

Тема 10. Конвективный теплообмен.

10.1. Факторы, влияющие на конвективный теплообмен.

Конвективным теплообменом называется одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью.

В инженерных расчетах часто определяют конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела. Этот процесс конвективного теплообмена называют конвективной теплоотдачей или просто теплоотдачей.

Основными факторами, влияющими на процесс теплоотдачи являются следующие:

1). Природа возникновения движения жидкости вдоль поверхности стенки.

Самопроизвольное движение жидкости (газа) в поле тяжести, обусловленное разностью плотностей её горячих и холодных слоев, называют свободным движением (естественная конвекция).

Движение, создаваемое вследствие разности давлений, которые создаются насосом, вентилятором и другими устройствами, называется вынужденным (вынужденная конвекция).

2). Режим движения жидкости.

Упорядоченное, слоистое, спокойное, без пульсаций движение называется ламинарным.

Беспорядочное, хаотическое, вихревое движение называется турбулентным.

3). Физические свойства жидкостей и газов.

Большое влияние на конвективный теплообмен оказывают следующие физические параметры: коэффициент теплопроводности (λ), удельная теплоемкость (c), плотность (ρ), коэффициент температуропроводности ($a = \lambda/c_p \cdot \rho$), коэффициент динамической вязкости (μ) или кинематической вязкости ($\nu = \mu/\rho$), температурный коэффициент объемного расширения ($\beta = 1/T$).

4). Форма (плоская, цилиндрическая), размеры и положение поверхности (горизонтальная, вертикальная).

10.2. Закон Ньютона-Рихмана.

Процесс теплообмена между поверхностью тела и средой описывается законом Ньютона-Рихмана, которая гласит, что количество теплоты, передаваемая конвективным теплообменом прямо пропорционально разности температур поверхности тела ($t_{ст}$) и окружающей среды ($t_{ж}$):

$$Q = \alpha \cdot (t_{ст} - t_{ж}) \cdot F, \quad (10.1)$$

или

$$q = \alpha \cdot (t_{ст} - t_{ж}), \quad (10.2)$$

где: коэффициент теплоотдачи [$Вт/(м^2К)$], характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Факторы, которые влияют на процесс конвективного теплообмена, включают в этот коэффициент теплоотдачи. Тогда коэффициент теплоотдачи является функцией этих параметров и можно записать эту зависимость в виде следующего уравнения:

$$\alpha = f_1(X; \Phi; l_0; x_c; y_c; z_c; w_0; \theta; \lambda; a; c_p; \rho; \nu; \beta), \quad (10.3)$$

где: X – характер движения среды (свободная, вынужденная);

Φ – форма поверхности;

l_0 – характерный размер поверхности (длина, высота, диаметр и т.д.);

$x_c; y_c; z_c$ – координаты;

w_0 – скорость среды (жидкость, газ);

$\theta = (t_{ст} - t_{ж})$ – температурный напор;

λ – коэффициент теплопроводности среды;

a – коэффициент температуропроводности среды;

c_p –изобарная удельная теплоемкость среды;
 ρ –плотность среды;
 ν – коэффициент кинематической вязкости среды;
 β – температурный коэффициент объемного расширения среды.

Уравнение (10.3) показывает, что коэффициент теплоотдачи величина сложная и для её определения невозможно дать общую формулу. Поэтому для определения коэффициента теплоотдачи применяют экспериментальный метод исследования.

Достоинством экспериментального метода является: достоверность получаемых результатов; основное внимание можно сосредоточить на изучении величин, представляющих наибольший практический интерес.

Основным недостатком этого метода является, что результаты данного эксперимента не могут быть использованы, применительно к другому явлению, которое в деталях отличается от изученного. Поэтому выводы, сделанные на основании анализа результатов данного экспериментального исследования, не допускают распространения их на другие явления. Следовательно, при экспериментальном методе исследования каждый конкретный случай должен служить самостоятельным объектом изучения.

10.3. Краткие сведения из теории подобия.

Для аналитического метода исследования конвективного теплообмена нужно решить систему дифференциальных уравнений, состоящий из:

1). Уравнения энергии (закон сохранения энергии):

$$\boxed{\times}$$

(10.4)

где: q_v - внутренний источник тепла.

или

$$\boxed{\times}, \quad (10.5)$$

где: $\boxed{\times} \quad \boxed{\times}$; (10.6)

$$\boxed{\times} \quad \boxed{\times} \quad (10.7)$$

2). Уравнения движения (импульса):

$$\boxed{\times}, \quad (10.8)$$

или

$$\boxed{\times} \quad (10.9)$$

3). Уравнения неразрывности (закон сохранения массы):

$$\boxed{\times} \quad (10.10)$$

4). Уравнение теплообмена (условие теплообмена на границе твердого тела и среды):

$$\alpha = -\lambda/\Delta t \cdot \partial t / \partial r_{n=0}. \quad (10.11)$$

Данные уравнения записаны для несжимаемой жидкости ($\rho = \text{Const}$).

Решение этих дифференциальных уравнений сложная и трудоемкая задача, и она возможна при ограниченных простых случаях. Поэтому при исследовании конвективного теплообмена применяют метод теории подобия.

Теория подобия – это наука о подобных явлениях. Подобными явлениями называются такие физические явления, которые одинаковы качественно по форме и по содержанию, т.е. имеют одну физическую природу, развиваются под действием одинаковых сил и описываются одинаковыми по форме дифференциальными уравнениями и краевыми условиями.

Обязательным условием подобия физических явлений должно быть геометрическое подобие систем, где эти явления протекают. Два физических явления будут подобны лишь в том случае, если будут подобны все величины, которые характеризуют их.

Для всех подобных систем существуют безразмерные комплексы величин, которые называются критериями подобия.

Основные положения теории подобия формулируют в виде 3-х теорем подобия.

1 теорема: Подобные явления имеют одинаковые критерии подобия.

2 теорема: Любая зависимость между переменными, характеризующая какие-либо явления, может быть представлена, в форме зависимости между критериями подобия, составленными из этих переменных, которая будет называться критериальным уравнением.

3 теорема: Два явления подобны, если они имеют подобные условия однозначности и численно одинаковые определяющие критерии подобия.

Условиями однозначности являются:

- наличие геометрического подобия систем;
- наличие одинаковых дифференциальных уравнений;
- существование единственного решения уравнения при заданных граничных условиях;
- известны численные значения коэффициентов и физических параметров.

10.4. Критериальные уравнения конвективного теплообмена.

Используя теорию подобия из системы дифференциальных уравнений 10.4, 10.9, 10.10 и 10.11 можно получить уравнение теплоотдачи (10.3) для конвективного теплообмена в случае отсутствия внутренних источников тепла в следующем критериальной форме:

$$Nu = f_2(X; \Phi; X_0; Y_0; Z_0; Re; Gr; Pr), \quad (10.12)$$

где: $X_0; Y_0; Z_0$ – безразмерные координаты;

$Nu = \alpha \cdot l_0 / \lambda$ - критерий Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи), характеризует теплообмен между поверхностью стенки и жидкостью (газом);

$Re = w \cdot l_0 / \nu$ - критерий Рейнольдса, характеризует соотношение сил инерции и вязкости и определяет характер течения жидкости (газа);

$Gr = (\beta \cdot g \cdot l_0^3 \cdot \Delta t) / \nu^2$ - критерий Грасгофа, характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости (газе) вследствие разности плотностей;

$Pr = \nu / a = (\mu \cdot c_p) / \lambda$ - критерий Прандтля, характеризует физические свойства жидкости (газа);

l_0 – определяющий размер (длина, высота, диаметр).

10.5. Расчетные формулы конвективного теплообмена.

Приведем некоторые основные расчетные формулы конвективного теплообмена (академика М.А.Михеева), которые даны для средних значений коэффициентов теплоотдачи по поверхности стенки.

1. Свободная конвекция в неограниченном пространстве.

а). Горизонтальная труба диаметром d при $10^3 < (Gr \cdot Pr)_{жсд} < 10^8$.

$$Nu_{жсд} = 0,5 \cdot (Gr_{жсд} \cdot Pr_{жсд})^{0,25} \cdot (Pr_{жсд} / Pr_{ст})^{0,25} \quad (10.13)$$

б). Вертикальная труба и пластина:

1). ламинарное течение - $10^3 < (Gr \cdot Pr)_{жс} < 10^9$:

$$Nu_{жсд} = 0,75 \cdot (Gr_{жсд} \cdot Pr_{жсд})^{0,25} \cdot (Pr_{жсд} / Pr_{ст})^{0,25} \quad (10.14)$$

2). турбулентное течение - $(Gr \cdot Pr)_{жс} > 10^9$:

$$Nu_{жсд} = 0,15 \cdot (Gr_{жсд} \cdot Pr_{жсд})^{0,33} \cdot (Pr_{жсд} / Pr_{ст})^{0,25} \quad (10.15)$$

Здесь значения $Gr_{жсд}$ и $Pr_{жсд}$ берутся при температуре жидкости (газа), а $Pr_{ст}$ при температуре поверхности стенки.

Для воздуха $Pr_{жсд} / Pr_{ст} = 1$ и формулы (10.13-10.15) упрощаются.

2. Вынужденная конвекция.

Режим течения определяется по величине Re .

а). Течение жидкости в гладких трубах круглого сечения.

1). ламинарное течение – $Re < 2100$

$$Nu_{жсд} = 0,15 \cdot Re_{жсд}^{0,33} \cdot Pr_{жсд}^{0,33} \cdot (Gr_{жсд} \cdot Pr_{жсд})^{0,1} \cdot (Pr_{жсд} / Pr_{ст})^{0,25} \cdot \varepsilon_1 \quad (10.16)$$

где ε_1 - коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы и зависит от отношения длины трубы к его диаметру (l/d). Значения этого коэффициента представлена в таблице 10.1.

Таблица 10.1.

Значение ε_1 при ламинарном режиме.

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_1	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

2). переходной режим – $2100 < Re < 10^4$

$$Nu_{жсд} = K_0 \cdot Pr_{жсд}^{0,43} \cdot (Pr_{жсд} / Pr_{ст})^{0,25} \cdot \varepsilon_1 \quad (10.17)$$

Коэффициент K_0 зависит от критерия Рейнольдса Re и представлена в таблице 10.2.

Таблица 10.2. Значение K_0 .

$Re \cdot 10^4$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	3	4	5	6	8	10
K_0	1,9	2,2	3,3	3,8	4,4	6,0	10,3	15,5	19,5	27,0	33,3

3). турбулентное течение – $Re = 10^4$

$$Nu_{\text{ждср.}} = 0,021 \cdot Re_{\text{жд}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \cdot \varepsilon_1 \quad (10.18)$$

Таблица 10.3.

Значение ε_1 при турбулентном режиме.

l/d	$Re = 2 \cdot 10^3$	$Re = 2 \cdot 10^4$	$Re = 2 \cdot 10^5$
1	1,9	1,51	1,28
2	1,70	1,40	1,22
5	1,44	1,27	1,15
10	1,28	1,18	1,10
15	1,18	1,13	1,08
20	1,13	1,11	1,06
30	1,05	1,05	1,03
40	1,02	1,02	1,02
50	1,00	1,00	1,00

б). Обтекание горизонтальной поверхности.

1). ламинарное течение – $Re < 4 \cdot 10^4$

$$Nu_{\text{ждср.}} = 0,66 \cdot Re_{\text{жд}}^{0,5} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,33} \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \quad (10.19)$$

2). турбулентное течение – $Re > 4 \cdot 10^4$

$$Nu_{\text{ждср.}} = 0,037 \cdot Re_{\text{жд}}^{0,5} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,33} \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \quad (10.20)$$

в). Поперечное обтекание одиночной трубы (угол атаки $\varphi = 90^0$).

1). при $Re_{\text{жд}} = 5 - 10^3$

$$Nu_{\text{ждср.}} = 0,57 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,5} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,38} \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \quad (10.21)$$

2). при $Re_{\text{жд}} = 10^3 - 2 \cdot 10^5$

$$Nu_{\text{ждср.}} = 0,25 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,6} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,38} \cdot (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \quad (10.22)$$