КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

1. Основные понятия и определения

Понятие конвективного теплообмена (теплоотдачи конвекцией) охватывает процесс теплообмена, обусловленный совместным действием конвективного и молекулярного переноса тепла. Под конвективным переносом понимается процесс переноса тепла при перемещении макрочастиц жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой. Конвекция возможна только при движении среды; перенос тепла конвекцией связан с переносом вещества. Под молекулярным переносом (теплопроводностью) понимается процесс переноса тепла посредством теплового движения микрочастиц в среде с неоднородным распределением температуры. Конвекция тепла всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры.

Обычно в инженерных расчетах определяют конвективный теплообмен между потоком жидкости или газа и поверхностью твердого тела, называемый конвективной теплоотдачей или просто теплоотдачей.

При практических расчетах теплоотдачи используют закон Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha\,(T_w - T_f)\,F.$$

Согласно этому закону тепловой поток Q (количество тепла, проходящее в единицу времени через произвольную поверхность от жидкости к стенке или от стенки к жидкости) пропорционален поверхности теплообмена F и разности температур поверхности тела T_w и окружающей тело жидкой или газообразной среды T_f. Разность температур $\Delta T = T_w - T_f$ называется температурным напором. Коэффициент пропорциональности α, учитывающий конкретные условия теплообмена, называется коэффициентом теплоотдачи.

$$q = \alpha(T_f - T_w), \qquad (1)$$

$$q = \lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w, \qquad (2)$$

$$\boxed{\alpha = \frac{\lambda}{T_f - T_w}\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w} \qquad (3)$$

Уравнения, описывающие движения жидкости и газа

Основные проблемы:

1) Математические
2) Турбулентность
3) Химические реакции
4) Неравновесные термодинамические процессы
5) Нарушения законов механики сплошной среды

2. Основные уравнения теории конвективного теплообмена

x_1, x_2, x_3 координатные оси x, y, z

V_1, V_2, V_3 — проекции вектора скорости на оси x_1, x_2, x_3,

Уравнение неразрывности

Гидродинамика

В гидродинамике **уравнение непрерывности', *иногда называемое*** *уравнением неразрывности*,' выражает собой закон сохранения массы в элементарном объеме, то есть непрерывность потока жидкости или газа. Его дифференциальная форма

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \operatorname{div} \vec{v} + \vec{v} \cdot \operatorname{grad} \rho = 0,$$

где $\rho = \rho\,(x, y, z, t)$ - плотность потока жидкости (или газа), $\vec{v} = \vec{v}\,(x, y, z, t)$ - вектор скорости жидкости (или газа) в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t.

Вектор $j = \rho \cdot \vec{v}$ называют *плотностью потока жидкости*. Его направление совпадает с направлением течения жидкости, а абсолютная величина определяет количество вещества, протекающего в единицу времени через единицу площади, расположенную перпендикулярно скорости.

Для несжимаемых жидкостей $\rho = const$. Поэтому уравнение принимает вид

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0,$$

из чего следует соленоидальность поля скорости.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{V}) = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial (\rho V_j)}{\partial x_j} = 0 \qquad (4)$$

Вывод уравнения неразрывности

Уравнение сохранения количества движения

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{F} + Div\vec{P} \qquad (5)$$

Физический смысл уравнения: Ускорение (левая часть уравнения) происходит за счет внешних сил (первый член правой части) и сил напряжения ($\vec{P}$ - тензор напряжения). Последний в свою очередь складывается из сил давления и сил вязкого трения

В проекциях $(i = 1,2,3)$ уравнение имеет вид:

$$\rho \frac{dV_i}{dt} = \frac{\partial (\rho V_i)}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial (\rho V_j V_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho F_i + \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad (6)$$

Уравнение энергии:

$$\rho\frac{d}{dt}\left(U+\frac{\vec{V}^2}{2}\right)=\rho\vec{F}\bullet\vec{V}+div(\vec{P}\vec{V})+div(\vec{q}),$$

Физический смысл уравнения. Изменение энергии движущегося газа (складывается из внутренней энергии U и кинетической энергии $\frac{\vec{V}^2}{2}$) происходит за счет: (7)

1) работы внешних сил
2) работы сил напряжений
3) подвода тепла вследствие теплопроводности

$h=U+\frac{p}{\rho}$ - энтальпия, $H=h+\frac{1}{2}\vec{V}^2=U+\frac{p}{\rho}+\frac{1}{2}\vec{V}^2$ - энтальпия торможения (8)

$\rho\frac{dH}{dt}=\frac{\partial(\rho H)}{\partial t}+\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial(\rho V_j H)}{\partial x_j}=\frac{\partial p}{\partial t}+\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial q_j}{\partial x_j}+\sum_{j=1}^{3}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\sum_{k=1}^{3}\tau_{kj}V_k\right)+\rho\sum_{j=1}^{3}F_jV_j,$	(9)

Тензор напряжений трения:

$$\tau_{ij}=\mu\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j}+\frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right)+\left(-\frac{2}{3}\mu+\mu_2\right)\cdot\delta_{ij}div\vec{V}, \qquad (10)$$

μ - коэффициент динамической вязкости,

μ_2 - вторая или объемная вязкость,

$$\delta_{ij}=\begin{cases}1 & при\ j=i\\ 0 & при\ j\neq i\end{cases}$$ - оператор Кронекера, (11)

$q_j=-\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j}$ - удельный тепловой поток считается по формуле Фурье, (12)

$p=\rho\frac{R_0}{\mu}T=\rho RT$ - Объединенный газовый закон, (13)

$h=h_0+\int C_p dT$, где h_0 - энтальпия образования (14)

6 неизвестных: p,V_1,V_2,V_3,ρ,T.

$$\rho V_i\frac{dV_i}{dt}=-V_i\frac{\partial p}{\partial x_i}+\rho F_iV_i+V_i\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad (15)$$

$$\rho\frac{dh}{dt}+\rho V_i\frac{dV_i}{dt}=\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial q_j}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\tau_{ij}V_i\right)+\rho F_iV_i \qquad (16)$$

$\rho\frac{dh}{dt}=\frac{dp}{dt}+\frac{\partial q_j}{\partial x_j}+\tau_{ij}\frac{\partial V_i}{\partial x_j}$	(17)

3. Основные уравнения для несжимаемой жидкости

$$\rho = const\,,\ \mu = const\,,\ \lambda = const\,,\ c_p = const\,,\ h = c_p T \qquad (18)$$

$$\sum_{j=1}^{3} \frac{\partial V_j}{\partial x_j} = div\vec{V} = 0\,, \qquad (19)$$

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right) \qquad (20)$$

$$\sum_{j=1}^{3} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \mu \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j^2} \qquad (21)$$

$$\rho\left(\frac{\partial V_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho F_i + \mu \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j^2} \qquad (22)$$

4 неизвестных: p, V_1, V_2, V_3.

$$\sum_{i,j=1}^{3} \tau_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = \mu\Phi$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \lambda\nabla^2 T + \mu\Phi + \frac{dp}{dt}\,. \qquad (23)$$

$$\rho c \frac{dT}{dt} = div(\lambda\nabla T)\,, \qquad (24)$$

которое может быть решено независимо от уравнений движения.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0\,, \qquad (25)$$

Уравнения движения:

$$\frac{dV_x}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + F_x + \nu\nabla^2 V_x\,, \qquad (26)$$

$$\frac{dV_y}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + F_y + \nu\nabla^2 V_y\,, \qquad (27)$$

$$\frac{dV_z}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + F_z + \nu\nabla^2 V_z\,. \qquad (28)$$

Уравнение энергии:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \lambda\nabla^2 T + \mu\Phi + \frac{dp}{dt}\,. \qquad (29)$$

где

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_{xy} \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$