

Теплопередача через многослойную плоскую стенку.

От дымовых газов с температурой t_g , через плоскую стенку котла передается тепло кипящей воде с температурой $t_{вд}$. Используя значения коэффициентов теплоотдачи от газов к стенке котла α_1 и от стенки котла к воде α_2 , требуется:

п.1 Определить термические сопротивления, коэффициенты теплопередачи, эквивалентные коэффициенты теплопроводности и удельные тепловые потоки q через 1 м^2 стенки для следующих случаев:

1.1. стенка стальная, совершенно чистая толщиной δ_2 , теплопроводностью λ_2 .

1.2. стенка медная, совершенно чистая, такой же толщины δ_2 , как в п.1.1. теплопроводностью $\lambda'_2 = 300 \text{ Вт/мК}$;

1.3. стенка стальная по п.1.1., но стороны воды покрыта слоем накипи толщиной δ_3 , теплопроводностью λ_3

1.4. стенка стальная по п.1.3., но поверх накипи имеется слой масла толщиной δ_4 , теплопроводностью $\lambda_4 = 0.1 \text{ Вт/мК}$

1.5. стенка стальная по п.1.4., но со стороны газов стенка покрыта слоем сажи толщиной δ_1 , теплопроводностью λ_1

п.2 Приняв количество тепла q , передаваемого по п.1.1. за 100%, подсчитать в процентах значения тепловых потоков для остальных случаев пп.1.2., 1.3., 1.4., 1.5.

п.3 Определить аналитически и графически температуры поверхностей раздела отдельных слоев стенки для п.1.5.

п.4 Построить линию падения температуры в многослойной плоской стенке по п.1.5.

п.5 Сделать выводы по результатам расчетов.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} t_g &= 1050 \text{ }^\circ\text{C}; & t_{вд} &= 115 \text{ }^\circ\text{C}; & \lambda_2 &= 42 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}; \\ \alpha_1 &= 60 \text{ Вт/м}^2\text{К}; & \delta_2 &= 4 \text{ мм}; & \lambda_3 &= 1,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}; & \delta_1 &= 0,6 \text{ мм}; \\ \alpha_2 &= 2300 \text{ Вт/м}^2\text{К}; & \lambda_1 &= 0,25 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}; & \delta_3 &= 0,95 \text{ мм}; & \delta_4 &= 0,4 \text{ мм} \end{aligned}$$

Решение

п.1. Определение термических сопротивлений, коэффициентов теплопередачи, эквивалентных коэффициентов теплопроводности и удельных тепловых потоков q через 1 м^2 стенки.

1.1. Стенка стальная, совершенно чистая толщиной δ_2 , теплопроводностью λ_2 .

Полное термическое сопротивление теплопередачи:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{60} + \frac{0,004}{42} + \frac{1}{2300} = 0,0172 \frac{m^2 \cdot K}{Bm}$$

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,0172} = 58,14 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$$

Плотность теплового потока:

$$q = k(t_c - t_{co}) = 58,14(1050 - 115) \cong 54361 \frac{Bm}{m^2} \cong 54,4 \frac{kBm}{m^2}$$

Коэффициент теплопроводности стенки:

$$\lambda_2 = 42 \frac{Bm}{m \cdot K}$$

1.2. Стенка медная, совершенно чистая, такой же толщины δ_2 , как в п.1.1. теплопроводностью $\lambda'_2 = 300 Bm/m \cdot K$.

Полное термическое сопротивление теплопередачи:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda'_2} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{60} + \frac{0,004}{300} + \frac{1}{2300} = 0,0171 \frac{m^2 \cdot K}{Bm}$$

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,0171} = 58,48 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$$

Плотность теплового потока:

$$q = k(t_c - t_{co}) = 58,48(1050 - 115) \cong 54679 \frac{Bm}{m^2} \cong 54,7 \frac{kBm}{m^2}$$

Коэффициент теплопроводности стенки:

$$\lambda'_2 = 300 \frac{Bm}{m \cdot K}$$

1.3. Стенка стальная по п.1.1., но стороны воды покрыта слоем накипи толщиной δ_3 , теплопроводностью λ_3 .

Полное термическое сопротивление теплопередачи:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{60} + \frac{0,004}{42} + \frac{0,00095}{1,8} + \frac{1}{2300} = 0,0177 \frac{m^2 \cdot K}{Bm}$$

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,0177} = 56,5 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$$

Плотность теплового потока:

$$q = k(t_c - t_{co}) = 56,5(1050 - 115) \cong 52827 \frac{Bm}{m^2} \cong 52,8 \frac{kBm}{m^2}$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности многослойной стенки:

$$\lambda_{эк.} = \sum_{i=1}^n \delta_i / \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = (\delta_2 + \delta_3) : \left(\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) = (0,004 + 0,00095) : \left(\frac{0,004}{42} + \frac{0,00095}{1,8} \right) = 61,35 \frac{Bm}{m \cdot K}$$

1.4. Стенка стальная по п.1.3., но поверх накипи имеется слой масла толщиной δ_4 , теплопроводностью $\lambda_4 = 0,1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

Полное термическое сопротивление теплопередачи:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{60} + \frac{0,004}{42} + \frac{0,00095}{1,8} + \frac{0,0004}{0,1} + \frac{1}{2300} = 0,0217 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,0217} = 46,08 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Плотность теплового потока:

$$q = k(t_{\text{с}} - t_{\text{сд}}) = 46,08(1050 - 115) \cong 43085 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cong 43,1 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности многослойной стенки:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{эк.}} &= (\delta_2 + \delta_3 + \delta_4) : \left(\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} \right) = \\ &= (0,004 + 0,00095 + 0,0004) : \left(\frac{0,004}{42} + \frac{0,00095}{1,8} + \frac{0,0004}{0,1} \right) = 67,65 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

1.5. Стенка стальная по п.1.4., но со стороны газов стенка покрыта слоем сажи толщиной δ_1 , теплопроводностью λ_1 .

Полное термическое сопротивление теплопередачи:

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_2} = \\ &= \frac{1}{60} + \frac{0,0006}{0,25} + \frac{0,004}{42} + \frac{0,00095}{1,8} + \frac{0,0004}{0,1} + \frac{1}{2300} = 0,0241 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \end{aligned}$$

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,0241} = 41,49 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Плотность теплового потока:

$$q = k(t_{\text{с}} - t_{\text{сд}}) = 41,49(1050 - 115) \cong 38800 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cong 38,8 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности многослойной стенки:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{эк.}} &= (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4) : \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} \right) = \\ &= (0,0006 + 0,004 + 0,00095 + 0,0004) : \left(\frac{0,0006}{0,25} + \frac{0,004}{42} + \frac{0,00095}{1,8} + \frac{0,0004}{0,1} \right) = \\ &= 77,71 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

п.2. Подсчет в процентах значения тепловых потоков.

$N \text{ п.}$	$q, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$	%
1.1	54,4	100
1.2	54,7	100

1.3	52,8	97
1.4	43,1	79
1.5	38,8	71

п.3. Определение аналитически и графически температуры поверхностей раздела отдельных слоев стенки для п.1.5.

Аналитический расчет.

Температура наружной поверхности слоя сажи (со стороны газа):

$$t'_{cm} = t_z - \frac{q}{\alpha_1} = 1050 - \frac{38800}{60} = 403^\circ\text{C}$$

Температура внутренней поверхности слоя сажи (температура стальной стенки со стороны сажи)

$$t'_{cl} = t'_{cm} - \frac{q \cdot \delta_1}{\lambda_1} = 403 - \frac{38800 \cdot 0,0006}{0,25} = 310^\circ\text{C}$$

Температура внутренней поверхности стальной стенки со стороны накипи:

$$t''_{cl} = t'_{cl} - \frac{q \cdot \delta_2}{\lambda_2} = 310 - \frac{3880 \cdot 0,004}{42} = 306^\circ\text{C}$$

Температура слоя накипи (со стороны масла):

$$t'''_{cl} = t''_{cl} - \frac{q \cdot \delta_3}{\lambda_3} = 306 - \frac{38800 \cdot 0,00095}{1,8} = 285^\circ\text{C}$$

Наружная температура слоя масла (со стороны воды):

$$t'''_{cm} = t'''_{cl} - \frac{q \cdot \delta_4}{\lambda_4} = 285 - \frac{38800 \cdot 0,0004}{0,1} = 130^\circ\text{C}$$

Треугольники ABC и AKL подобны между собой по равенству трёх углов. Из их подобия следует:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{AC}{BC} = \frac{AL}{KL}, \text{ или } \operatorname{tg} \varphi = \frac{t'_{cm} - t'_{cl}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}} = \frac{t'_{cm} - t''_{cm}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}} = q$$

$$q = \operatorname{tg} \varphi = \frac{403 - 130}{\frac{0,0006}{0,25} + \frac{0,004}{42} + \frac{0,00095}{1,8} + \frac{0,0004}{0,1}} \cong 38870 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

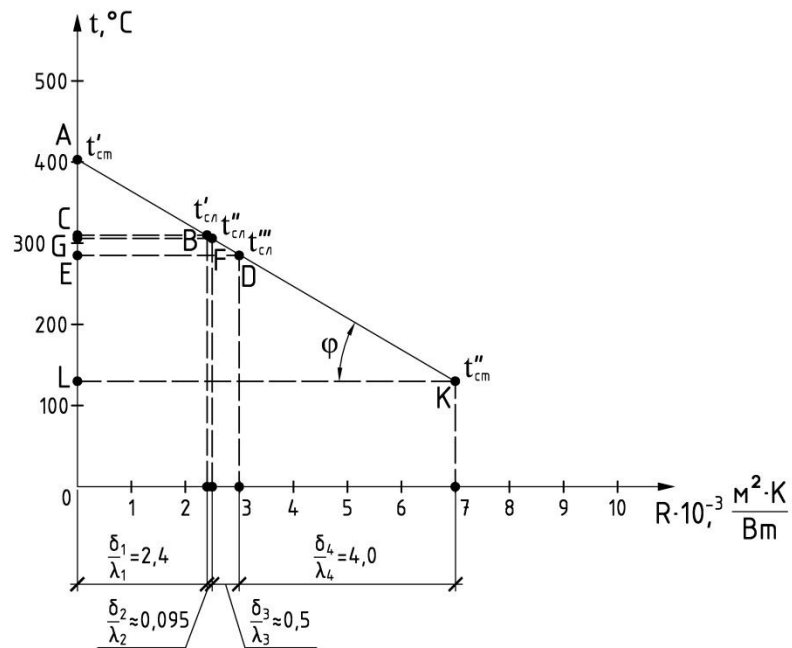
т.е. $AC = t'_{cm} - t'_{cl}$, отсюда

$$t'_{cl} = t'_{cm} - AC = t'_{cm} - \operatorname{tg} \varphi \cdot BC = t'_{cm} - \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 403 - 38870 \cdot \frac{0,0006}{0,25} = 310^\circ\text{C}$$

Аналогично из подобия треугольников AFG и AKL :

$AG = t'_{cm} - t''_{cl}$, отсюда

Графическое определение температуры
поверхности раздела отдельных слоев стенки



$$t''_{cl} = t'_{cm} - AG = t'_{cm} - tg \varphi \cdot FG = t'_{cm} - tg \varphi \cdot \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) =$$

$$= 403 - 38870 \left(\frac{0,0006}{0,25} + \frac{0,004}{42} \right) = 306^\circ C$$

Из подобия треугольников *ADE* и *AKL*:

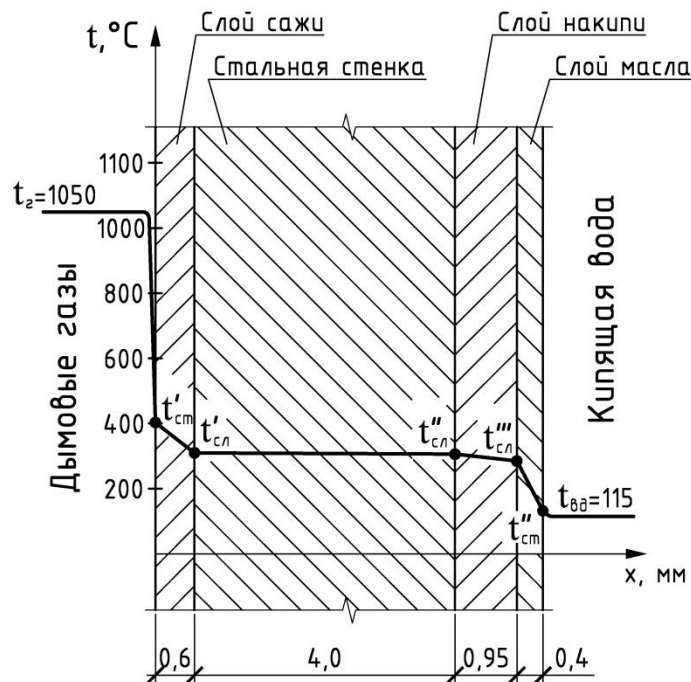
$AE = t'_{cm} - t'''_{cl}$, отсюда

$$t'''_{cl} = t'_{cm} - AE = t'_{cm} - tg \varphi \cdot DE = t'_{cm} - tg \varphi \cdot \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) =$$

$$= 403 - 38870 \left(\frac{0,0006}{0,25} + \frac{0,004}{42} + \frac{0,00095}{1,8} \right) = 285^\circ C$$

п.4. Построение линии падения температуры в многослойной плоской стенке
по п.1.5.

Линия падения температур в многослойной плоской стенке



п.5. Выводы.

Рассмотрим передачу теплоты сквозь поверхность нагрева котла, предполагая, что поверхность чистая.

В этом случае $k \cong \alpha$, и влияние сопротивлений $\frac{\delta_2}{\lambda_2}$ и $\frac{1}{\alpha_2}$ ничтожно мало.

Теплопередачу определяет наибольшее сопротивление $\frac{1}{\alpha_1}$.

В свете изложенного бессмысленна с точки зрения теплопередачи замена стальных труб медными, хотя теплопроводность меди ($\lambda'_2 = 300 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$) в 7 раз больше, чем у стали ($\lambda_2 = 42 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$). Замена стальных труб медными действительно уменьшит местное сопротивление $\frac{\delta_2}{\lambda_2}$, которое сравнительно с $\frac{1}{\alpha_1}$ и без того мало и практически на коэффициент теплопередачи не влияет.

Загрязнение стенки существенно уменьшает передачу теплоты сквозь поверхность нагрева. Когда стенка покрыта слоями накипи, сажи, масла сумма

дополнительных местных сопротивлений $\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}$ будет величиной того же порядка, что и $\frac{1}{\alpha_1}$.

В нашей задаче загрязнение стенки накипью, маслом и сажей уменьшило количество передаваемого тепла q на ~29%.

Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата.

Определить поверхность нагрева и число секций водяного теплообменника типа «труба в трубе». Греющая вода движется по внутренней стальной трубе $\lambda_{4B T/2K}$, $\frac{d_2}{d_1} = \frac{35}{32}$ мм и имеет температуру $t_1'' = 130^\circ C$, расход теплоносителя $G_1 = 0.6$ кг/с. Нагреваемая вода движется противотоком по кольцевому каналу между трубами и нагревается от $t_2'' = 20^\circ C$ до $t_2' = 50^\circ C$. Внутренний диаметр внешней трубы $D = 48$ мм, расход воды – $G_2 = 0.95$ кг/с. Длина одной секции теплообменника $l = 2$ м.

Решение:

- 1) Производительность определим из уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{гр}} = Q_{\text{наг}}, \text{ кВт}$$

Удельную теплоемкость воды примем равной 4.187 кДж/(кг·°C). Тогда:

$$Q = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2' - t_2'') = 0.95 \cdot 4.187 \cdot (50 - 20) = 119.3 \text{ кВт}$$

- 2) Температуру греющей воды на выходе из теплообменника

$$t_1' = t_1'' - \frac{G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2' - t_2'')}{c_{p1} \cdot G_1} = 130 - \frac{0.95 \cdot 4.187 \cdot (50 - 20)}{4.187 \cdot 0.6} = 130.582^\circ C.$$

- 3) Средняя температура греющей воды:

$$t_1 = \frac{t_1'' + t_1'}{2} = \frac{130 + 130.582}{2} = 130.291^\circ C;$$

- 4) Плотность воды при $t_1 = 130.291^\circ C$:

$$\rho_1 = 960 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

5) Коэффициент кинематической вязкости греющей воды:

$$\nu_1 = 0.816 \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

6) Коэффициент теплопроводности греющей воды:

$$\lambda_1 = 0.709 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}};$$

7) Число Прандтля по температуре греющей воды:

$$\text{Pr}_1 = 0.12;$$

8) Средняя температура нагреваемой воды:

$$t_2 = \frac{t_2 + t_2}{2} = \frac{20 + 20}{2} = 20 \text{°C};$$

9) Плотность воды при $t_2 = 35 \text{°C}$:

$$\rho_2 = 994 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

10) Коэффициент кинематической вязкости греющей воды:

$$\nu_2 = 0.517 \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

11) Коэффициент теплопроводности греющей воды:

$$\lambda_2 = 0.623 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}};$$

12) Число Прандтля по температуре греющей воды:

$$\text{Pr}_2 = 5.07;$$

13) Скорость движения греющей жидкости:

$$W_1 = \frac{4500}{3.14 \cdot 0.025 \cdot 0.025 \cdot 3.6} = 1.9 \text{ м/с};$$

14) Скорость движения нагреваемой жидкости:

$$Re = \frac{W}{\nu} = \frac{0.5}{0.0001} = 5000$$

15) Число Рейнольдса для потока греющей воды:

$$Re = \frac{W}{\nu} = \frac{0.5}{0.0001} = 5000$$

Режим течения турбулентный;

16) Число Нуссельта:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} = \frac{1000 \cdot 0.025}{0.6} = 41.67$$

17) Так как температура стенки неизвестна, то в первом приближении задаемся ее значением:

$$t_{ст} = 100^\circ\text{C};$$

18) Число Прандтля по температуре стенки:

$$Pr_{ст} = 2.6;$$

Число Нуссельта:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} = \frac{1000 \cdot 0.025}{0.6} = 41.67$$

19) Коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке трубы:

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{41.67 \cdot 0.6}{0.025} = 1000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$$

20) Число Рейнольдса для потока нагреваемой воды:

$$Re = \frac{W}{\nu} = \frac{0.5}{0.0001} = 5000$$

где $\nu = 0.0001 \text{ м}^2/\text{с}$

Режим течения турбулентный;

21) Принимаем в первом приближении температуру стенки со стороны нагреваемой воды:

$$t_{\text{с}} = t_{\text{д}} = 7.6^{\circ}\text{C};$$

22) Число Прандтля по температуре стенки:

$$Pr_{\text{с}} = Pr_{\text{д}} = 2;$$

23) Число Нуссельта со стороны нагреваемой воды:

$$Nu_{\text{с}} = Nu_{\text{д}} = \frac{P_{\text{с}}}{\alpha_{\text{с}}} = \frac{10000}{100} = 100;$$

24) Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой воде:

$$\alpha_{\text{с}} = \frac{P_{\text{с}}}{t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}} = \frac{10000}{7.6 - 0.1} = 1400 \text{ Вт/м}^2\text{}^{\circ}\text{C};$$

25) Т.к. $d_2/d_1 = 10.91$, то коэффициент теплопередачи, определяемый для плоской стенки, определяется как:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{с}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ж}}}} = \frac{1}{\frac{1}{1400} + \frac{1}{10000}} = 1000 \text{ Вт/м}^2\text{}^{\circ}\text{C};$$

26) Наибольший температурный напор:

$$\Delta t_{12} = 1.36^{\circ}\text{C};$$

27) Наименьший температурный напор:

$$\Delta t_{12} = 8.52^{\circ}\text{C};$$

28) Отношение $\frac{\Delta t_{\text{с}}}{\Delta t_{\text{ж}}} = 12.81$, то:

$$\Delta t_{\text{с}} = 1.23^{\circ}\text{C};$$

29) Плотность теплового потока:

$$F = \frac{Q_1}{q} = \frac{112}{106} = 1.057;$$

30) Площадь поверхности нагрева:

$$F = \frac{Q_1}{q} = \frac{112}{106} = 1.057;$$

31) Число секций:

$$n = \frac{F}{f} = \frac{1.057}{0.3012} = 3.51;$$

32) Температура стенки трубы со стороны греющей воды:

$$t_{\text{с}} = \frac{q}{\alpha} = \frac{106}{217} = 0.488;$$

33) При этой температуре:

$$Pr_{\text{с}} = 3.52;$$

34) Уточнённое значение поправки:

$$\left(\frac{Pr}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0.5} = \left(\frac{0.35}{3.52} \right)^{0.5} = 0.31;$$

Было принято $\left(\frac{Pr}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0.5} = 0.31$

$$\left| \frac{0.31 - 0.35}{0.31} \right| = 0.129,$$

поэтому необходимо провести второе приближение;

35) Так как температура стенки неизвестна, то в первом приближении задаемся новым значением температуры стенки:

$$t_{\text{с}} = 53^{\circ}\text{C};$$

36) Число Прандтля по температуре стенки:

$$Pr_{\text{с}} = 3.52;$$

Число Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = 10,3$$

37) Коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке трубы:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda}{d} = 103 \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

38) Число Рейнольдса для потока нагреваемой воды:

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu} = 1080,$$

Режим течения турбулентный;

39) Принимаем во втором приближении температуру стенки со стороны нагреваемой воды:

$$t_2 = t_d = 5,3^\circ\text{C};$$

40) Число Прандтля по температуре стенки:

$$Pr = Pr_f = 35;$$

41) Число Нуссельта со стороны нагреваемой воды:

$$Nu_2 = \frac{0,3 + 0,62 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,4}}{1 + 0,4 \cdot Pr^{0,4}} \cdot \left(1 + \frac{Pr}{Pr_f} \right)^{0,25} = 10,3$$

42) Коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой воде:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda}{d} = 103 \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

43) Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 51,5 \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

44) Плотность теплового потока:

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{3293}{1.3293} = 2483 \text{ Вт/м}^2;$$

48) Площадь поверхности нагрева:

$$F = \frac{Q}{q} = \frac{3293}{2483} = 1.3293 \text{ м}^2;$$

49) Число секций:

$$n = \frac{F}{f} = \frac{1.3293}{0.1022} = 13 \text{ шт. (Приложение 4);}$$

50) Температура стенки трубы со стороны греющей воды:

$$t_{\text{ст}} = \frac{q}{\alpha} + t_{\text{в}} = \frac{2483}{201} + 165 = 178.5^\circ\text{C};$$

51) При этой температуре:

$$\text{Pr}_{\text{ст}} = 34.9;$$

52) Уточнённое значение поправки:

$$\left(\frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0.25} = \left(\frac{3.5}{34.9} \right)^{0.25} = 0.64;$$

Было принято $\left(\frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0.25} = \left(\frac{3.5}{32} \right)^{0.25} = 0.64$

$$\left| \frac{0.35}{1.022} - \frac{0.36}{1.022} \right| = 0.0025,$$

поэтому расчёт можно считать

достаточно точным.

53) Температура стенки со стороны нагреваемой воды:

$$t_{\text{ст}} = \frac{q}{\alpha} + t_{\text{ж}} = \frac{2483}{501} + 53 = 53.9^\circ\text{C};$$

54) При этой температуре:

$$\text{Pr}_{\text{ст}} = 37.2;$$

55) Уточнённое значение поправки:

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.5} = \left(\frac{5}{3} \right)^{0.5} = 1$$

Было принято $\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.5} = \left(\frac{5}{3} \right)^{0.5} = 1$

$$\left| \frac{1.08}{1.096} - 1 \right| = 0.015, \text{ поэтому второе приближение не нужно,}$$

в данном случае совпадение точное.

Ответ: Поверхность нагрева $F=1.22 \text{ м}^2$, число секций $n = 6$.