

ЛЕКЦИЯ 12

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ АДДИТИВНОСТЬ ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Теплопередача в поверхностных теплообменниках

Поверхностными называют теплообменники, в которых перенос тепла от горячего теплоносителя к холодному осуществляется через разделяющую их поверхность. Это самый распространенный тип теплообменников, применяемых в химической промышленности. К ним относятся: кожухотрубные, спиральные, оребренные, двухтрубные, пластинчатые и другие виды теплообменников.

Процесс переноса тепла от горячего теплоносителя к холодному через границу раздела или через разделяющую поверхность (стенку) называется теплопередачей.

Теплопередача - сложный процесс, включающий перенос тепла из ядра потока горячего теплоносителя к стенке (границе раздела), перенос тепла через стенку (границу раздела) и перенос тепла от стенки (границы раздела) в ядро потока холодного теплоносителя.

Основное уравнение теплопередачи

$$\dot{Q} = K_T A \Delta T_{cp} \quad (12.1)$$

где \dot{Q} – тепловой поток в процессе теплопередачи, Вт; A – поверхность теплообмена, м²; ΔT_{cp} – средняя движущая сила процесса теплопередачи, °С; K - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплопередачи показывает, какое количество теплоты переходит в единицу времени от более нагретого к менее нагретому теплоносителю через 1 м² теплообменной поверхности при разности температур между теплоносителями в 1 градус.

Перенос тепла в пределах одной фазы (от стенки в ядро потока или из ядра потока к стенке) называется теплоотдачей. Описывается уравнением Ньютона (ур. 9.11).

В процессе теплопередачи теплоносители могут изменять свою температуру вдоль поверхности теплообмена (при нагреве или охлаждении) или температура может оставаться постоянной (процессы кипения или конденсации при постоянном давлении).

Аддитивность термических сопротивлений

Перенос тепла через теплопередающую плоскую стенку при постоянной температуре теплоносителей в стационарном режиме

Рассмотрим установившийся процесс теплопередачи от горячего теплоносителя 1 с постоянной температурой T_1 к холодному теплоносителю 2 с постоянной температурой T_2 через разделяющую их многослойную плоскую стенку.

Стенка состоит из n слоев с различной теплопроводностью λ_{Ti} и толщиной δ_i . Тепловой поток через поверхность теплообмена A от горячего теплоносителя к холодному теплоносителю постоянен и равен \dot{Q} .

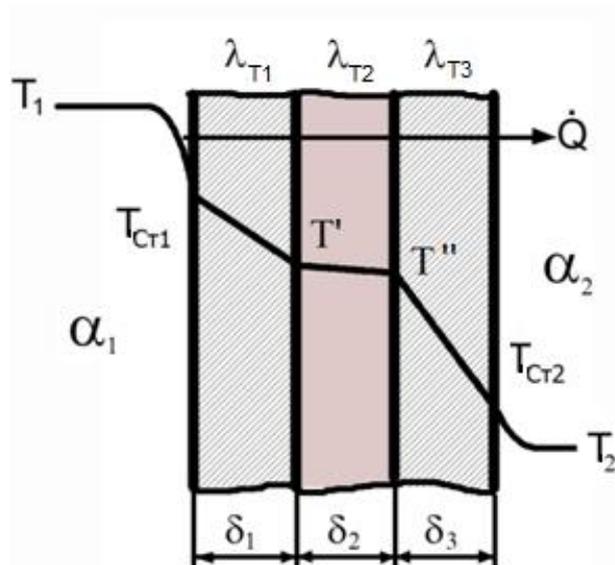


Рис.12.1. Распределение температур в процессе теплопередачи через многослойную плоскую стенку

Запишем выражения для теплового потока \dot{Q} на различных стадиях теплопередачи.

1. Перенос теплоты из ядра потока горячего теплоносителя к стенке описывается уравнением Ньютона:

$$\dot{Q} = \alpha_1 A (T_1 - T_{Cm1}), \quad (12.2)$$

α_1 - коэффициент теплоотдачи горячего теплоносителя, а T_{Cm1} - температура стенки со стороны горячего теплоносителя.

2. Перенос теплоты через многослойную плоскую стенку:

$$\dot{Q} = A \frac{T_{Cm1} - T_{Cm2}}{\sum_i^n \frac{\delta_i}{\lambda_{Ti}}} \quad (12.3)$$

T_{Cm2} - температура стенки со стороны холодного теплоносителя.

3. Перенос теплоты от стенки в ядро холодного теплоносителя:

$$\dot{Q} = \alpha_2 A (T_{Cm2} - T_2), \quad (12.4)$$

где α_2 - коэффициент теплоотдачи холодного теплоносителя.

Перепишем эти уравнения относительно разности температур:

$$T_1 - T_{Cm1} = \frac{\dot{Q}}{\alpha_1 A} \quad (12.5)$$

$$T_{Cm1} - T_{Cm2} = \frac{\dot{Q}}{A} \sum_i^n \frac{\delta_i}{\lambda_{Ti}} \quad (12.6)$$

$$T_{Cm2} - T_2 = \frac{\dot{Q}}{\alpha_2 A} \quad (12.7)$$

Сложим уравнения (12.5)÷(12-7):

$$(T_1 - T_{Cm1}) + (T_{Cm1} - T_{Cm2}) + (T_{Cm2} - T_2) = \frac{\dot{Q}}{\alpha_1 A} + \frac{\dot{Q}}{A} \sum_i^n \frac{\delta_i}{\lambda_{Ti}} + \frac{\dot{Q}}{\alpha_2 A}$$

Получим:

$$T_1 - T_2 = \frac{\dot{Q}}{A} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_i^n \frac{\delta_i}{\lambda_{Ti}} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (12.8)$$

Перепишем полученное уравнение относительно \dot{Q} :

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_i^n \frac{\delta_i}{\lambda_{Ti}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)} A \quad (12.9)$$

Сравним полученное выражение с уравнением теплопередачи:

$$\dot{Q} = K_T A (T_1 - T_2), \quad (12.1)$$

K_T - коэффициент теплопередачи (Вт/(м²К))

Тогда

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_i^n \frac{\delta_i}{\lambda_{Ti}} + \frac{1}{\alpha_2} \right)} \quad (12.10)$$

Или

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_i^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)} \quad (12.11)$$

Величину $\frac{1}{K}$ обозначим как общее термическое сопротивление R ,

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_i^n \frac{\delta_i}{\lambda_{Ti}} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (12.12)$$

$$R = r_1 + r_{Cm} + r_2 \quad (12.13)$$

где $r_1 = \frac{1}{\alpha_1}$ - термическое сопротивление переносу теплоты от горячего теплоносителя к стенке;

$r_{Cm} = \sum_i^n \frac{\delta_i}{\lambda_{Ti}}$ - термическое сопротивление плоской многослойной стенки, состоящей из n слоев;

$r_2 = \frac{1}{\alpha_2}$ - термическое сопротивление переносу теплоты от стенки в холодный теплоноситель.

Уравнения (12.10)-(12.13) являются различными формами уравнения аддитивности термических сопротивлений при теплопередаче. Из уравнения аддитивности следует, что общее сопротивление теплопередачи складывается из суммы сопротивлений на отдельных стадиях теплопередачи.

Общее термическое сопротивление теплопередачи R всегда больше термического сопротивления на отдельной стадии, в частности, $R > r_1$ и $R > r_2$. Из этого следует, что коэффициент теплопередачи всегда меньше коэффициентов теплоотдачи $K_T < \alpha_1$, $K_T < \alpha_2$.

Чем меньше общее термическое сопротивление теплопередачи R , тем выше коэффициент теплопередачи K_T и интенсивность теплообмена.

В некоторых случаях теплообмена одно термическое сопротивление намного превышает остальные. Например, в процессах переноса тепла от горячей жидкости в трубах к окружающему воздуху, сопротивление теплоотдаче от стенки к воздуху намного

больше, чем сопротивление теплоотдаче внутри труб. Поэтому, значение коэффициента теплопередачи K_T будет в основном определяться наименьшим значением коэффициента теплоотдачи в воздухе $\alpha_{возд}$, т.е. $K_T \approx \alpha_{возд}$.

Следовательно, для увеличения скорости переноса тепла необходимо воздействовать на ту стадию теплопередачи, в которой сосредоточено основное термическое сопротивление. В частности, поддерживать поверхности стенок свободными от загрязнений, увеличивать скорость и степень турбулизации теплоносителей и т.д.

Перенос тепла через теплопередающую цилиндрическую стенку при постоянной температуре теплоносителей в стационарном режиме

Рассмотрим процесс теплопередачи от горячего теплоносителя, движущегося внутри трубы, к холодному теплоносителю снаружи трубы. Горячий теплоноситель имеет температуру T_1 , холодный - температуру T_2 . Многослойная цилиндрическая стенка состоит из n слоев с различной теплопроводностью λ_{Ti} и толщиной δ_i . Процесс переноса теплоты установившийся $\dot{Q} = \text{const}$.

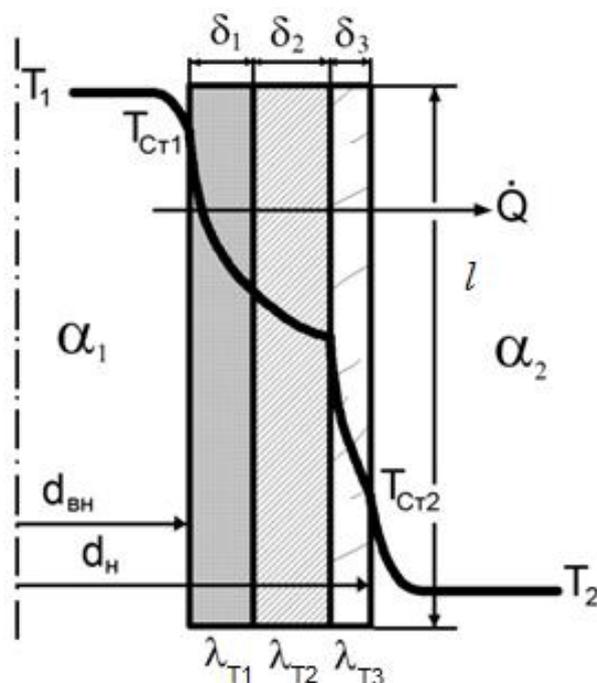


Рис.12.2. Распределение температур в процессе теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку

Запишем выражения для теплового потока \dot{Q} на различных стадиях теплопередачи:

1. Перенос теплоты из ядра потока горячего теплоносителя к стенке описывается уравнением Ньютона:

$$\dot{Q} = \alpha_1 A_{вн} (T_1 - T_{Cm1}) = \alpha_1 \pi d_{вн} l (T_1 - T_{Cm1}), \quad (12.14)$$

α_1 - коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке, а T_{Cm1} - температура стенки со стороны горячего теплоносителя, $A_{вн}$ - площадь внутренней поверхности трубы длиной l , $d_{вн}$ - внутренний диаметр трубы;

2. Перенос теплоты через многослойную цилиндрическую стенку:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi l}{\sum_i^n \frac{1}{\lambda_{Ti}} \ln\left(\frac{d_n}{d_{вн}}\right)_i} (T_{Cm1} - T_{Cm2}) \quad (12.15)$$

T_{Cm2} - температура стенки со стороны холодного теплоносителя.

3. Перенос теплоты от стенки в ядро потока холодного теплоносителя:

$$\dot{Q} = \alpha_2 A_n (T_{Cm2} - T_2) = \alpha_2 \pi d_n l (T_{Cm2} - T_2) \quad (12.16)$$

где α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю, A_n - площадь наружной поверхности трубы длиной l , d_n - наружный диаметр трубы.

Перепишем эти уравнения относительно разности температур:

$$(T_1 - T_{Cm1}) = \frac{\dot{Q}}{\alpha_1 \pi d_{вн} l} \quad (12.17)$$

$$(T_{Cm1} - T_{Cm2}) = \frac{\dot{Q}}{2\pi l} \sum_i^n \frac{\ln(d_n / d_{вн})_i}{\lambda_{Ti}} \quad (12.18)$$

$$(T_{Cm2} - T_2) = \frac{\dot{Q}}{\alpha_2 \pi d_n l} \quad (12.19)$$

Сложим уравнения (12.17)-(12-19):

$$(T_1 - T_{Cm1}) + (T_{Cm1} - T_{Cm2}) + (T_{Cm2} - T_2) = \frac{\dot{Q}}{\alpha_1 \pi d_{вн} l} + \frac{\dot{Q}}{2\pi l} \sum_i^n \frac{\ln(d_n / d_{вн})_i}{\lambda_{Ti}} + \frac{\dot{Q}}{\alpha_2 \pi d_n l}$$

Получим:

$$(T_1 - T_2) = \frac{\dot{Q}}{2\pi l} \left(\frac{1}{\alpha_1 r_{вн}} + \sum_i^n \frac{\ln(d_n / d_{вн})_i}{\lambda_{Ti}} + \frac{\dot{Q}}{\alpha_2 r_n} \right) \quad (12.20)$$

Перепишем полученное уравнение относительно \dot{Q} :

$$\dot{Q} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1 r_{вн}} + \sum_i^n \frac{\ln(d_n / d_{вн}) \lambda_i}{\lambda_{T_i}} + \frac{\dot{Q}}{\alpha_2 r_n} \right)} 2\pi l (T_1 - T_2). \quad (12.21)$$

Полученное уравнение является уравнением теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку:

$$\dot{Q} = K_r 2\pi l \Delta T, \quad (12.22)$$

$$\text{где: } K_r = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1 r_{вн}} + \sum_i^n \frac{\ln(d_n / d_{вн}) \lambda_i}{\lambda_{T_i}} + \frac{\dot{Q}}{\alpha_2 r_n} \right)} \quad (12.23)$$

K_r - линейный коэффициент теплопередачи, отнесенный к единице длины трубы (Вт/м·К).

Полученные уравнения на практике применяют для толстостенных труб, у которых отношение наружного и внутреннего диаметров больше 2: $d_n / d_{вн} > 2$.

Если же отношение $d_n / d_{вн} < 2$, то расчет с достаточной степенью точности можно проводить по уравнениям для плоских стенок (12.10)-(12.11) для среднего диаметра трубы $d_{ср} = (d_n + d_{вн}) / 2$.