Глава 6
Процессы теплопередачи
6-1. Сложный теплообмен и теплопередача
1. Сложный теплообмен

Процесс переноса теплоты между потоком излучающего газа и стенкой является результатом совокупного действия конвективного теплообмена и теплового излучения; это так называемый ***сложный теплообмен***.

Если в качестве основного явления принимается конвекция

$$\alpha_0 = \alpha_к + \alpha_л \qquad q_к = \alpha_к (t_ж - t_с)$$

$$q_л = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_ж}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_с}{100}\right)^4\right]$$

$$q_0 = q_к + q_л = \alpha_к (t_ж - t_с) + \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_ж}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_с}{100}\right)^4\right]$$

$$t_ж - t_с = T_ж - T_с$$

$$q_0 = \left\{ \alpha_к + \varepsilon c_0 \left[\frac{\left(\frac{T_ж}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_с}{100}\right)^4}{T_ж - T_с} \right] \right\} (t_ж - t_с)$$

$$q_0 = (\alpha_к + \alpha_л)(t_ж - t_с) = \alpha_0 (t_ж - t_с)$$

$$\alpha_л = \varepsilon c_0 \cdot 10^{-8} (T_ж^4 - T_с^4)/(T_ж - T_с) =$$

$$= \varepsilon c_0 \left[10^{-8} (T_ж^3 + T_ж^2 T_с + T_ж T_с^2 + T_с^3) \right] = \varepsilon c_0 \theta$$

θ – ***температурный коэффициент***

$$(T_ж + T_с)/2 = T_m \qquad 0{,}9 \leqslant T_ж/T_с \leqslant 1{,}1$$

$$\theta \approx 0{,}04 \left(\frac{T_m}{100}\right)^3 \qquad \alpha_л = 0{,}04 \varepsilon c_0 \left(\frac{T_m}{100}\right)^3$$

В случае омывания стенки капельной жидкостью, например, водой

$$\alpha_л = 0 \qquad \alpha_0 = \alpha_к$$

Если в качестве основного явления принять тепловое излучение, то расчётная формула суммарной теплоотдачи будет иметь вид:

$$q_0 = (\varepsilon_{\text{к}} + \varepsilon)\, c_0 \left[\left(\frac{T_{\text{ж}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{c}}}{100}\right)^4\right]$$

$$\varepsilon_{\text{к}} = \frac{\alpha_{\text{к}}\,(t_{\text{ж}} - t_{\text{c}})}{c_0\left[\left(\frac{T_{\text{ж}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{c}}}{100}\right)^4\right]} = \frac{\alpha_{\text{к}}}{c_0\theta}$$

2. Теплопередача

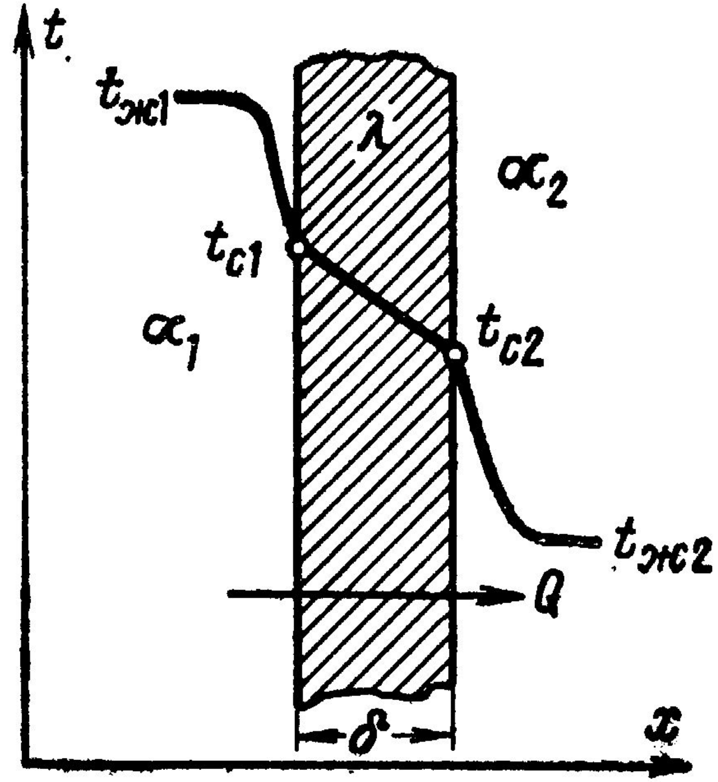
$$Q = k\,(t_{\text{ж}1} - t_{\text{ж}2})\,F$$

Коэффициент теплопередачи k определяется количеством теплоты, передаваемым в единицу времени через единицу поверхности стенки от одной жидкости к другой при разности температур между ними в один градус.

6-2. Теплопередача через стенки

1. Однослойная плоская стенка

$$\left.\begin{aligned} q &= \alpha_1 (t_{ж1} - t_{c1}); \\ q &= \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}); \\ q &= \alpha_2 (t_{c2} - t_{ж2}). \end{aligned}\right\}$$



$$\left.\begin{aligned} t_{ж1} - t_{c1} &= q \frac{1}{\alpha_1}; \\ t_{c1} - t_{c2} &= q \frac{\delta}{\lambda}; \\ t_{c2} - t_{ж2} &= q \frac{1}{\alpha_2}. \end{aligned}\right\}$$

$$t_{ж\,1} - t_{ж\,2} = q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$$

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} (t_{ж1} - t_{ж2}) = k(t_{ж1} - t_{ж2})$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

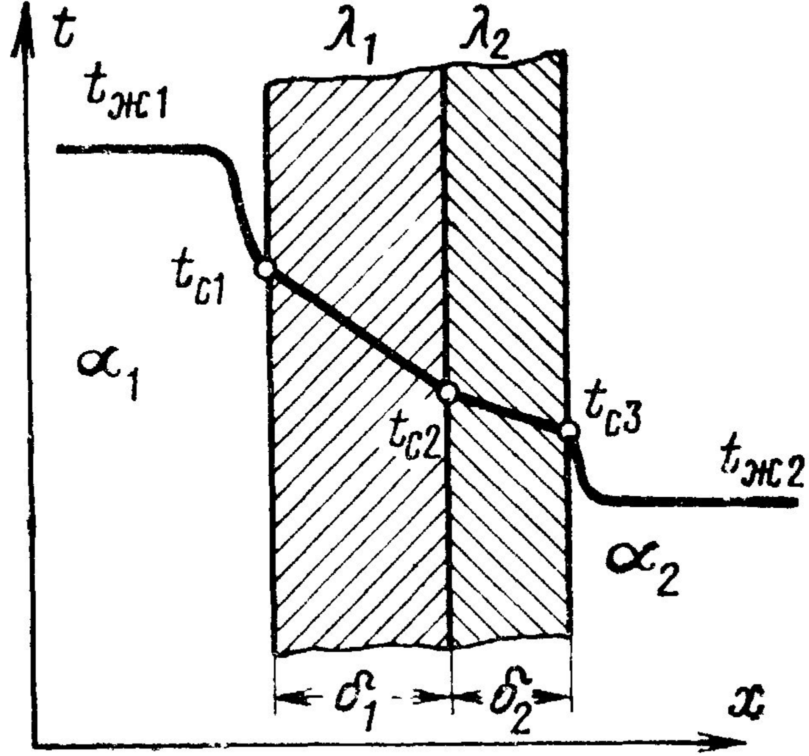
Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется ***общим термическим сопротивлением теплопередачи***.

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

$$R = R_{\alpha 1} + R_{\lambda} + R_{\alpha 2}$$

$$R_{\alpha 1} = \frac{1}{\alpha_1} \qquad R_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda} \qquad R_{\alpha 2} = \frac{1}{\alpha_2}$$

2. Многослойная плоская стенка



$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$t_{c1} = t_{ж1} - q\frac{1}{\alpha_1}$$

$$t_{c2} = t_{c1} - q\frac{\delta_1}{\lambda_1}$$

$$t_{c3} = t_{ж2} + q\frac{1}{\alpha_2}$$

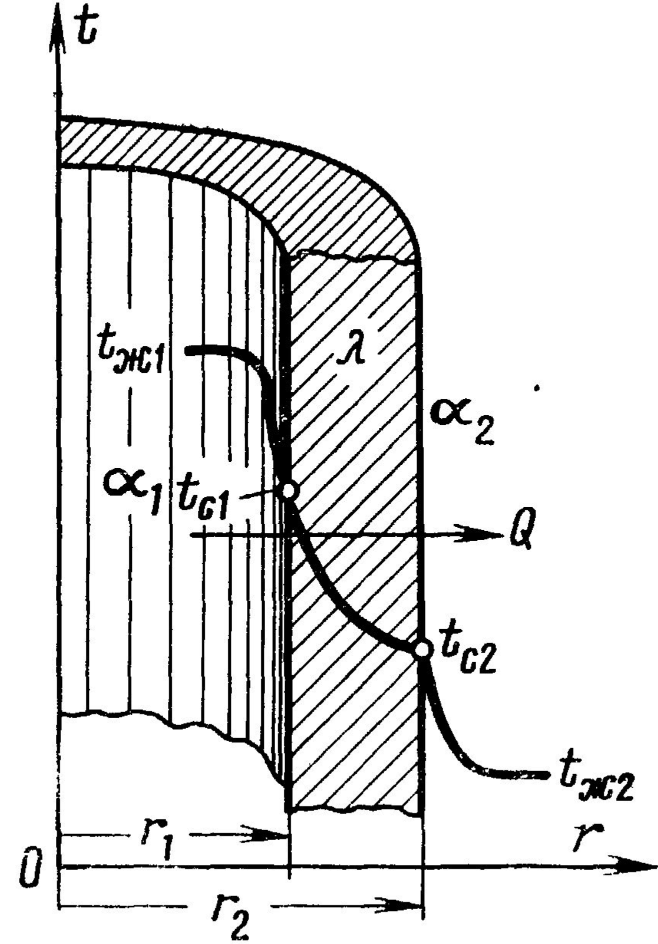
$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

3. Однородная цилиндрическая стенка

$$\left.\begin{aligned} q_l &= \frac{Q}{l} = \alpha_1 \pi d_1 (t_{ж1} - t_{c1}); \\ q_l &= \frac{2\pi\lambda (t_{c1} - t_{c2})}{\ln \dfrac{d_2}{d_1}}; \\ q_l &= \alpha_2 \pi d_2 (t_{c2} - t_{ж2}). \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} t_{ж1} - t_{c1} &= \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{\alpha_1 d_1}; \\ t_{c1} - t_{c2} &= \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}; \\ t_{c2} - t_{ж2} &= \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{\alpha_2 d_2}. \end{aligned}\right\}$$



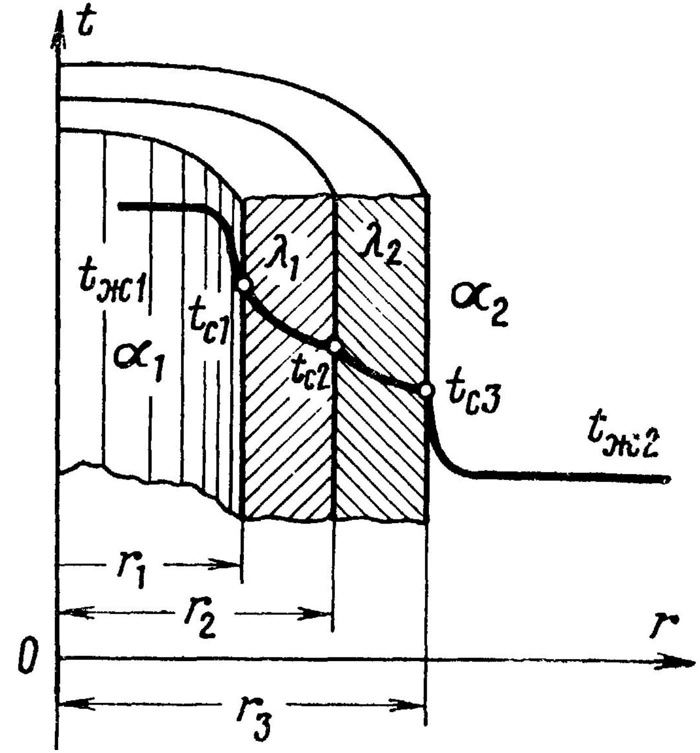
$$t_{ж1} - t_{ж2} = \frac{q_l}{\pi}\left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}\right)$$

$$q_l = \frac{\pi\,(t_{ж1} - t_{ж2})}{\dfrac{1}{\alpha_1 d_1} + \dfrac{1}{2\lambda}\ln\dfrac{d_2}{d_1} + \dfrac{1}{\alpha_2 d_2}} = k_l \pi (t_{ж1} - t_{ж2})$$

$$k_l = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1 d_1} + \dfrac{1}{2\lambda}\ln\dfrac{d_2}{d_1} + \dfrac{1}{\alpha_2 d_2}}$$

$$R_l = \frac{1}{k_l} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}$$

4. Многослойная цилиндрическая стенка



$$\left.\begin{aligned} q_l &= \alpha_1 \pi d_1 (t_{ж1} - t_{с1}); \\ q_l &= \frac{\pi (t_{с1} - t_{с2})}{\dfrac{1}{2\lambda_1} \ln \dfrac{d_2}{d_1}}; \\ q_l &= \frac{\pi (t_{с2} - t_{с3})}{\dfrac{1}{2\lambda_2} \ln \dfrac{d_3}{d_2}}; \\ q_l &= \alpha_2 \pi d_3 (t_{с3} - t_{ж2}). \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned} t_{ж1} - t_{с1} &= \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{\alpha_1 d_1}; \\ t_{с1} - t_{с2} &= \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}; \\ t_{с2} - t_{с3} &= \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}; \\ t_{с3} - t_{ж2} &= \frac{q_l}{\pi} \frac{1}{\alpha_2 d_3}. \end{aligned}\right\}$$

$$t_{ж1} - t_{ж2} = \frac{q_l}{\pi}\left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}\right)$$

$$q_l = \frac{\pi (t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}}$$

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}}$$

$$R_l = \frac{1}{k_l} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2\lambda_i}\ln\frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}$$

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{2\lambda_i}\ln\frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}$$

$$t_{c1} = t_{ж1} - \frac{q_l}{\pi}\frac{1}{\alpha_1 d_1}$$

$$t_{c2} = t_{ж1} - \frac{q_l}{\pi}\left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1}\right)$$

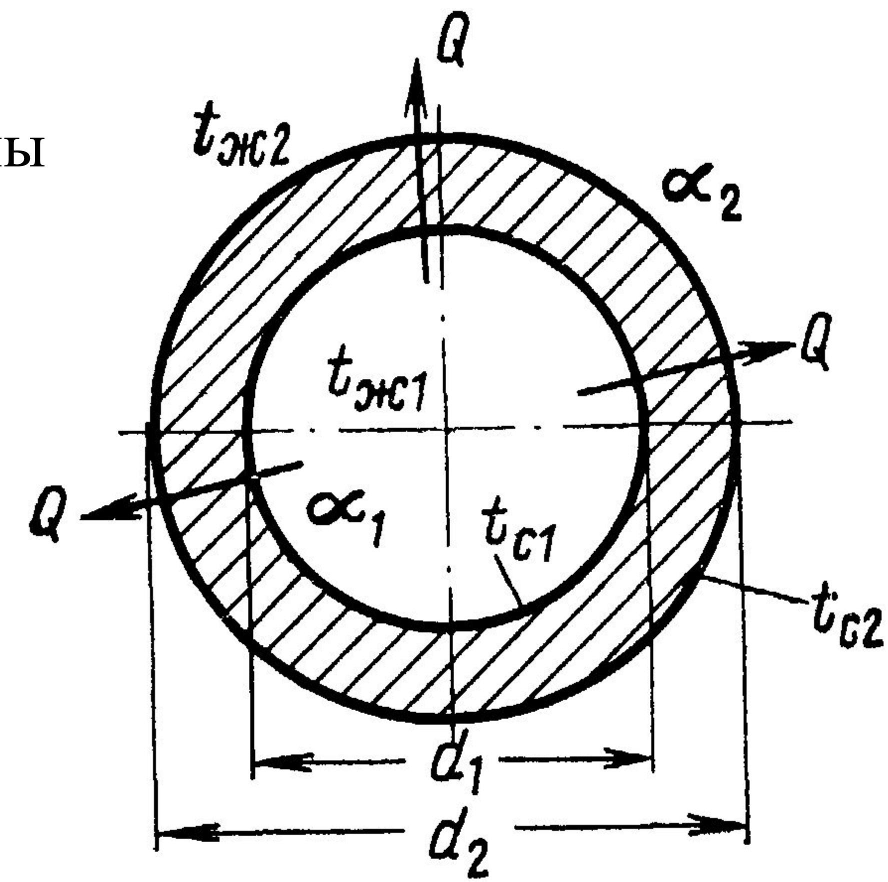
$$t_{c3} = t_{ж2} + \frac{q_l}{\pi}\frac{1}{\alpha_2 d_3}$$

Если толщина стенки не очень велика, то в расчётах можно применить формулу следующего вида

$$q_l = k\pi d_x\left(t_{ж1} - t_{ж2}\right) = \frac{\pi d_x\left(t_{ж1} - t_{ж2}\right)}{\dfrac{1}{\alpha_1} + \dfrac{\delta}{\lambda} + \dfrac{1}{\alpha_2}}$$

5. Шар.

При стационарном состоянии системы



$$\left.\begin{aligned} Q &= \alpha_1 \pi d_1^2 (t_{ж1} - t_{с1}); \\ Q &= \frac{2\pi\lambda}{\dfrac{1}{d_1} - \dfrac{1}{d_2}} (t_{с1} - t_{с2}); \\ Q &= \alpha_2 \pi d_2^2 (t_{с2} - t_{ж2}). \end{aligned}\right\}$$

$$Q = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\dfrac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \dfrac{1}{2\lambda}\left(\dfrac{1}{d_1} - \dfrac{1}{d_2}\right) + \dfrac{1}{\alpha_2 d_2^2}} = k_{ш}\pi(t_{ж1} - t_{ж2})$$

Коэффициент теплопередачи для шаровой стенки

$$k_ш = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda}\left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}}$$

Обратная величина $1/k_ш$ называется ***общим термическим сопротивлением*** шаровой стенки

$$R_ш = \frac{1}{k_ш} = \frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda}\left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}$$

При практических расчётах надо проверять соотношение термических сопротивлений; относительно малыми из них всегда можно пренебречь.

6-3. Теплопередача через сложные стенки

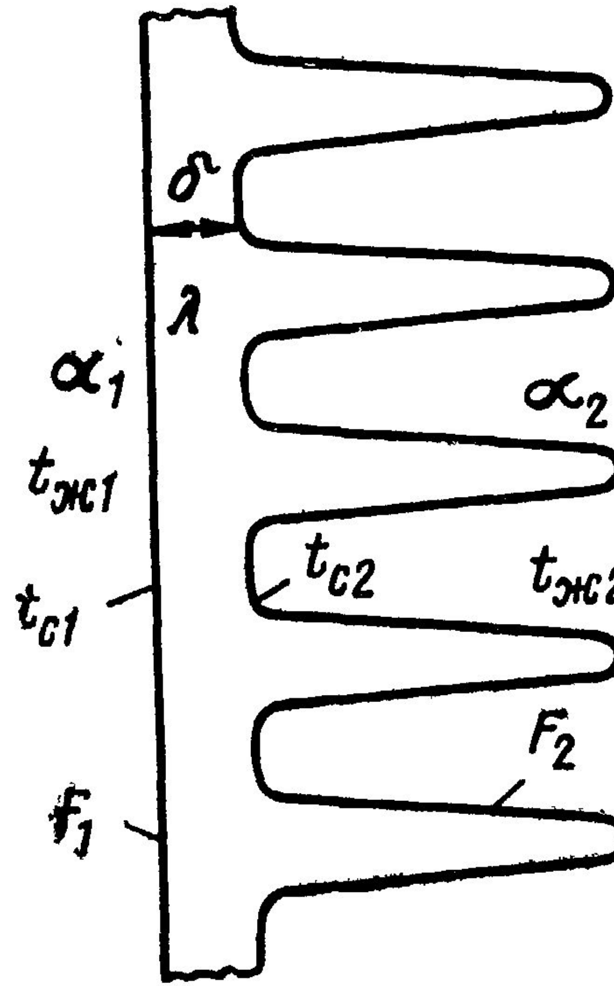
1. Ребристая поверхность.

При установившемся тепловом состоянии системы

$$\left.\begin{aligned} Q &= \alpha_1 F_1 (t_{ж1} - t_{с1}); \\ Q &= \frac{\lambda}{\delta} F_1 (t_{с1} - t_{с2}); \\ Q &= \alpha_2 F_2 (t_{с2} - t_{ж2}). \end{aligned}\right\}$$

Определяя отсюда частные температурные напоры, получаем:

$$\left.\begin{aligned} t_{ж1} - t_{с1} &= Q \frac{1}{\alpha_1 F_1}; \\ t_{с1} - t_{с2} &= Q \frac{\delta}{\lambda} \frac{1}{F_1}; \\ t_{с2} - t_{ж2} &= Q \frac{1}{\alpha_2 F_2}. \end{aligned}\right\}$$



Полный температурный напор

$$t_{ж1} - t_{ж2} = Q\left(\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{\delta}{\lambda}\frac{1}{F_1} + \frac{1}{\alpha_2 F_2}\right).$$

Тепловой поток

$$Q = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1 F_1} + \dfrac{\delta}{\lambda}\dfrac{1}{F_1} + \dfrac{1}{\alpha_2 F_2}}\left(t_{ж1} - t_{ж2}\right) = k_{р}\left(t_{ж1} - t_{ж2}\right)$$

Коэффициент теплопередачи ребристой поверхности

$$k_{р} = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1 F_1} + \dfrac{\delta}{\lambda}\dfrac{1}{F_1} + \dfrac{1}{\alpha_2 F_2}}$$

Если расчёт вести на единицу гладкой поверхности, получим:

$$q_1 = \frac{Q}{F_1} = k_1 (t_{ж1} - t_{ж2}) \qquad k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{F_1}{F_2}}$$

Если расчёт вести на единицу оребренной поверхности, то расчётное уравнение примет вид:

$$q_2 = \frac{Q}{F_2} = k_2 (t_{ж1} - t_{ж2}) \quad k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{F_2}{F_1} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{F_2}{F_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

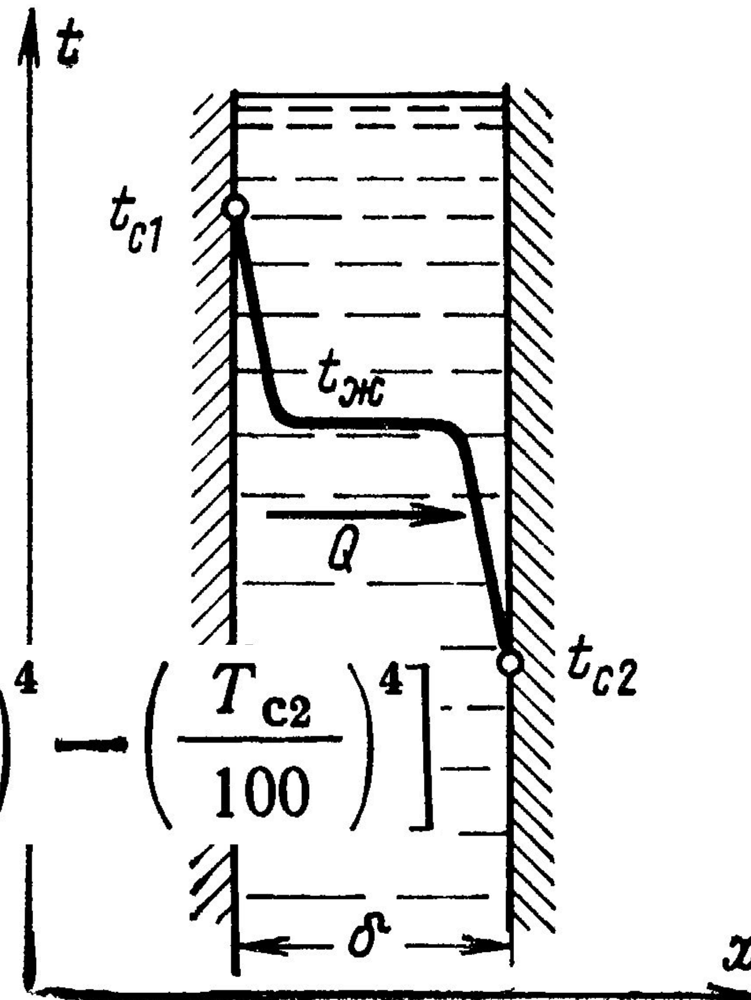
Отношение площадей оребренной поверхности F_2 и гладкой F_1 называется ***коэффициентом оребрения***.

Примером оребренной поверхности являются отопительные радиаторы.

2. Газовые и жидкостные прослойки.

Перенос теплоты через две твёрдые стенки и прослойку между ними можно рассматривать как перенос теплоты через сложную трёхслойную стенку. Вся задача при этом сводится к правильному выбору значения эффективного коэффициента теплопроводности прослойки.

Так как через прослойку теплота передаётся не только путём теплопроводности, но также конвекцией и излучением, то тепловой поток, переданный от горячей поверхности к холодной через прослойку, равен:



$$Q = k_{п}(t_{c1} - t_{c2})\,F + cF\left[\left(\frac{T_{c1}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{c2}}{100}\right)^4\right]$$

$$Q = (k_{п} + \alpha_{л})\,F\,(t_{c1} - t_{c2})$$

Тепловой поток, переданный путём соприкосновения, определим следующим образом:

$$Q_с = k_п F\,(t_{с1} - t_{с2}) = \frac{\lambda_{эк}}{\delta} F\,(t_{с1} - t_{с2}) \qquad \lambda_{эк} = k_п \delta \qquad \varepsilon_к = \frac{\lambda_{эк}}{\lambda}$$

Плоская прослойка

$$q = \frac{Q}{F} = \left(\varepsilon_к \frac{\lambda}{\delta} + \alpha_л\right)(t_{с1} - t_{с2}) = \varepsilon_к \frac{\lambda}{\delta}(t_{с1} - t_{с2}) + c_п \left[\left(\frac{T_{с1}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{с2}}{100}\right)^4\right]$$

Цилиндрическая прослойка

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{2\pi\varepsilon_к\lambda}{\ln(d_2/d_1)}(t_{с1} - t_{с2}) + c_п \pi d_1 \left[\left(\frac{T_{с1}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{с2}}{100}\right)^4\right]$$

Если прослойка является лишь частью сложной стенки, то, чтобы иметь возможность произвести расчёты по формулам для многослойной стенки, необходимо определить эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эфф}$ прослойки с учётом передачи теплоты излучением.

Плоская прослойка

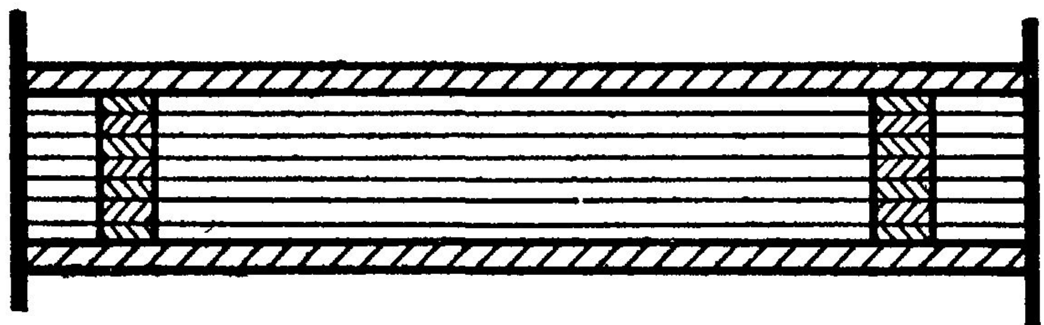
$$\lambda_{эфф} = \frac{Q\delta}{F\,(t_{c1} - t_{c2})} = \left(\varepsilon_к \frac{\lambda}{\delta} + \alpha_л\right)\delta = \varepsilon_к\lambda + \alpha_л\delta$$

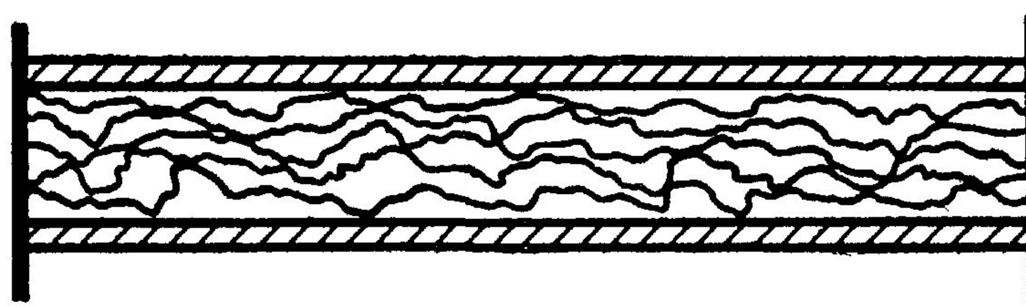
Цилиндрическая прослойка

$$\lambda_{эфф} = \varepsilon_к\lambda + \frac{\alpha_л d_1}{2}\ln\frac{d_2}{d_1}$$

Если прослойки заполнены капельной жидкостью, то вторые слагаемые в формулах, учитывающие влияние теплового излучения отпадают

$$\lambda_{эфф} = \varepsilon_к\lambda$$





6-4. Интенсификация процессов теплопередачи

Термическое сопротивление стенки можно уменьшить путём уменьшения толщины стенки и увеличения коэффициента теплопроводности материала.

Теплоотдача соприкосновением может быть интенсифицирована путём перемешивания жидкости и увеличения скорости движения.

При тепловом излучении − путём повышения степени черноты и температуры излучающей поверхности.

В качестве примера теплопередачи рассмотрим формулу коэффициента теплопередачи для плоской стенки, когда её термическим сопротивлением можно пренебречь ($\delta/\lambda = 0$)

$$k_0 = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1} + \dfrac{1}{\alpha_2}} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

Откуда следует, что коэффициент теплопередачи всегда меньше самого малого из коэффициентов теплоотдачи.

Выявив частные термические сопротивления, легко найти и решение задачи об интенсификации теплопередачи.

Если частные термические сопротивления различны, то, чтобы увеличить теплопередачу, достаточно уменьшить наибольшее из них.

Если же все частные термические сопротивления одного порядка, то увеличение теплопередачи возможно за счёт уменьшения любого из сопротивлений. Изменение каждого из них вызывает тем большее изменение теплопередачи, чем больше было первоначальное отношение этого термического сопротивления к остальным.

6-5. Тепловая изоляция

Если требуется снизить теплопередачу, то для этого необходимо увеличить термическое сопротивление. При этом достаточно увеличить какое-либо из частных термических сопротивлений, что может быть сделано по разному.

В большинстве случаев это достигается путём нанесения на стенку слоя тепловой изоляции.

1. Виды изоляции.

Тепловой изоляцией называется такое вспомогательное покрытие, которое способствует снижению потери теплоты в окружающую среду.

Изоляционными называются такие материалы, коэффициент теплопроводности которых при температурах 50 − 100°С меньше 0,2 Вт/(м · °С).

Шлаковая вата получается из шлака, который расплавляется, а затем паровой струёй разбрызгивается.

Зонолит получается из вермикулита (сорт слюды) путём прокаливания его при температуре $700 - 800°C$.

Асбослюда представляет собой смесь асбеста и слюдяной мелочи.

Совелит является продуктом химического производства.

Альфолевая изоляция представляет из себя воздух, в котором уменьшается коэффициент конвекции и снижается теплоотдача излучением путём экранирования алюминиевой фольгой.

Коэффициент теплопроводности материалов в сильной мере зависит от их пористости, о которой можно судить по величине плотности.

При выборе материала для изоляции необходимо принимать во внимание механические свойства материала, а также их способность поглощать влагу и выдерживать высокую температуру.

При теплоотдаче в условиях свободной конвекции и температуре окружающей среды $t_{ж2}$ = 20°С толщину изоляции трубопроводов с точностью до 3 − 5% можно определить по формуле

$$\delta_{из} = 2,75 \frac{d_1^{1,2} \lambda_{из}^{1,35} t_{c1}^{1,73}}{q_l^{1,5}}$$

Если температура окружающей среды не 20°С, а выше, то тепловые потери уменьшаются: на каждые 5°С повышения температуры тепловые потери снижаются приблизительно на 1,5%.

1. Условия рационального выбора материала для тепловой изоляции трубопроводов.

Анализ показывает, что материал изоляции выбран правильно, если $\lambda_{из}$ удовлетворяет неравенству

$$\lambda_{из} < \alpha_2 d_2 / 2$$

Общее термическое сопротивление теплопередачи трубопровода, на который наложен слой изоляции

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{d_{из}}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_{из}}$$

До наложения слоя изоляции общее термическое сопротивление теплопередачи трубопровода составляло

$$R_{l0} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}$$

$$\Delta R_l = R_l - R_{l0} = \frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{d_{из}}{d_2} - \frac{1}{\alpha_2} \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_{из}} \right)$$

$$\Delta R_l > 0 \qquad \lambda_{из} < \frac{1}{2}\alpha_2 d_2 k \qquad k = \frac{\ln \dfrac{d_{из}}{d_2}}{1 - \dfrac{d_2}{d_{из}}}$$