,4$$

$$\left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} = 0,75$$

- Температурный напор $\Delta t = t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}} = 60^{\circ}.$

- Число Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) \cdot d^3}{\nu^2}$$

$$Gr = \frac{9,81 \cdot 6,32 \cdot 10^{-4} \cdot 60 \cdot (0,008)^3}{(0,365 \cdot 10^{-6})^2} = 1,43 \cdot 10^6.$$

$$Gr_{\text{жд}}^{0,1} = 4,12$$

- Находим значение критерия Нуссельта

$$\overline{Nu}_{jd} = 0,15 \cdot 13,2 \cdot 1,4 \cdot 4,12 \cdot 0,75 = 8,56.$$

- Откуда

$$\alpha = \overline{Nu}_{jd} \cdot \frac{\lambda_{ж}}{d} = 8,56 \cdot \frac{0,675}{0,008} = 724 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Поправку на длину трубы вводить не следует, так как $\frac{l}{d} > 50$

- Количество передаваемой теплоты через всю трубу

$$Q = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot (t_{ж} - t_{ст})$$

$$Q = 724 \cdot 3,14 \cdot 0,008 \cdot 6 \cdot 60 = 6540 \text{ Вт.}$$

- **Пример № 5.**

- Определить коэффициент теплоотдачи α воздуха, протекающего со скоростью $w = 10$ м/с, стенке прямой трубы диаметром $d = 0,1$ м и длиной, $l = 2$ м. Средняя температура воздуха $t_{\text{ж}} = 120$ °С.

Решение.

- Теплофизические свойства воздуха при средней температуре $t_{\text{ж}} = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

□ $\lambda_{\text{ж}} = 0,0334 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;

□ $\nu_{\text{ж}} = 25,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;

- При этих условиях рассчитаем число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{жд}} = \frac{w_{\text{ж}} \cdot d}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{10 \cdot 0,1}{25,45 \cdot 10^{-6}} = 39200.$$

- Значение критерия Нуссельта определим из уравнения:

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = 0,018 \text{Re}_{\text{жд}}^{0,8}.$$

$$\text{Re}_{\text{жд}}^{0,8} = 4730$$

- Подставляя значение в уравнение, получаем:

$$\overline{Nu}_{\text{жд}} = 0,018 \cdot 4730 = 85,2.$$

- Откуда

$$\alpha = \overline{Nu}_{\text{жд}} \cdot \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d} = 85,2 \cdot \frac{0,0334}{0,1} = 28,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Так как $\frac{l}{d} = \frac{2}{0,1} = 20 < 50$, то необходимо ввести поправку

$\overline{\epsilon}_l$ взятую из таблицы.

Таблица

l/d	1	4	5	10	15	20	30	40	50
$\overline{\epsilon}_l$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

С поправкой коэффициент теплоотдачи равен:

$$\alpha_{\text{д}} = \alpha \cdot \overline{\epsilon}_l = 28,4 \cdot 1,13 = 32,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$