

Тема: КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

1. Понятие конвекции и конвективного теплообмена, их виды.
2. Закон теплоотдачи (закон Ньютона-Рихмана)
3. Гидродинамический и тепловой пограничные слои.
4. Критерии теплообмена
5. Процесс теплопередачи

1. ПОНЯТИЕ КОНВЕКЦИИ И КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА, ИХ ВИДЫ.

В промышленности и сельскохозяйственном производстве широко применяются различные теплообменные устройства, предназначенные для передачи теплоты от одной среды к другой (обогрев зданий и сооружений с помощью отопительных приборов, нагрев молока при его пастеризации, нагрев воды и генерация пара в котельных установках, нагрев воздуха в калориферах и отопительно-вентиляционных агрегатах и т. д.). В этих устройствах, как правило, происходит теплообмен между движущимися средами через поверхность раздела фаз или через разделяющую их стенку.

Конвекция - это передача теплоты посредством перемещения в пространстве неравномерно нагретых макрообъемов (потоков) газа, пара, жидкости. В теплотехнике их называют одним наименованием – жидкость. Движущаяся среда, используемая для переноса теплоты, называется теплоносителем.

Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью.

Конвективным называется теплообмен, обусловленный совместным действием конвекции и теплопроводности.

Теплоотдачей называется конвективный теплообмен, происходящий:

- между теплоносителем и омываемой поверхностью (твердым телом, стенкой);
- между теплоносителем и жидкостью, газом.

Поверхность раздела, через которую происходит перенос теплоты, носит название поверхности теплообмена или теплоотдающей поверхности.

Интенсивность теплоотдачи в большинстве случаев зависит от скорости движения теплоносителя относительно поверхности теплообмена.

Движение теплоносителя может быть свободным (естественным) или вынужденным.

Свободная конвекция на практике часто происходит за счет разности плотностей нагретых и холодных объемов жидкости, находящихся в поле гравитационных сил (гравитационная свободная конвекция).

Вынужденная конвекция осуществляется нагнетателями (насосами, компрессорами, вентиляторами)

2. ЗАКОН ТЕПЛООТДАЧИ (ЗАКОН НЬЮТОНА-РИХМАНА)

Закон теплоотдачи широко используется для количественного описания конвективного теплообмена. Он гласит:

плотность теплового потока q , переносимого путем конвекции от поверхности теплообмена к движущейся среде (и наоборот), пропорциональна разности температур поверхности теплообмена (стенки) t_C и движущегося теплоносителя t_J (рис. 1):

$$q = \alpha \cdot (t_C - t_J), \text{ Вт/м}^2 \quad (1)$$

α - коэффициент пропорциональности, который называется коэффициентом теплообмена или теплоотдачи. Он имеет размерность $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$t_C - t_J = \Delta t$ – называется температурным напором, °С.

Температурный напор Δt определяется как разность характерных температур теплоносителя и стенки (или границы раздела фаз) или двух теплоносителей, между которыми происходит теплообмен.

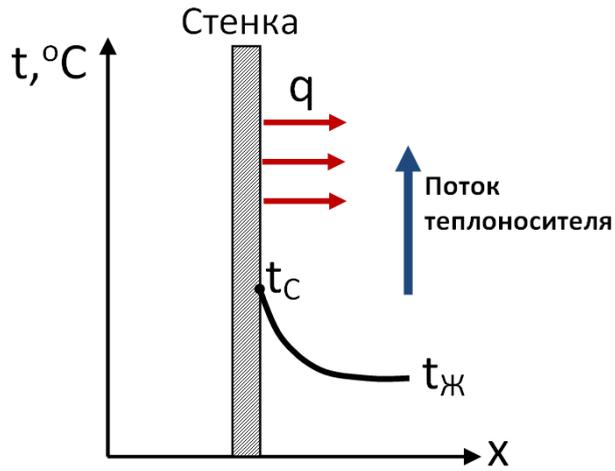


Рис. 1 Процесс теплоотдачи

Коэффициент α характеризует интенсивность теплоотдачи между поверхностью теплообмена и теплоносителем. Он показывает какое количество теплоты передается в течение 1 секунды от потока теплоносителя к 1 м² стенки или поверхности при разности температур в 1 К.

Коэффициент теплообмена — это расчетная величина, находящаяся обычно из уравнений, полученных экспериментально.

В определенной точке поверхности теплообмена рассматривают местный (локальный) коэффициент теплообмена.

Коэффициент теплообмена — важный теплофизический параметр, необходимый для расчета теплообменного аппарата. В общем случае он зависит от физических свойств жидкости, конфигурации, от размеров поверхности теплообмена и от условий обтекания ее жидкостью.

Рассматривают также средний коэффициент теплообмена, равный всему тепловому потоку Φ , отнесенному к поверхности теплообмена A и к температурному напору Δt :

$$\alpha_{cp} = \frac{\Phi}{\Delta t \cdot A}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} \tag{2}$$

где $\Delta t = t_c - t_ж$, °С.

3. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ И ТЕПЛОВОЙ ПОГРАНИЧНЫЕ СЛОИ

Интенсивность теплоотдачи зависит от характера движения жидкости относительно поверхности теплообмена, который может быть ламинарным или турбулентным.

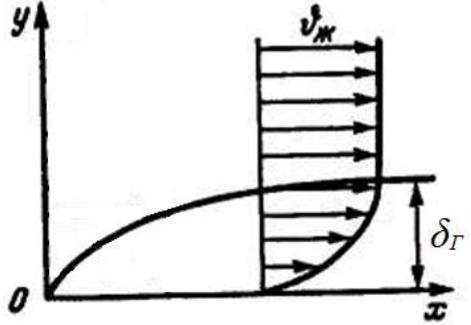


Рис. 2 Поперечное изменение скорости в гидродинамическом пограничном слое

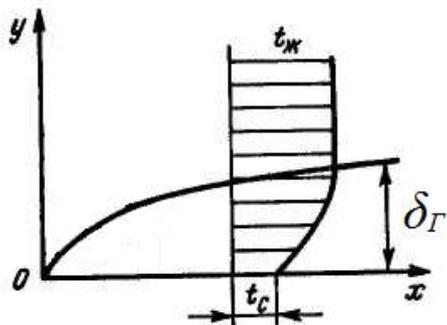


Рис. 3 Поперечное изменение температуры в тепловом пограничном слое

При ламинарном режиме течения частицы жидкости движутся, не перемешиваясь друг с другом, параллельно стенкам канала и траекториям других частиц.

Турбулентный режим характеризуется непрерывным перемешиванием всех слоев жидкости. При этом в потоке возникают пульсации скорости, давления и других параметров, приводящие к интенсивному перемешиванию частиц жидкости между собой.

Рис. 2 иллюстрирует формирование гидродинамического пограничного слоя при продольном обтекании жидкостью некоторой поверхности.

По аналогии с гидродинамическим пограничным слоем Г. Н. Кружилиным было введено понятие теплового пограничного слоя (рис. 3).

Тепловой пограничный слой - это слой жидкости толщиной δ_T у поверхности тела, в пределах которого температура изменяется от температуры поверхности стенки t_c до значения температуры жидкости $t_{ж}$ вдали от поверхности.

Продольная составляющая скорости или температура, с заданной точностью достигают своего предельного значения вдали от стенки, т.е. в ядре потока. В общем случае толщина гидродинамического пограничного слоя отличается от толщины теплового пограничного слоя: $\delta_G \neq \delta_T$.

В турбулентном пограничном слое перенос теплоты в направлении оси y обусловлен турбулентным перемешиванием жидкости, т.е. конвекцией. Однако непосредственно у поверхности тела в ламинарном подслое, а также в ламинарном пограничном слое теплота в направлении оси y передается в основном теплопроводностью.

4. КРИТЕРИИ ТЕПЛООБМЕНА

Определение коэффициента теплообмена α всегда базируется на экспериментальных данных.

При изучении конвективного теплообмена и для определения коэффициента теплоотдачи α применяется теория подобия.

Теорией подобия называется учение о подобных физических явлениях.

В теплотехнике чаще всего пользуются следующими критериями подобия: критерий Рейнольдса (Re); критерий Прандтля (Pr); критерий Грасгофа (Gr); критерий Нуссельта (Nu);

1) Критерий Рейнольдса Re представляет собой отношение сил инерции к силам вязкости и определяет характер (режим) течения жидкости:

$$Re_{ж} = \frac{W \cdot l}{\nu_{ж}} \quad (3)$$

где W – средняя скорость течения жидкости, м/с;

$\nu_{ж}$ – кинематический коэффициент вязкости жидкости при данной температуре движущейся среды $t_{ж}$, м²/с;

При $Re < 2300$ движение жидкости является ламинарным;

При $Re > 10^4$ – режим течения турбулентный;

Если имеет место $2300 < Re < 10^4$, то режим будет переходный.

2) Критерий Прандтля Pr определяет физические свойства жидкости:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda_{ж}} = \frac{\nu}{a} \quad (4)$$

где μ - динамический коэффициент вязкости, Н·с/м²;

a – коэффициент температуропроводности жидкости при данной температуре, м²/с;

C_p – изобарная массовая теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К);

$\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности, определяемый при температуре жидкости $t_{ж}$, Вт/(м·К).

3) Критерий Грасгофа Gr характеризует соотношение подъемных сил, возникающих в жидкости при нагреве, и сил вязкости:

$$Gr_{ж} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta_{ж} \cdot \Delta t}{\nu_{ж}} \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²

Δt – разность температур поверхности (стенки) и жидкости, между которыми происходит теплообмен, °С или К.

$\beta_{ж}$ – коэффициент объемного расширения жидкости, 1/К.

Для жидких теплоносителей коэффициент $\beta_{жс}$ выбирают из справочных таблиц.

Для газообразных теплоносителей коэффициент $\beta_{жс}$ рассчитывают по формуле:

$$\beta_{ж} = \frac{1}{T_{ж}}, 1/K \quad (6)$$

где $T_{ж} = t_{ж} + 273$ – абсолютная температура К.

4) Критерий Нуссельта Nu характеризует интенсивность теплообмена в пограничном слое между жидкостью и поверхностью омываемого тела.

Для процессов конвективного теплообмена критериальное уравнение представляют в виде:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{ж}} = f(Re, Gr, Pr) \quad (7)$$

где l – характерный размер, м;

Для различных режимов течения жидкости критерий Нуссельта определяется по следующим формулам:

а) При *ламинарном* вязкостном режиме ($Pr_{ж} \cdot Gr_{ж} < 8 \cdot 10^5$):

$$Nu = 0,15 \cdot Re_{ж}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}} \right)^{0,25} \quad (8)$$

где $Pr_{ж}$ – критерий Прандтля, определенный для температуры жидкости;

$Pr_{с}$ – критерий Прандтля, определенный для температуры стенки.

б) При *ламинарном* вязкостно-гравитационном режиме ($Pr_{ж} \cdot Gr_{ж} \geq 8 \cdot 10^5$):

$$Nu = 0,15 \cdot Re_{ж}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot Gr_{ж}^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}} \right)^{0,25} \quad (9)$$

в) При *переходном* режиме:

$$Nu = 0,008 \cdot Re_{ж}^{0,9} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \quad (10)$$

г) При *турбулентном* режиме:

$$Nu = 0,021 \cdot Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \quad (11)$$

где ε_l – поправочный коэффициент, учитывающийся при отношении $l/d < 50$. Если $l/d \geq 50$, то $\varepsilon_l = 1$.

Определив критерий Нуссельта из уравнения (7) находят коэффициент теплообмена α .

5. ПРОЦЕСС ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Теплопередача - это теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их твёрдую стенку (рис.4) или через поверхность раздела между ними.

Теплопередача включает в себя:

- теплоотдачу от более горячей жидкости к стенке;
- теплопроводность в стенке;
- теплоотдачу от стенки к более холодной жидкости.

Рассмотрим процесс теплопередачи через плоскую стенку при стационарном режиме (рис. 4).

У нас имеется плоская однослойная стенка с коэффициентом теплопроводности λ и толщиной δ .

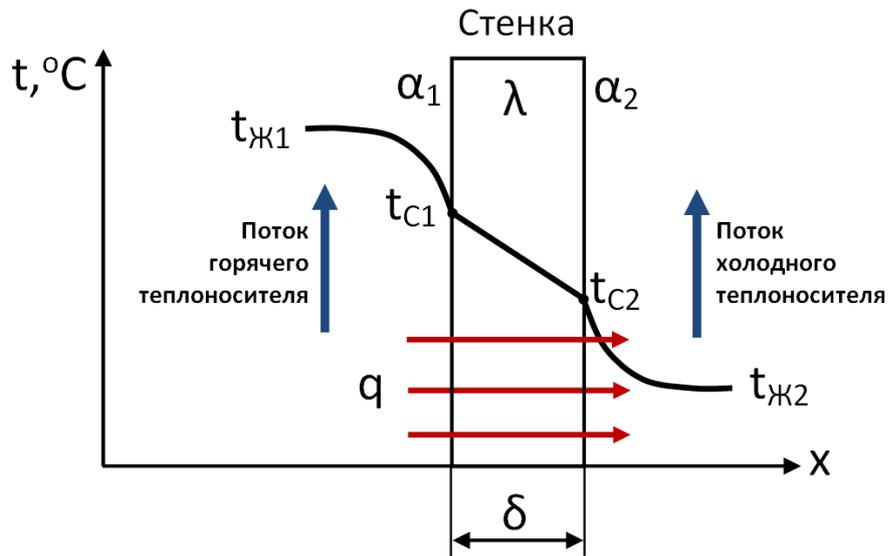


Рис. 4 Теплопередача через плоскую однослойную стенку

По одну сторону стенки находится горячая среда с температурой $t_{ж1}$, по другую – холодная среда с температурой $t_{ж2}$. Температуры поверхностей обозначим t_{c1} и t_{c2} .

Значение коэффициента теплоотдачи от горячей жидкости к поверхности стенки будет α_1 , от поверхности стенки к холодной жидкости - α_2 .

Плотность теплового потока q величина постоянная во времени и не зависит от координаты x .

В данном случае мы можем записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} q = \alpha_1(t_{ж1} - t_{c1}) - \text{уравнение теплоотдачи} \\ q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{c1} - t_{c2}) - \text{уравнение теплопроводности} \\ q = \alpha_2(t_{c2} - t_{ж2}) - \text{уравнение теплоотдачи} \end{cases} \quad (12)$$

Решая эту систему, получим уравнение плотности теплового потока:

$$q = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}) = K \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}), \text{ Вт/м}^2 \quad (13)$$

где K – называется коэффициентом теплопередачи, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К} \quad (14)$$

Коэффициент теплопередачи K характеризует интенсивность передачи теплоты. Он численно равен количеству теплоты, которое передаётся через 1 м^2 поверхности стенки в 1 секунду при разности температур между жидкостями в 1 К.

На практике коэффициент теплопередачи определяется опытным путём.

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется полным термическим сопротивлением R процесса:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт} \quad (15)$$

Тепловой поток при теплопередаче определяется:

$$\Phi = K \cdot A \cdot \Delta t, \text{ Вт} \quad (16)$$

где $\Delta t = t_{ж1} - t_{ж2}$ - температурный напор, $^\circ\text{C}$.