ТЕПЛОФИЗИКА

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

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 расчленить 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. Объемы жидкости или газа, перемещаясь из области с большей температурой в область с меньшей температурой, переносят с собой теплоту.

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

– 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 ее в пространстве между телами и поглощения ее 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.

Количество теплоты, передаваемой в единицу времени через произвольную поверхность, оценивается **тепловым потоком**. Тепловой поток, отнесенный к единице площади поверхности, **называется плотностью теплового потока, или тепловой нагрузкой** $q, [\text{Дж}/\text{м}^2\text{с} = \text{Вт}/\text{м}^2]$.

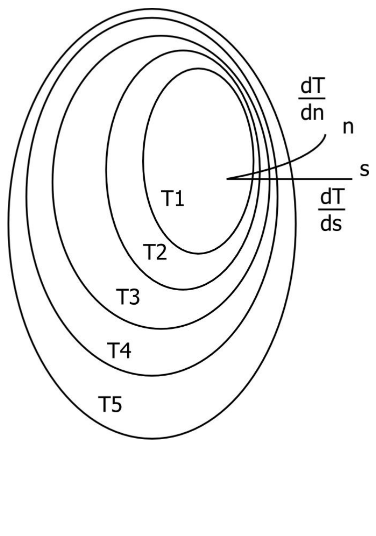
Тепловые потоки возникают в телах и между телами только при наличии разности температур. Температурное состояние тела или системы тел можно охарактеризовать с помощью **температурного поля**, под которым понимается совокупность мгновенных значений температур во всех точках изучаемого пространства.

Температура различных точек тела определяется координатами и временем:

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

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 определится проекциями температурного градиента на эти оси:

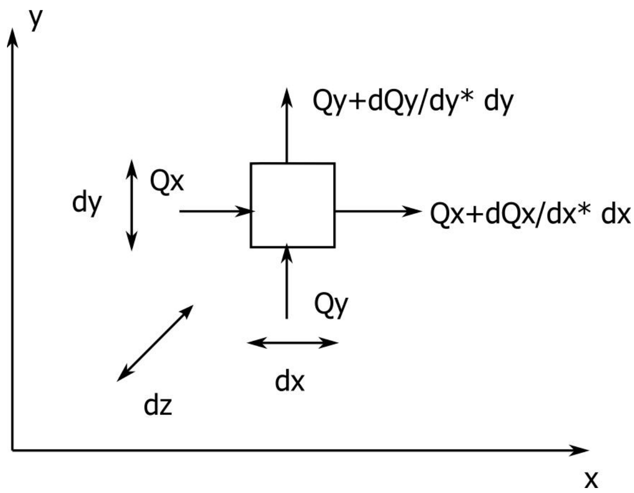
$$\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \tag{2}$$

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. С учётом нестационарности процесса и связи энтальпии и температуры теплоносителя, уравнение (3) можно записать в виде:

$$dQ = mc_p \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau \tag{4}$$

Т.е. теплота подведённая к объёму за счёт всех механизмов теплопереноса идёт на увеличение энтальпии (температуры) теплоносителя. В отсутствии 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 (5)

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

Вводя понятие плотности теплового потока уравнение (5) можно переписать в виде:

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

или (6)

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

Приравнивая выражения (4), (6) 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 (7)

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

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:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dn}, \tag{8}$$

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

В проекциях на оси координат уравнение (8) может быть записано следующим образом:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx}; \quad q_y = -\lambda \frac{dT}{dy} \tag{9}$$

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 °C коэффициент теплопроводности меди – 390 $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$, алюминия – 209 $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$, железа - 74 $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$.

Коэффициент теплопроводности смеси материалов обычно **не изменяется пропорционально количеству входящих в смесь компонентов**. 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·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·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·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·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:

$$q = \rho c_p w T\,, \qquad (10)$$

где w - вектор скорости потока теплоносителя.
В проекциях на оси координат:

$$q_x = \rho c_p w_x T; \quad q_y = \rho c_p w_y T \qquad (11)$$

Теплоперенос излучением.

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

Подставляя соотношения (11) и (9) в общее дифференциальное уравнение теплообмена получим:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{dT}{dx} - \rho c_p w_x T\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{dT}{dy} - \rho c_p w_y T\right) \qquad (12)$$

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 (13)

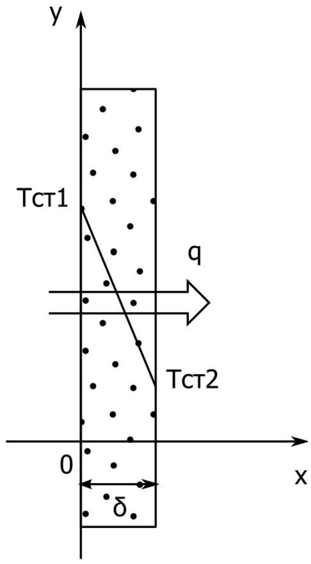
$$\frac{\partial T}{\partial \tau}+w_x\frac{\partial T}{\partial x}+w_y\frac{\partial T}{\partial y}+T\underbrace{\left(\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y}\right)}_{\text{Уравнение неразрывности}}=\frac{\lambda}{\rho c_p}\left(\frac{\partial T^2}{\partial x^2}+\frac{\partial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

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial \tau}+w_x\frac{\partial T}{\partial x}+w_y\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{\lambda}{\rho c_p}\left(\frac{\partial T^2}{\partial x^2}+\frac{\partial T^2}{\partial y^2}\right)} \qquad (14)$$

Полученное нами уравнение теплообмена (14) 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, позволяющий 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 (14). Поскольку стенка является твёрдой конвективный перенос тепла отсутствует – это позволяет исключить второй и третий члены уравнения (14). 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:

$$\boxed{\frac{d^2T}{dx^2}=0} \qquad (15)$$

Проинтегрировав уравнение (15) найдём:

$$T=C_1x+C_2 \qquad (16)$$

Константы интегрирования определим из граничных условий:

$$\begin{aligned} T\big|_{x=0} &= T_{ст1} \\ T\big|_{x=\delta} &= T_{ст2} \end{aligned} \tag{17}$$

$$T = \frac{T_{ст2} - T_{ст1}}{\delta} x + T_{ст1} \tag{18}$$

Плотность теплового потока в соответствии с законом Фурье можно записать следующим образом:

$$\boxed{q = \frac{\lambda}{\delta}\left(T_{ст1} - T_{ст2}\right)} \tag{19}$$

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

$$\begin{aligned}
&q = \frac{\lambda_1}{\delta_1}\left(T_{ст1} - T_{ст12}\right) \\
&q = \frac{1}{R_{K1-2}}\left(T_{ст12} - T_{ст21}\right) \\
&q = \frac{\lambda_2}{\delta_2}\left(T_{ст21} - T_{ст22}\right) \\
&q = \frac{1}{R_{K2-3}}\left(T_{ст22} - T_{ст31}\right) \\
&\ldots \\
&q = \frac{\lambda_i}{\delta_i}\left(T_{стi1} - T_{стi2}\right) \\
&q = \frac{1}{R_{Ki-(i+1)}}\left(T_{стi2} - T_{ст(i+1)1}\right) \\
&\ldots \\
&q = \frac{1}{R_{K(n-1)-n}}\left(T_{ст(n-1)2} - T_{стn1}\right) \\
&q = \frac{\lambda_n}{\delta_n}\left(T_{стn1} - T_{ст2}\right)
\end{aligned} \tag{20}$$

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

$$q\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}+\sum_{i=1}^{n-1}R_{Ki-(i+1)}\right)=\left(T_{ст1}-T_{ст2}\right) \tag{21}$$

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

$$\boxed{q=\frac{T_{ст1}-T_{ст2}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}+\sum_{i=1}^{n-1}R_{Ki-(i+1)}}} \tag{22}$$