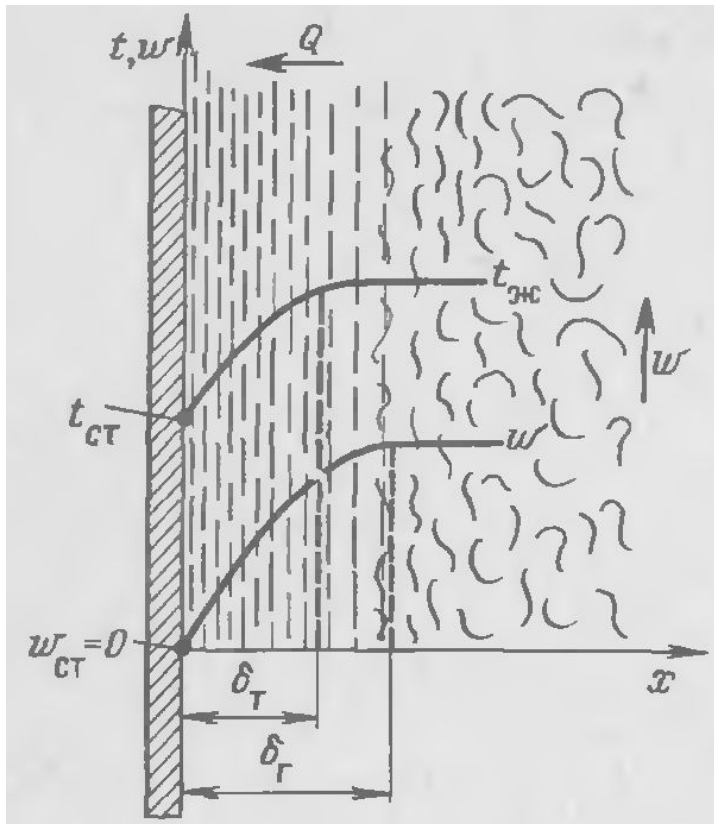


## Лекция №7. Конвективный теплообмен

Теплообмен между поверхностью твёрдого тела и жидкой или газообразной средой при их непосредственном соприкосновении называется теплоотдачей или конвективным теплообменом. При конвективном теплообмене передача тепла от поверхности твёрдого тела в ядро жидкой среды или от жидкой среды к поверхности твёрдого тела осуществляется теплопроводностью и конвекцией.



Интенсивность конвективного теплообмена в основном определяется наличием и толщиной ламинарного пограничного слоя  $\delta_r$ . Через этот слой тепло передаётся лишь путём теплопроводности.

Толщина ламинарного пограничного слоя  $\delta_r$  зависит от режима движения жидкости. Она уменьшается с увеличением скорости движения жидкости и уменьшением вязкости. Поэтому интенсивность теплоотдачи находится в прямой зависимости от скорости потока и в обратной – от вязкости среды.

## Уравнение теплоотдачи

В основе расчётов конвективного теплообмена лежит закон Ньютона:

$$dQ = \alpha dF(t_n - t_{cp})d\tau, \text{ Дж/ккал} \quad (1)$$

Количество теплоты, переданной от теплообменной поверхности в окружающую её среду или, наоборот, от окружающей среды к теплообменной поверхности, прямо пропорционально площади поверхности теплообмена  $dF$ , разности температур между поверхностью тела и средой  $(t_n - t_{cp})$  и временем  $d\tau$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и средой.

Физический смысл коэффициента  $\alpha$  заключается в том, что он представляет собой количество теплоты  $Q$ , отдаваемой единицей поверхности в единицу времени при разности температур между твёрдой поверхностью и средой в один градус. Размерность коэффициента теплоотдачи наход

$$[\alpha] = \left[ \frac{Q}{F\tau(t_{ж} - t_{ст})} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}} \right] = \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right].$$

Коэффициент  $\alpha$  зависит от физической природы процесса, физических свойств участвующих в теплообмене веществ, геометрических характеристик аппаратуры и условий на границах системы, в которой протекает данный процесс.

## Тепловое подобие или подобие процессов теплоотдачи

Аналитическую зависимость между параметрами, определяющими значение коэффициента теплоотдачи, получить невозможно, поэтому на помощь привлекается эксперимент и теория подобия.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (2)$$

Уравнение, характеризующее условия теплообмена на границе раздела движущейся среды и твёрдого тела, имеет вид:

$$-\lambda(\partial t / \partial \delta) = \alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}). \quad (3)$$

Точное решение дифференциальных уравнений (2) и (3) возможно лишь в редких случаях. Поэтому из данных уравнений методом теории подобия выводятся критерии подобия, и конвективный теплообмен представляется обобщённым уравнением в форме зависимости между критериями подобия. Эта зависимость имеет вид:  $Nu = f(Re, Pr, Gr, l/l_0 \dots l_n/l_0)$ , (4) где  $Nu = \alpha/\lambda$ , критерий Нуссельта  $Nu$  характеризует отношение суммарного переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью (т.е. теплоотдачей) к теплоте, передаваемой теплопроводностью ( $l$  – определяющий геометрический размер: например, для потоков, движущихся в трубе, – диаметр трубы).

## Тепловое подобие или подобие процессов теплоотдачи

$Re = w d \rho / \mu$ , критерий Рейнольдса  $Re$ , характеризует режим течения жидкости или газа или отношение сил трения к инерционным силам.

$Pr = \mu c / \lambda$ , критерий Прандтля  $Pr$ , характеризует подобие физических свойств теплоносителей и выражает меру отношения переноса импульса посредством внутреннего трения к переносу тепла посредством теплопроводности.

$Gr = g l^2 \beta \Delta t / \mu$ , критерий Грасгофа  $Gr$ , показывает отношение сил вязкости к произведению подъёмной силы, определяемой разностью плотностей в различных точках неизотермического потока и силы инерции. Он характеризует движение при естественной конвекции

где  $\beta$  - коэффициент объёмного расширения, град<sup>-1</sup>

$l$  – геометрический размер, м

$\Delta t$  – разность температур между теплопередающей поверхностью и жидкостью или газом, град

$C$  – теплоёмкость потока, Дж/(кг · град).

## Тепловое подобие или подобие процессов теплоотдачи

При вынужденном движении жидкости (принудительная конвекция) уравнение (4) имеет вид:

$$Nu = c Re^m Pr^n (l/d)^R \quad \text{или} \quad Nu = f_1(Re, Pr, l/l_0 \dots l_n/l_0)$$

где  $m, n, k, c$  – величины, определяемые из опытов.

При естественной конвекции уравнение (4) может быть представлено в виде

$$Nu = c Gr^m Pr^n (l/d)^R \quad \text{или} \quad Nu = f_2(Gr, Pr, l/l_0 \dots l_n/l_0)$$

## Лучистый теплообмен

Излучением называется процесс переноса энергии в виде электромагнитных волн.

Тепловое излучение – результат внутриатомных процессов. Интенсивность теплового излучения возрастает с повышением температуры тела. Лучистая энергия распространяется в виде потока частиц, называемых квантами или фотонами, и обладает свойствами электромагнитных волн.

Тепловое и световое излучения имеют одинаковую природу, только различаются по длине волны. Длина волны световых лучей 0,4-0,8 мкм, инфракрасных лучей 0,8-400 мкм. Все тела не только излучают, но и непрерывно также поглощают лучистую энергию. При одинаковой температуре вся система тел находится в подвижном тепловом равновесии. Количество энергии, излучаемое единицей поверхности в единицу времени, называется лучеиспускательной способностью тела

$$E = Q/F, [\text{Вт}/\text{м}^2] \quad (5)$$

Из общего количества энергии  $Q_0$ , падающей на тело, часть её поглощается  $Q_A$ , часть  $Q_R$  отражается и часть проходит сквозь тела  $Q_D$ . Тогда баланс энергии составит:

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q_0 \quad (6)$$

## Лучистый теплообмен

При делении равенства на  $Q_0$  получим:

$$Q_A/Q_0 + Q_R/Q_0 + Q_D/Q_0 = 1 \quad (7),$$

где  $Q_A/Q_0 = A$  – характеризует поглотительную способность тела

$Q_R/Q_0 = R$  – характеризует отражательную способность тела

$Q_D/Q_0 = D$  – характеризует пропускную способность тела.

Следовательно равенство (7) можно представить как

$$A + R + D = 1 \quad (8)$$

Если тело поглощает всю падающую на него энергию,  $A = 1$ , а  $R = D = 0$ , такое тело называется абсолютно чёрным.

В природе абсолютно чёрных тел не существует. Наибольшей поглотительной способностью обладает нефтяная сажа, для которой  $A = 0,9-0,96$ .

Если  $R = 1$ , то  $A = D = 0$ . Это означает, что вся энергия, падающая на тело, отражается. Такое тело называется абсолютно белым или зеркальным. Для полированных металлов  $R$  достигает  $0,06-0,88$ .

Если тело пропускает всю падающую на него энергию, такое тело называется абсолютно прозрачным или диатермичным.  $D = 1$ , а  $A = R = 0$ . Примером такого тела может служить чистый воздух.

Величины  $A$ ,  $R$ ,  $D$  зависят от физических свойств тела, состояния их поверхности, температуры и длины волны падающего излучения.

## Лучистый теплообмен

Кирхгофф установил, что отношение лучеиспускающей способности любого тела к его лучепоглощательной способности при той же температуре является величиной постоянной, равной лучеиспускающей способности абсолютно чёрного тела:

$$E_1/A_1 = E_2/A_2 = \dots E_n/A_n = E_0/A_0 = E_0 = f(T)$$

где  $A_0$  – относится к абсолютно чёрному телу,  $A_0 = 1$ .

Отношение излучательной способности любого тела к излучательной способности абсолютно чёрного называется степенью черноты:

$$\varepsilon = E/E_0$$

Степень черноты  $\varepsilon$  изменяется в пределах 0-1 и зависит от природы тела, состояния его поверхности и температуры.

По закону Стефана-Больцмана лучеиспускающая способность абсолютно чёрного тела  $E_0$  пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры его поверхности.

$E_0 = K_0 T^4$ , где  $K_0$  – константа лучеиспускания абсолютно чёрного тела.

$$K_0 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$$

Для упрощения расчётов уравнение Стефана-Больцмана применяется в виде:

$E_0 = C_0 (T/100)^4$ , где  $C_0 = K_0 \cdot 10^8 = 5,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела



## Лучистый теплообмен между телами

Количество переданной теплоты лучеиспусканием зависит от температуры тела, состояния, формы, размеров и поверхностей тела, расположения в пространстве и расстояния между телами, участвующими в лучистом теплообмене.

Теплообмен между двумя неограниченными параллельными плоскостями определяется по уравнению:

$$E_{1-2} = \varepsilon_{\Pi} C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4], \text{ Вт/м}^2 \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{\Pi}$  – приведённая степень черноты системы тел, равная

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1},$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – степени черноты тел, участвующих в лучистом теплообмене

Для расчёта лучистого теплообмена между двумя поверхностями в замкнутом пространстве, когда одна из поверхностей  $F_2$  охватывает другую  $F_1$  можно пользоваться формулой (9). Но  $\varepsilon_{\Pi}$  определяется по формуле, учитывающей размеры поверхностей обоих тел:

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + F_1/F_2 (1/\varepsilon_2 - 1)},$$

## Лучистый теплообмен между телами

Лучистый теплообмен между двумя телами, произвольно расположенными в пространстве, рассчитывается по формуле

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{\Pi} C_o F_p [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \phi_{1-2}, [\text{Вт}] \quad (10)$$

где  $F_p$  – условная расчётная поверхность теплообмена

$\phi_{1-2}$  – средний угловой коэффициент облучения

$\phi_{1-2} = Q_{1-2}/Q_1$ , где  $Q_1$  – количество энергии, излучаемой первым телом.

Расчётная формула лучистого теплообмена между телом и окружающей средой имеет следующий вид:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_1 C_o F_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] - A_{1(s)} F_2 E_s, [\text{Вт}]$$

где  $Q_{1-2}$  – количество отданного телом тепла, Вт

$T_1$  – температура тела, К,

$T_2$  – температура окружающего пространства, К

$E_s$  – облучающая способность солнца, Вт/м<sup>2</sup>

$A_{1(s)}$  – поглотительная способность тела по отношению к солнечным лучам

$F_1$  – поверхность тела, получающего энергию, м<sup>2</sup>

$F_2$  – поверхность тела, освещаемая солнцем, м<sup>2</sup>

## Лучеиспускание газов

Излучение газов существенно отличается от излучения твёрдых тел, Газы излучают и поглощают энергию не во всём диапазоне волн, как это характерно для твёрдых тел, а лишь в определённых интервалах волн, в так называемых полосах, и вне этих полос они прозрачны. Газы излучают и поглощают всем объёмом, а твёрдые тела – только поверхностью.

Лучеиспускательная способность газов несколько отклоняется от закона Стефана-Больцмана. Так, для паров воды  $E \sim T^3$ , для  $\text{CO}_2$   $E \sim T^{3,5}$ . Однако в технических расчётах принимают, что газы следуют закону Стефана-Больцмана (отклонения учитывают степень черноты газа)

$E = C(T_1/100)^4$ , где  $C$  – коэффициент лучеиспускания

$C = \varepsilon_r C_0$ , где  $C_0$  - коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела

Расчётное уравнение (приближённое) для лучистого теплообмена между газом и поверхностью тела имеет вид:

$$E = \varepsilon_r \varepsilon_{\text{п.эф.}} C_0 [(T_{\text{газ}}/100)^4 - (T_{\text{пв.тела}}/100)^4],$$

где  $\varepsilon_{\text{п.эф.}}$  – эффективная степень черноты, принимается средней между  $\varepsilon_{\text{п}}$  и единицей

$$\varepsilon_{\text{п.эф.}} = (\varepsilon_{\text{п}} + 1)/2$$