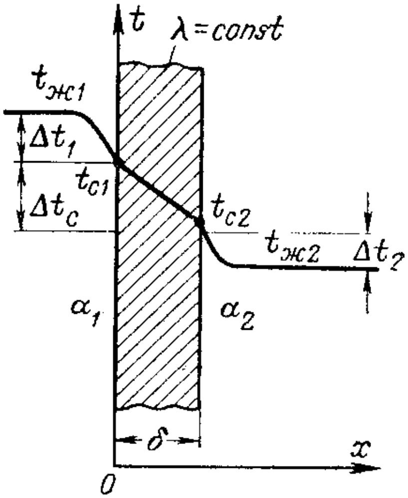
1.7.2 Теплопередача (граничные условия III рода)

Рассмотрим теплопередачу через однородную и многослойную плоские стенки.

Теплопередача включает в себя
- теплоотдачу от более горячей жидкости к стенке,
- теплопроводность в стенке,
- теплоотдачу от стенки к более холодной подвижной среде.



Заданы толщина δ плоской однородной стенки коэффициенты теплопроводности стенки λ, температуры окружающей среды $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$, а также коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2;

будем считать, что величины $t_{ж1}$, $t_{ж2}$, α_1 и α_2 постоянны и не меняются вдоль поверхности.

При заданных условиях необходимо найти тепловой поток от горячей жидкости к холодной и температуры на поверхностях стенки.

Плотность теплового потока от горячей жидкости к стенке

$$q = a_1 \cdot \left(t_{ж1} - t_{с1}\right)$$

При стационарном тепловом режиме тот же тепловой поток пройдет теплопроводностью через твердую стенку

$$q = \frac{l}{d} \cdot (t_{с1} - t_{с2})$$

Тот же тепловой поток передается от второй поверхности стенки к холодной жидкости за счет теплоотдачи

$$q = a_2 \cdot \left(t_{c2} - t_{ж2}\right)$$

Эти уравнения можно записать в виде системы

$$q \cdot \frac{1}{a_1} = t_{ж1} - t_{c1}$$

$$q \cdot \frac{d}{l} = t_{c1} - t_{c2}$$

$$q \cdot \frac{1}{a_2} = t_{c2} - t_{ж2}$$

Плотность теплового потока, Вт/м^2

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\dfrac{1}{a_1} + \dfrac{d}{l} + \dfrac{1}{a_2}}$$

Обозначим $$\frac{1}{\frac{1}{a_1}+\frac{d}{l}+\frac{1}{a_2}}=k$$

Величина *k* имеет ту же размерность, что и α, и называется *коэффициентом теплопередачи*.

Коэффициент теплопередачи *k* характеризует интенсивность передачи теплоты от одной жидкости к другой через разделяющую их стенку и численно равен количеству теплоты, которое передается через единицу поверхности стенки в единицу времени при разности температур между жидкостями в один градус.

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется *полным термическим сопротивлением теплопередаче.*

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{a_1} + \frac{d}{l} + \frac{1}{a_2}$$

$1/a_1 = R_1$ – термическое сопротивление теплоотдаче от горячей жидкости к поверхности стенки; $d / l = R_c$ – термическое сопротивление теплопроводности стенки; $1/a_2 = R_2$ – термическое сопротивление теплоотдаче от поверхности стенки к холодной жидкости.

В случае многослойной стенки нужно учитывать термическое сопротивление каждого слоя:

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{a_1} + \frac{d_1}{l_1} + \frac{d_2}{l_2} + \ldots + \frac{d_n}{l_n} + \frac{1}{a_2}$$

или

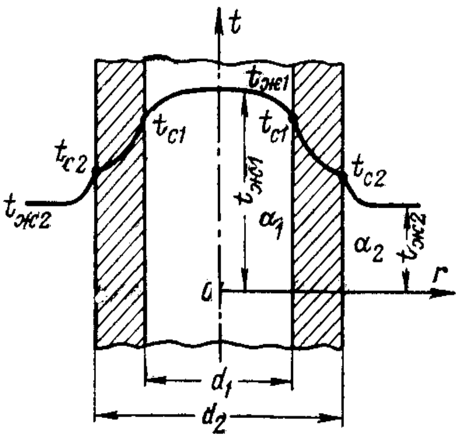
$$R = \frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{d_i}{l_i} + \frac{1}{a_2}$$

Плотность теплового потока через многослойную стенку, состоящую из *n* слоев

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\dfrac{1}{a_1} + \sum\limits_{i=1}^{i=n} \dfrac{d_i}{l_i} + \dfrac{1}{a_2}} = k \cdot \left(t_{ж1} - t_{ж2} \right)$$

Тепловой поток Q, Вт, через поверхность *F* твердой стенки

$$Q = q \cdot F = k \Delta t \cdot F$$



Рассмотрим однородную цилиндрическую стенку (трубу) с постоянным коэффициентом теплопроводности *λ.*

Заданы постоянные температуры подвижных сред $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$ и постоянные значения коэффициентов теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях труб α_1 и α_2.

Необходимо найти q_l и t_c. Будем полагать, что длина трубы велика по сравнению с толщиной стенки. Тогда потерями теплоты с торцов трубы можно пренебречь.

Для стационарного режима теплопередачи можно написать

$$q_l = q_1 p\, d_1 = \frac{p\,(t_{ж1} - t_{c1})}{\dfrac{1}{a_1 d_1}}; \qquad q_l = q_2 p\, d_2 = \frac{p\,(t_{c2} - t_{ж2})}{\dfrac{1}{a_2 d_1}};$$

$$q_l = \frac{p\,(t_{c1} - t_{c2})}{\dfrac{1}{2\,l} \ln \dfrac{d_2}{d_1}};$$

Представим эти уравнения следующим образом

$$t_{ж1} - t_{c1} = \frac{q_l}{p} \cdot \frac{1}{a_1 d_1}$$

$$t_{c1} - t_{c2} = \frac{q_l}{p} \cdot \frac{1}{2l} \cdot \ln\frac{d_2}{d_1}$$

$$t_{c2} - t_{ж2} = \frac{q_l}{p} \cdot \frac{1}{a_2 d_2}$$

Отсюда следует

$$q_l = \frac{p\left(t_{ж1} - t_{ж2}\right)}{\dfrac{1}{a_1 d_1} + \dfrac{1}{2l}\ln\dfrac{d_2}{d_1} + \dfrac{1}{a_2 d_2}}$$

Обозначим
$$k_l = \frac{1}{\dfrac{1}{a_1 d_1} + \dfrac{1}{2 l} \ln \dfrac{d_2}{d_1} + \dfrac{1}{a_2 d_2}}$$

Величина k_l называется линейным коэффициентом теплопередачи измеряется в Вт/(м·К). Он характеризует интенсивность передачи теплоты от одной подвижной среды к другой через разделяющую их стенку.

Значение k_l численно равно количеству теплоты, которое проходит через стенку длиной 1 м в единицу времени от одной среды к другой при разности температур между ними 1 град.

Величина R_l=1/k_l, обратная линейному коэффициенту теплопередачи, называется *линейным термическим сопротивлением теплопередаче:*

$$R_l = \frac{1}{k_l} = \frac{1}{a_1 d_1} + \frac{1}{2l} \cdot \ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{a_2 d_2}$$

здесь R_l измеряется в м·К/Вт.

$\frac{1}{a_1 d_1}$, $\frac{1}{a_2 d_2}$ – термические сопротивления теплоотдаче на соответствующих поверхностях;

$\frac{1}{2l} \ln \frac{d_2}{d_1}$ – термические сопротивления теплопроводности стенки.

1.10 Пути интенсификации теплопередачи

а) Интенсификация теплопередачи путем увеличения коэффициента теплоотдачи

Из уравнения теплопередачи $Q = k \cdot F \cdot \Delta t$ следует, что при заданных размерах стенки и температурах жидкостей величиной, определяющей теплоотдачу, является *k*.

Например, если мы имеем дело с плоской стенкой, для которой

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{d}{l} + \frac{1}{a_2}},$$

то при $d / l \to 0$ (что можно принять для тонких стенок с большим коэффициентом λ)

$$k^{/} = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}} = \frac{a_1}{1 + \frac{a_1}{a_2}} = \frac{a_2}{\frac{a_2}{a_1} + 1}$$

Из уравнения следует, что коэффициент теплопередачи не может быть больше самого малого α.

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}} = \frac{a_1}{1 + \frac{a_1}{a_2}} = \frac{a_2}{\frac{a_2}{a_1} + 1}$$

При $a_2 \to \infty$ k' стремится к своему предельному значению α_1. При $a_1 \to \infty$ коэффициент теплопередачи стремится к α_2.

При $\alpha_1 << \alpha_2$ для увеличения k' следует увеличивать α_1, т.е. уменьшать большее из термических сопротивлений $1/\alpha_1$.

Если $\alpha_1 \approx \alpha_2$ увеличение коэффициента теплопередачи возможно за счет увеличения любого из α.

б) Интенсификация теплопередачи за счет оребрения стенок

При передаче теплоты через цилиндрическую стенку термические сопротивления $\frac{1}{a_1 d_1}$ и $\frac{1}{a_2 d_2}$ определяются не только значениями коэффициентов теплоотдачи, но и размерами самих поверхностей.

Отсюда следует, что если α мало́, то термическое сопротивление теплоотдаче можно уменьшить путем увеличения соответствующей поверхности.

Такой же результат можно получить и для плоской стенки, если одну из поверхностей увеличить путем оребрения. Последнее обстоя-тельство и положено в основу интенсификации теплопередачи за счет оребрения. При этом термические сопротивления станут пропорциональны величинам

$$\frac{1}{a_1 F_1} \text{ и } \frac{1}{a_2 F_2}$$

Тепловой поток для односторонне-оребрённой поверхности:

$$Q = a_1 F\left(t_{ж1} - t_{c1}\right)$$

$$Q = \frac{l}{d} F\left(t_{c1} - t_{c2}\right)$$

$$Q = a_2 e\left(F + F_{оребр}\right)\left(t_{c2} - t_{ж2}\right)$$

где F – площадь поверхности без рёбер; $F_{оребр}$ – площадь рёбер; ε - коэффициент, учитывающий отличие средней температуры ребра от температуры основания.

Решая совместно три уравнения, получаем:

$$k_{оребр} = \frac{1}{\dfrac{1}{a_1} + \dfrac{d}{l} + \dfrac{F}{a_2 e\left(F + F_{оребр}\right)}} > k = \frac{1}{\dfrac{1}{a_1} + \dfrac{d}{l} + \dfrac{1}{a_2}}$$

Следует указать, что при использовании метода оребрения нужно руководствоваться следующими соображениями:

если $\alpha_1 << \alpha_2$, то оребрять поверхность со стороны α_1 следует до тех пор, пока $a_1 F_1$ не достигает значения $a_2 F_2$. Дальнейшее увеличение поверхности F_1 малоэффективно.

Ребристые поверхности изготавливаются или в виде сплошных отливок или отдельных ребер, прикрепленных к поверхности.