

Лекция № 5

Тема: «Основы конвективного
теплообмена»

Вопросы лекции:

- *1. Основной закон конвективного теплообмена. Физические свойства тел.
- *2. Теория пограничного слоя.
- *3. Основы теории подобия.
- *4. Приведение дифференциальных уравнений конвективного теплообмена и условий однозначности к безразмерному виду.

1. Основной закон конвективного теплообмена

**Под конвекцией теплоты понимается процесс переноса теплоты при перемещении макрочастиц жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью соприкасающегося с ним тела называется конвективной теплоотдачей или просто теплоотдачей.*

*При расчетах теплоотдачи используется закон Ньютона-Рихмана: тепловой поток в процессе теплоотдачи пропорционален площади поверхности теплоотдачи и разности температур между поверхностью тела и жидкости:

$$Q = aF |t_c - t_{\text{ж}}|.$$

Коэффициент пропорциональности α называется *коэффициентом теплоотдачи*, он характеризует интенсивность процесса теплоотдачи. Численное значение его равно тепловому потоку от единичной поверхности теплообмена при разности температур поверхности и жидкости в 1 К.

Коэффициент теплоотдачи зависит от большого количества факторов:

- * - формы и размеров тела,
- * - режима движения,
- * - скорости и температуры жидкости,
- * - физических параметров жидкости.

Различают свободную (естественную) и вынужденную конвекции (движение). Естественная конвекция возникает в жидкости с неоднородным распределением температуры и, как следствие, с неоднородным распределением плотности. В результате под действием поля земного тяготения возникает свободное гравитационное движение в жидкости. Вынужденное движение жидкости или газа создается внешним источником (насосом, вентилятором, ветром).

- * Большое влияние на теплообмен оказывают следующие физические параметры: коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость c , плотность ρ , коэффициент температуропроводности a , которые были рассмотрены ранее. Для каждого вещества эти параметры имеют определенные значения и являются функциями параметров состояния (температуры и давления, прежде всего температуры).
- * Все реальные жидкости обладают вязкостью; между частицами или слоями, движущимися с различными скоростями, всегда возникает сила внутреннего трения (касательное усилие), противодействующая движению. Согласно закону Ньютона эта *касательная сила s , отнесенная к единице поверхности, пропорциональна изменению скорости (градиенту скорости) в направлении нормали к плоскости, ориентированной по течению:*

$$s = \mu \frac{dw}{dn}$$

* Коэффициент пропорциональности, зависящий от природы жидкости и ее температуры, называется *динамическим коэффициентом вязкости*, или *коэффициентом внутреннего трения*, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

* В уравнения гидродинамики и теплопередачи часто входит кинематический коэффициент вязкости ν , представляющий собой отношение динамического коэффициента вязкости к плотности жидкости $\nu = \frac{\mu}{\rho}$:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

* Тепловое расширение жидкости характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения, который представляет собой относительное изменение объема при изменении температуры на один градус (при постоянном давлении):

$$\beta = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_p$$

Температурный коэффициент объемного расширения капельных жидкостей значительно меньше, чем газов. Для идеального газа температурный коэффициент объемного расширения есть величина, обратная абсолютной температуре: $\beta = 1/T$

* 2. Теория пограничного слоя

- * Зона потока, в которой наблюдается уменьшение скорости ($w < w_{\text{ж}}$), вызванное вязким взаимодействием жидкости с поверхностью, называется гидродинамическим пограничным слоем. За пределами пограничного слоя течет невозмущенный поток.
- * Характер движения жидкости в круглой трубе определяется числом Рейнольдса:
$$R_e = \frac{wd}{\nu}$$
- * где w - средняя скорость жидкости, м/с; d - диаметр круглого трубопровода, м; ν - коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с.
- * Следует отметить, что даже при турбулентном гидродинамическом пограничном слое непосредственно у стенки имеется очень тонкий слой жидкости, движение в котором имеет ламинарный характер. Этот слой называется вязким, или ламинарным, подслоем.

* 3. Основы теории подобия

- * Так условия подобия двух геометрических фигур можно записать:

$$\frac{l_1''}{l_1'} = \frac{l_2''}{l_2'} = \frac{l_3''}{l_3'} = C_l$$

- * где C_l - константа геометрического подобия.

- * Однородными называются физические величины, имеющие одинаковый физический смысл и одинаковую размерность. Сходственными называются такие точки системы, координаты которых удовлетворяют геометрическому подобию.

- * Сходственные моменты времени наступают по истечении периодов времени τ' и τ'' , имеющих общее начало отсчета и связанных между собой константой подобия по времени:

$$\frac{\tau''}{\tau'} = C_\tau$$

* Подобными называются физические явления, протекающие в геометрически подобных системах, если у них во всех сходственных точках и сходственные моменты времени отношения одноименных величин есть постоянные числа. Эти постоянные числа называются константами подобия.

* Рассмотрим правило выбора констант подобия на конкретном примере. Запишем уравнения теплоотдачи для сходственных точек двух подобных между собой явлений:

$$\alpha' = -\frac{\lambda'}{\Delta t'} \cdot \frac{\partial t'}{\partial n'} \quad \alpha'' = -\frac{\lambda''}{\Delta t''} \cdot \frac{\partial t''}{\partial n''}$$

* Обозначим константы подобия:

$$C_\alpha = \frac{\alpha''}{\alpha'} \quad C_\lambda = \frac{\lambda''}{\lambda'} \quad C_t = \frac{\Delta t''}{\Delta t'} \quad C_l = \frac{n''}{n'} = \frac{l''}{l'}$$

* где l - характерный размер системы.

* Из определения констант подобия следует, что:

$$\alpha'' = C_\alpha \alpha' \quad \lambda'' = C_\lambda \lambda' \quad \Delta t'' = C_t \Delta t' \quad t'' = C_t t' \quad n'' = C_l n'$$

* Полученное уравнение тождественно уравнению $\alpha' = -\frac{\lambda'}{\Delta t'} \cdot \frac{\partial t'}{\partial n'}$, так как они выражают связь между параметрами процесса, обусловленную дифференциальным уравнением теплоотдачи для одной и той же системой. Из условия тождественности уравнений следует, что:
$$\frac{C_\lambda}{C_\alpha \cdot C_l} = 1$$

* Следовательно, существуют такие безразмерные соотношения параметров, характеризующих процесс, которые у подобных явлений в сходственных точках имеют численно одинаковые значения. Такие безразмерные соотношения называются *числами (критериями) подобия*.

* Числа подобия принято называть именами крупных ученых. Записанное уравнением число называется *числом Нуссельта* и обозначается *Nu*.

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$

- * Первая теорема подобия устанавливает связь между константами подобия и позволяет вывести уравнения для чисел подобия. Теорема указывает, что при выполнении опытов необходимо и достаточно измерять лишь те величины, которые входят в числа подобия изучаемого явления.
- * Вторая теорема гласит: *интеграл дифференциального уравнения (или системы уравнений) может быть представлен как функция чисел подобия дифференциального уравнения.*
- * На основании этой теоремы любая зависимость между переменными, характеризующими какое-либо явление, может быть представлена в виде зависимости между числами подобия:

- *
$$f(K_1, K_2, K_3 \dots, K_n) = 0$$

* 4. Приведение дифференциальных уравнений конвективного теплообмена и условий однозначности к безразмерному виду

* Дифференциальное уравнение теплоотдачи выражает условия теплообмен на границе твердого тела и жидкости:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{\Delta t} \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0}$$

* Дифференциальное уравнение теплопроводности (уравнение энергии) устанавливает связь между пространственным и временным изменением температуры в любой точке движущейся жидкости:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 t$$

* Дифференциальное уравнение движения вязкой жидкости представлено уравнением Навье-Стокса:

* для оси x

$$\rho \left(\frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_x}{\partial z} w_z \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 w_x$$

* для оси y

$$\rho \left(\frac{\partial w_y}{\partial \tau} + \frac{\partial w_y}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_y}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_y}{\partial z} w_z \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 w_y$$

* для оси z

$$\rho \left(\frac{\partial w_z}{\partial \tau} + \frac{\partial w_z}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_z}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_z}{\partial z} w_z \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w_z$$

Дифференциальное уравнение сплошности или непрерывности, для сжимаемой жидкости имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0$$

* На основе анализа дифференциальных уравнений получены следующие числа (критерии) подобия:

* - из уравнения теплоотдачи число Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$

* - из уравнения теплопроводности

* число Фурье $Fo = \frac{a\tau}{l^2}$

* число Пекле $Pe = \frac{wl}{a}$

* - из уравнения движения

* число гомохронности $Ho = \frac{w\tau}{l}$

* число Эйлера

$$Eu = \frac{p}{\rho w^2}$$

* число Рейнольдса

$$Re = \frac{wl}{\nu}$$

* число Грасгофа

$$Gr = \frac{gl^3\beta}{\nu^2}$$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!