ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Лекция №7

План лекции:
1. Теория теплообмена (основные понятия)
2. Температурное поле. Температурный градиент.
3. Дифференциальное уравнение теплообмена
4. Передача тепла через плоскую стенку в стационарных условиях
5. Вопросы для дистанционного освоения лекции

1. ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА (ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ)

Теория теплообмена – это **учение о процессах переноса теплоты в пространстве**. Теплообмен является основой многих явлений, наблюдаемых в природе и технике. Целый ряд важных вопросов конструирования и создания летательных аппаратов и особенно их силовых установок решается на основе теории теплообмена.

В теории теплообмена под процессом переноса теплоты понимается **процесс обмена внутренней энергией между элементами системы в форме теплоты**. В литературе термин **«теплообмен»** часто отождествляется с термином **«теплопередача».**

Любой процесс переноса теплоты в пространстве называется теплообменом. Теплообмен – сложное явление, которое можно разделить на ряд простых. Теплота может передаваться тремя простейшими принципиально отличными друг от друга способами: **теплопроводностью, конвективным переносом и излучением**.

Явление теплопроводности состоит в переносе теплоты структурными частицами вещества – молекулами, атомами, электронами – в процессе их теплового движения. Такой теплообмен может происходить в любых телах с неоднородным распределением температуры, но механизм переноса теплоты зависит от агрегатного состояния тела.

В жидкостях и твердых телах (диэлектриках) перенос теплоты осуществляется путем непосредственной передачи теплового движения молекул и атомов соседним частицам вещества.

В газообразных телах распространение теплоты теплопроводностью происходит вследствие обмена энергией при соударении молекул, имеющих различную скорость теплового движения.

В металлах теплопроводность осуществляется главным образом вследствие движения свободных электронов.

Явление конвективного переноса теплоты наблюдается лишь в жидкостях и газах. Конвективный перенос – это распространение теплоты, обусловленное перемещением макроскопических элементов среды. Объёмы жидкости или газа, перемещаясь из области с большей температурой в область с меньшей температурой, переносят с собой внутреннюю энергию (энтальпию).

Конвективный перенос может осуществляться в результате свободного или вынужденного движения жидкости или газа.

Свободное движение (**свободная конвекция**) возникает тогда, когда частицы жидкости в различных участках системы находятся под воздействием массовых сил различной величины. В гравитационном поле неоднородность плотности, возникающая при неравномерном нагреве частей системы, вызывает свободное движение.

Например, отопительная батарея подогревает соприкасающийся с ней воздух путем теплопроводности. Плотность подогретого воздуха меньше плотности окружающей среды, поэтому подогретый воздух поднимается вверх, а на его место приходит холодный воздух. Теплота вместе с воздухом передается от батареи в другие части помещения.

Вынужденное движение (**вынужденная конвекция**) происходит под действием внешних поверхностных сил. Разность давлений, под действием которой перемещается теплоноситель, создается с помощью насосов, эжекторов и других устройств.

Теплообмен излучением (или радиационный теплообмен) состоит из испускания энергии излучения телом, распространения её в пространстве между телами и поглощения её другими телами. В процессе испускания внутренняя энергия излучающего тела превращается в энергию электромагнитных волн, которые распространяются во всех направлениях. Тела, расположенные на пути распространения энергии излучения, поглощают часть падающих на них электромагнитных волн, и таким образом энергия излучения превращается во внутреннюю энергию поглощающего тела.

2. ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГРАДИЕНТ.

Теплота, передаваемая в единицу времени через произвольную поверхность, оценивается **тепловым потоком** $Q, [Дж / с = Вт]$. Тепловой поток, отнесенный к единице площади поверхности, **называется плотностью теплового потока, или тепловой нагрузкой** $q, [Дж / м^2 с = Вт / м^2]$.

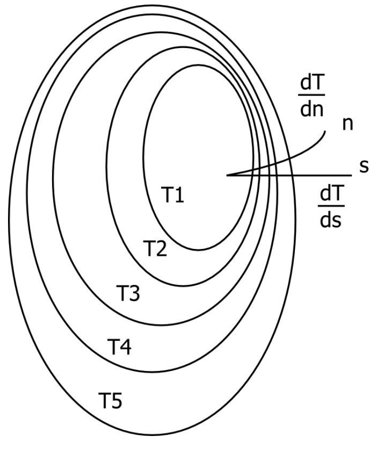
Тепловые потоки возникают в телах и между телами только при наличии разности температур. Температурное состояние тела или системы тел можно охарактеризовать с помощью **температурного поля**, под которым понимается совокупность мгновенных значений температур во всех точках изучаемого пространства.

Температура различных точек тела определяется координатами и временем:

$$T = f(x, y, z, \tau). \quad (1)$$

Температурное поле, которое изменяется во времени, называется **нестационарным**, или **неустановившимся**. Если температура не изменяется во времени, температурное поле называется **стационарным**, или **установившимся**.

Температурное поле тела можно охарактеризовать с помощью серии **изотермических поверхностей**. Под изотермической поверхностью понимается геометрическое место точек с одинаковой температурой. Такие поверхности могут быть замкнуты или выходить на границы тела. Изотермические поверхности, соответствующие разным температурам, не могут пересекаться друг с другом. Если тело рассечь плоскостью, то изотермические поверхности на этой плоскости изобразятся в виде их следов – изотермических линий, которые называются **изотермами**.



Производная температуры по нормали к изотермической поверхности называется **температурным градиентом**. Температурный градиент – векторная величина, направленная по нормали к изотерме в сторону увеличения температуры. Поэтому интенсивность изменения температуры вдоль осей координат определяется проекциями температурного градиента на эти оси:

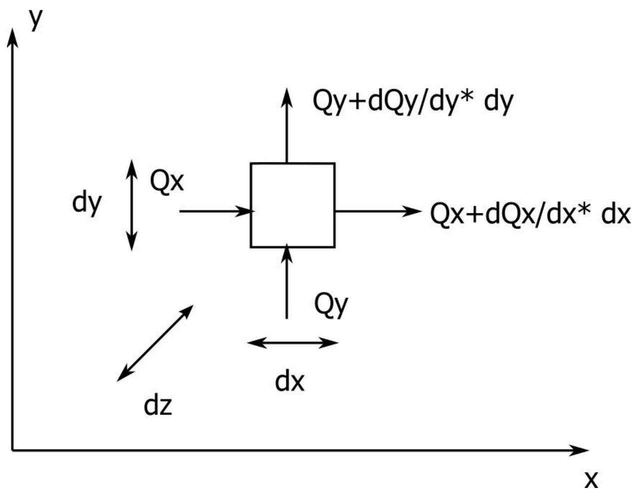
$$\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}. \tag{2}$$

3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНА

Вывод дифференциального уравнения теплообмена основан на законе сохранения энергии. Если пренебречь кинетической и потенциальной энергией системы, то закон сохранения энергии запишется в виде первого начала термодинамики:

$$dQ = dH - Vdp. \tag{3}$$

Для простоты, рассмотрим вывод дифференциального уравнения энергии для двумерного процесса переноса теплоты в жидкости или газе. Для этого необходимо в рассматриваемой области выделить бесконечно малый объём газа и рассмотреть тепловой баланс этого объёма. Изменение всех параметров процесса по координате z равно 0.



Т.к. стенки контрольного объёма проницаемы для теплоносителя, то давление внутри объёма остаётся постоянным. Из уравнения (3) следует:

$$\begin{aligned} dQ &= dH \cancel{-Vdp}, \\ dQ &= dH, \end{aligned} \tag{4}$$

т.е. вся теплота, подведённая к объёму, расходуется на изменение его энтальпии.

Для нестационарного процесса изменение энтальпии можно представить в следующем виде:

$$dH = mc_p \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau, \tag{5}$$

тогда из уравнения (4):

$$dQ = mc_p \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau. \tag{6}$$

Для системы без внутренних источников теплоты, теплота, подведённая к системе за единицу времени, может быть записана следующим образом:

$$dQ = Q_x + Q_y - \left(Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \right) - \left(Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \right)$$

или (7)

$$dQ = -\left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \right).$$

Вводя понятие плотности теплового потока, уравнение (7) можно переписать в виде:

$$Q_x = q_x dydzd\tau; \quad Q_y = q_y dxdzd\tau$$

или (8)

$$dQ = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) dxdydzd\tau.$$

Приравнивая выражения (5), (8) и выражая массу теплоносителя через плотность, получим дифференциальное уравнение теплообмена в виде:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau dxdydz = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) dxdydzd\tau$$

или (9)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right).$$

Величины q_x, q_y – проекции вектора плотности теплового потока на оси координат.

Поскольку тепловой поток может обеспечиваться различными механизмами теплопереноса, рассмотрим составляющие этого теплового потока в отдельности.

Теплопроводность.

Основным законом теплопроводности является предложенная Фурье гипотеза о пропорциональности теплового потока температурному градиенту:

$$\vec{q} = -\lambda \frac{dT}{d\vec{n}}, \tag{10}$$

где: $q, [\text{Вт}/\text{м}^2]$ – вектор теплового потока, связанный с механизмом теплопроводности, $\lambda, [\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}]$ – коэффициент теплопроводности, $\frac{dT}{d\vec{n}}$ - температурный градиент.

В проекциях на оси координат уравнение (10) может быть записано следующим образом:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx}; \quad q_y = -\lambda \frac{dT}{dy}. \tag{11}$$

Величина коэффициента теплопроводности зависит от природы вещества, его структуры, температуры и других факторов. Наибольшим коэффициентом теплопроводности обладают металлы, наименьшим – газы.

Коэффициенты **теплопроводности металлов** и сплавов имеют значения от 7 до 490 $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$. С увеличением температуры теплопроводность большинства металлов уменьшается.

При 0 °С коэффициент теплопроводности меди – 390 $Вт/м \cdot град$, алюминия – 209 $Вт/м \cdot град$, железа - 74 $Вт/м \cdot град$.

Коэффициент теплопроводности сплавов металлов обычно **не изменяется пропорционально концентрации компонентов, входящих в сплав**. Кроме того, он зависит от вида термической и механической обработки металла. Надежным способом оценки коэффициентов теплопроводности металлов и их сплавов является непосредственный эксперимент.

Неметаллические материалы имеют значительно меньшие величины $\lambda = 0,023 - 2,9$ $Вт/м \cdot град$. Среди них наибольший интерес представляют теплоизоляционные, керамические и строительные материалы. Большинство этих материалов имеет пористое строение, поэтому их коэффициент теплопроводности учитывает не только способность вещества проводить теплоту соприкосновением структурных частиц, но и радиационно-конвективный теплообмен в порах.

Материалы, имеющие $\lambda < 0,25$ $Вт/м \cdot град$ при $T = -50...100\,^0C$, называют **теплоизоляторами**. Некоторые теплоизолирующие материалы используются в их естественном состоянии, другие получаются искусственно.

Некоторые неметаллические материалы обладают **анизотропией**. Так, дуб проводит теплоту вдоль волокон примерно в два раза лучше, чем поперек волокон. Теплопроводность ориентированного пирографита вдоль пластины в сто раз больше, чем в перпендикулярном направлении.

Жидкости (кроме расплавленных металлов) имеют небольшую величину $\lambda = 0,093...0,7$ $Вт/м \cdot град$. У большинства жидкостей (кроме воды и глицерина) коэффициент теплопроводности уменьшается с увеличением температуры.

Газы и пары плохо проводят теплоту теплопроводностью $\lambda = 0,006...0,58$ $Вт/м \cdot град$. Коэффициенты теплопроводности газов увеличиваются с ростом температуры.

В практических расчетах коэффициент теплопроводности обычно считают одинаковым для всего тела и определяют его по среднеарифметической из крайних значений температур тела. При выборе коэффициента теплопроводности следует пользоваться справочной литературой.

Конвективный перенос теплоты.

Конвективный перенос теплоты связан с перемещением макроскопических объёмов теплоносителя. Интенсивность конвективного теплопереноса определяется скоростью движения среды, которая в свою очередь зависит от многих факторов, таких как перепад давлений, плотность среды, режим течения (ламинарный или турбулентный) и т.д.

Плотность теплового потока, возникающего за счёт конвекции, определяется соотношением:

$$\vec{q} = \rho c_p \vec{w} T, \tag{12}$$

где $\vec{w}$ - вектор скорости потока теплоносителя.
В проекциях на оси координат:

$$q_x = \rho c_p w_x T; \quad q_y = \rho c_p w_y T. \tag{13}$$

Теплоперенос излучением.

Имеет существенные отличия в понятиях и определениях теплового потока и будет рассмотрен отдельно.

Подставляя соотношения (13) и (11) в общее дифференциальное уравнение теплообмена, получим:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{dT}{dx} - \rho c_p w_x T\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{dT}{dy} - \rho c_p w_y T\right). \tag{14}$$

Считая теплопроводность и теплоёмкость теплоносителя независящими от температуры, получим:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y T)}{\partial y} = \frac{\lambda}{c_p}\left(\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2}\right)$$

или (15)

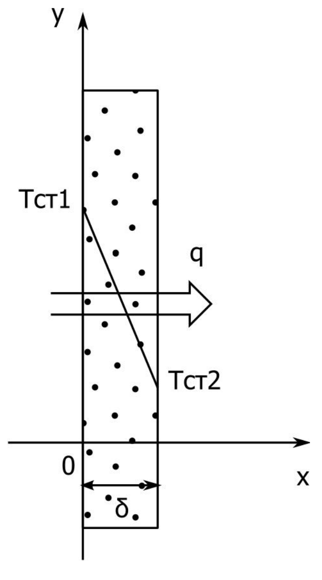
$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + T\underbrace{\left(\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y}\right)}_{\text{Уравнение неразрывности}} = \frac{\lambda}{\rho c_p}\left(\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2}\right).$$

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)} \tag{16}$$

Полученное нами уравнение теплообмена (16) описывает нестационарное изменение температуры теплоносителя в каждой точке плоскости x-y при наличии процессов конвективного переноса теплоты и переноса теплоты теплопроводностью. К этому уравнению мы будем обращаться при анализе всех теплообменных процессов.

4. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СТЕНКУ В СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

Передача тепла через плоскую твёрдую однородную стенку в стационарных условиях является частным случаем общей задачи теплообмена, позволяющим существенно упростить дифференциальное уравнение теплообмена и получить его точное решение. Вместе с тем такие процессы очень часто встречаются в технике.



Упрощение, связанное со стационарностью процесса, позволяет исключить первый член уравнения (16). Поскольку стенка является твёрдой, конвективный перенос тепла отсутствует – это позволяет исключить второй и третий члены уравнения (16). Полагая, что толщина стенки намного меньше её высоты, процессы теплообмена можно рассматривать только в одном направлении – поперёк стенки. Таким образом, уравнение, описывающее теплопередачу через стенку, можно записать следующим образом:

$$\boxed{\frac{d^2T}{dx^2} = 0.} \qquad (17)$$

Проинтегрировав уравнение (17), найдём:

$$T = C_1 x + C_2. \qquad (18)$$

Константы интегрирования определим из граничных условий:

$$\begin{aligned} T\big|_{x=0} &= T_{ст1}, \\ T\big|_{x=\delta} &= T_{ст2}. \end{aligned} \qquad (19)$$

$$T = \frac{T_{ст2} - T_{ст1}}{\delta} x + T_{ст1}. \qquad (20)$$

Для плотности теплового потока в соответствии с законом Фурье можно записать следующее соотношение:

$$\boxed{q = \frac{\lambda}{\delta}\left(T_{ст1} - T_{ст2}\right).} \qquad (21)$$

Соотношение λ/δ называется **тепловой проводимостью** плоской стенки, а обратная величина **внутренним термическим сопротивлением**.

Рассмотрим теперь теплопроводность плоской многослойной стенки, состоящей из n слоев. На границе раздела двух слоев возникает контактное термическое сопротивление, обусловленное неплотным соприкосновением поверхностей. Термическое сопротивление контакта в отдельных случаях может быть пренебрежимо малым, но иногда общее тепловое сопротивление многослойной стенки благодаря сопротивлению в местах контакта увеличивается в несколько раз.

Оценим температурное поле и тепловой поток теплопроводностью через многослойную стенку с учетом контактных сопротивлений. Каждый слой имеет заданную толщину δ_i и коэффициент теплопроводности λ_i

$$\begin{aligned} q &= \frac{\lambda_1}{\delta_1}\left(T_{ст1} - T_{ст12}\right), \\ q &= \frac{1}{R_{К1-2}}\left(T_{ст12} - T_{ст21}\right), \\ q &= \frac{\lambda_2}{\delta_2}\left(T_{ст21} - T_{ст22}\right), \\ q &= \frac{1}{R_{К2-3}}\left(T_{ст22} - T_{ст31}\right), \\ &\ldots \end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&q = \frac{\lambda_i}{\delta_i}\left(T_{\text{стi}1} - T_{\text{стi}2}\right),\\
&q = \frac{1}{R_{\text{K}i-(i+1)}}\left(T_{\text{стi}2} - T_{\text{ст}(i+1)1}\right),\\
&\ldots\\
&q = \frac{1}{R_{\text{K}(n-1)-n}}\left(T_{\text{ст}(n-1)2} - T_{\text{стn}1}\right),\\
&q = \frac{\lambda_n}{\delta_n}\left(T_{\text{стn}1} - T_{\text{ст}2}\right).
\end{aligned}
\tag{22}
$$

Выражая разности температур по толщине каждого слоя стенки (с учётом контактного сопротивления) и проводя суммирование по всем слоям, получим:

$$
q\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{n-1} R_{\text{K}i-(i+1)}\right) = \left(T_{\text{ст}1} - T_{\text{ст}2}\right). \tag{23}
$$

В итоге плотность теплового потока через многослойную стенку, с учётом контактных сопротивлений, можно рассчитать по формуле:

$$
\boxed{q = \frac{T_{\text{ст}1} - T_{\text{ст}2}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{n-1} R_{\text{K}i-(i+1)}}.} \tag{24}
$$

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕКЦИИ

1. Назовите три простейших механизма передачи теплоты.
Ответ:
2. Постройте ряд по мере снижения теплопроводности (жидкости, газы, металлы, вакуум, твёрдые диэлектрики)
Ответ:
3. Запишите дифференциальное уравнение теплообмена с учётом конвективного переноса теплоты. Уравнение должно быть записано через температуру.
Ответ:
4. Запишите общее решение для уравнения теплопроводности однослойной плоской твёрдой стенки в стационарных условиях.
Ответ:
5. Запишите формулу для определения потока тепла через плоскую многослойную стенку в стационарных условиях с учётом контактных термических сопротивлений между слоями.
Ответ:
Фамилия Имя Отчество:
Группа:
Подпись:
Дата: