

## Тема: ОСНОВЫ ТЕПЛООБМЕНА

1. Способы распространения теплоты в пространстве. Температурное поле.
2. Основной закон теплопроводности - Закон Фурье. Распространение теплоты в однослойной плоской стенке.
3. Конвективный теплообмен. Критерии теплообмена
4. Процесс теплопередачи

### 1. СПОСОБЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ В ПРОСТРАНСТВЕ

Теплообменом называется самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным распределением температуры.

Теплообмен в общем случае может осуществляться тремя различными способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением (радиацией).

**Теплопроводность** (кондуктивный теплообмен) — это процесс распространения теплоты за счет непосредственного соприкосновения тел (частиц тела) друг с другом. Она обусловлена движением микрочастиц (молекул) тела и возможна в твердых, жидких и газообразных средах.

**Конвекция** — это перенос теплоты движущимися макрообъемами жидкости или газа. Чем больше скорость движения среды, тем интенсивнее конвекция. Конвективный перенос теплоты всегда сопровождается теплопроводностью.

**Тепловое излучение** (радиация) — это распространение теплоты в пространстве посредством электромагнитных волн. Оно может происходить в вакууме, а также в средах, полностью или частично пропускающих излучение. При теплообмене излучением часть внутренней энергии излучателя превращается в энергию электромагнитных волн, которые распространяются в пространстве, а затем поглощается другим телом, превращаясь в тепловую энергию. Тепловое излучение в чистом виде реализуется только в вакууме, а в газах, жидких и твердых средах оно сопровождается теплопроводностью и конвекцией.

Совокупность трех перечисленных выше способов теплообмена называется *сложным теплообменом*.

Перенос теплоты, как всякое физическое явление, происходит в пространстве и во времени, поэтому температура в той или иной среде в общем случае зависит от координат рассматриваемой точки  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и времени  $\tau$ :

$$t = f(x, y, z, \tau)$$

Температурным полем называется совокупность мгновенных значений температуры в пространстве.

Если температурное поле во времени не изменяется, то оно называется *стационарным*, а если изменяется, то *нестационарным*.

Тепловой режим, соответствующий стационарному температурному полю, называют *установившимся*, а тепловой режим, соответствующий нестационарному температурному полю, — *неустановившимся*.

Если температуру рассматривать только вдоль одной координаты, то температурное поле называют *одномерным*, если вдоль двух координат — *двумерным*, вдоль трех — *трехмерным*.

Различают также *однородные* и *неоднородные* температурные поля. В первом случае температура во всех точках температурного поля в любой момент времени одна и та же, во втором — нет.

В неоднородном температурном поле можно выделить точки с одинаковым значением температуры. Они образуют так называемую изотермическую поверхность.

## 2. ОСНОВНОЙ ЗАКОН ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ - ЗАКОН ФУРЬЕ. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛОТЫ В ОДНОСЛОЙНОЙ ПЛОСКОЙ СТЕНКЕ

В неоднородном температурном поле возникает перенос теплоты — по одному или нескольким описанным выше способам (теплопроводность, конвекция, излучение), который характеризуется тепловым потоком.

Тепловым потоком  $\Phi$  называют количество теплоты, проходящее в единицу времени через произвольную поверхность. Измеряется в Ваттах (Вт)

Интенсивность переноса теплоты характеризуется поверхностной плотностью теплового потока, под которой понимают тепловой поток, равномерно распределенный на единице площади поверхности:

$$q = \Phi/A, \text{ Вт/м}^2 \quad (1)$$

где  $A$  — площадь поверхности в  $\text{м}^2$ , через которую проходит тепловой поток  $\Phi$ .

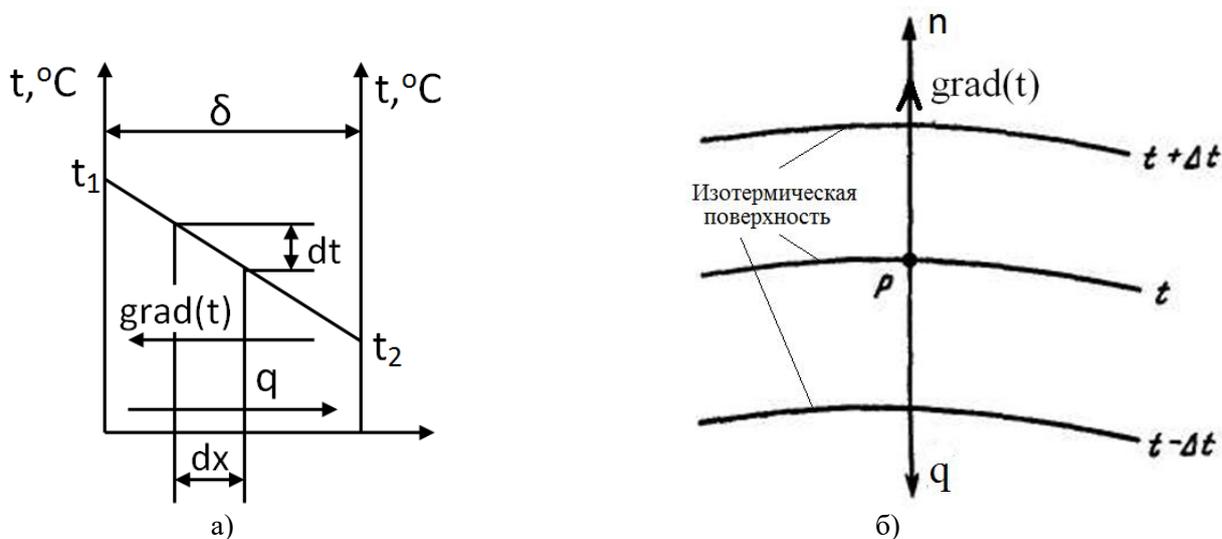


Рис. 1. К формулировке основного закона теплопроводности Фурье.

Основной закон теплопроводности (закон Фурье) гласит: плотность теплового потока прямо пропорциональна градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(t) \quad (2)$$

где  $\lambda$  — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,

$\text{grad}(t)$  — температурный градиент, показывающий на сколько интенсивно изменяется температура по толщине стенки  $\delta$  (рис. 1).

Знак минус отражает разнонаправленность векторов  $\text{grad}(t)$  и  $q$ : вектор  $\text{grad}(t)$  по определению направлен в сторону возрастания температуры, а вектор  $q$  — в сторону ее убывания.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  является физическим параметром вещества, характеризующим его способность проводить теплоту, который определяет количество теплоты, проходящее в единицу времени через  $1 \text{ м}^2$  изотермической поверхности при  $\text{grad}(t)=1$ .

Его значения обычно определяются опытным путем и приводятся в теплофизических справочниках.

Рассмотрим процесс теплопроводности в плоской стенке толщиной  $\delta$ .

Допустим, что тепловой поток  $\Phi$  постоянен и распространяется только в направлении координаты  $x$ , температуры поверхностей стенки  $t_{C1}$  и  $t_{C2}$  постоянны, а теплопроводность  $\lambda$  не зависит от температуры.

В соответствии с законом теплопроводности можно записать

$$\Phi = q \cdot A = -\lambda \frac{dt}{dx} A = const \quad (3)$$

где  $A$  — площадь поверхности стенки,  $m^2$ .

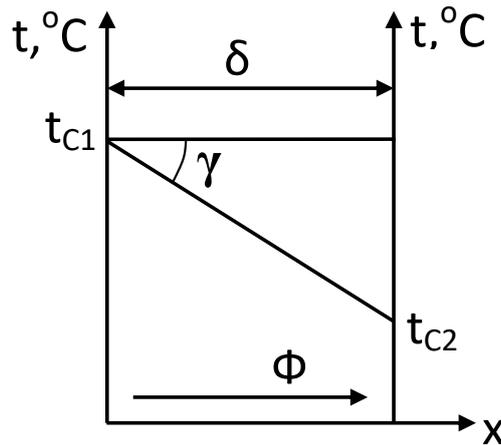


Рис.2. Распределение температуры в плоской стенке при  $\Phi=const$ .

Проинтегрируем переменные в уравнении (3) в пределах от  $t_{C1}$  до  $t_{C2}$  и от 0 до  $\delta$ :

$$\int_{t_{C1}}^{t_{C2}} dt = -\int_0^{\delta} \frac{\Phi}{\lambda \cdot A} dx \quad (4)$$

После интегрирования получим уравнение для теплового потока  $\Phi$ :

$$\Phi = q \cdot A = \frac{\lambda}{\delta} (t_{C1} - t_{C2}) \cdot A, \text{ Вт} \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что в стационарном режиме тепловой поток через плоскую стенку прямо пропорционален разности температур поверхностей стенки и обратно пропорционален толщине стенки.

Из рис. 2 видно, что в плоской стенке наблюдается линейное распределение температуры (линия  $t_{C1}-t_{C2}$ ).

Линия температур по толщине стенки отклоняется на угол  $\gamma$  в зависимости от значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  материала стенки:

$$tg(\gamma) = \frac{\Phi}{\lambda \cdot A} \quad (6)$$

Отношение разности температур поверхностей стенки к плотности теплового потока в какой-либо точке поверхности, называется внутренним термическим сопротивлением стенки:

$$R_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{t_{C1} - t_{C2}}{q}, \text{ (м·К)/Вт.} \quad (7)$$

Общее количество теплоты, переданное через стенку за время  $\tau$  равно:

$$Q = q \cdot A \cdot \tau, \text{ Дж} \quad (8)$$

### 3. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН. КРИТЕРИИ ТЕПЛООБМЕНА

Конвекция - это передача теплоты посредством перемещения в пространстве неравномерно нагретых макрообъемов (потоков) газа, пара, жидкости. В теплотехнике их называют одним наименованием – жидкость. Движущаяся среда, используемая для переноса теплоты, называется теплоносителем.

Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью.

Конвективным называется теплообмен, обусловленный совместным действием конвекции и теплопроводности.

Теплоотдачей называется конвективный теплообмен, происходящий:

- между теплоносителем и омываемой поверхностью (твердым телом, стенкой);
- между теплоносителем и жидкостью, газом.

Поверхность раздела, через которую происходит перенос теплоты, носит название поверхности теплообмена или теплоотдающей поверхности.

Интенсивность теплоотдачи в большинстве случаев зависит от скорости движения теплоносителя относительно поверхности теплообмена.

Движение теплоносителя может быть свободным (естественным) или вынужденным.

Свободная конвекция на практике часто происходит за счет разности плотностей нагретых и холодных объемов жидкости, находящихся в поле гравитационных сил (гравитационная свободная конвекция).

Вынужденная конвекция осуществляется нагнетателями (насосами, компрессорами, вентиляторами)

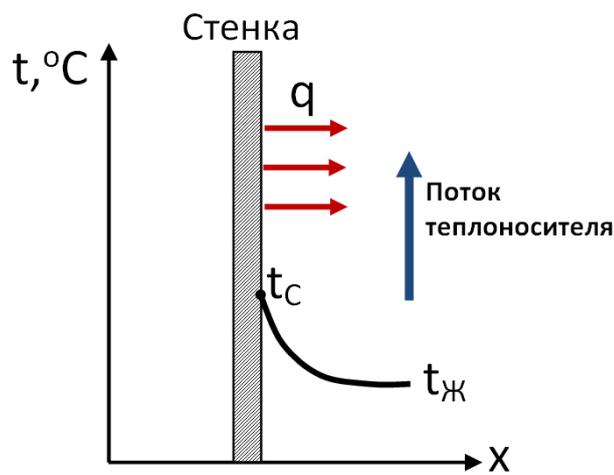


Рис. 3. Процесс теплоотдачи

Закон теплоотдачи Ньютона-Рихмана широко используется для количественного описания теплоотдачи. Он гласит:

плотность теплового потока  $q$ , переносимого путем конвекции от поверхности теплообмена к движущейся среде (и наоборот), пропорциональна разности температур поверхности теплообмена (стенки)  $t_c$  и движущегося теплоносителя  $t_ж$  (рис. 1):

$$q = \alpha \cdot (t_c - t_ж), \text{ Вт/м}^2 \quad (9)$$

где  $\alpha$  - коэффициент пропорциональности, называется коэффициентом теплообмена или коэффициентом теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$t_c - t_ж = \Delta t$  называется температурным напором,  $^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент  $\alpha$  характеризует интенсивность теплоотдачи между поверхностью теплообмена и теплоносителем. Он показывает какое количество теплоты передается в течение 1 секунды от потока теплоносителя к  $1 \text{ м}^2$  стенки или поверхности при разности температур в 1 К.

Коэффициент теплообмена — важный теплофизический параметр, необходимый для расчета теплообменного аппарата. В общем случае он зависит от физических свойств жидкости, конфигурации, от размеров поверхности теплообмена и от условий обтекания ее жидкостью

Коэффициент теплообмена — это расчетная величина, находящаяся обычно из уравнений, полученных экспериментально.

## Критерии теплообмена

При изучении конвективного теплообмена для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  применяются критерии теплообмена.

В теплотехнике чаще всего пользуются следующими критериями теплообмена: критерий Рейнольдса ( $Re$ ); критерий Прандтля ( $Pr$ ); критерий Грасгофа ( $Gr$ ); критерий Нуссельта ( $Nu$ );

1) Критерий Рейнольдса  $Re$  представляет собой отношение сил инерции к силам вязкости и определяет характер (режим) течения жидкости:

$$Re_{ж} = \frac{W \cdot l}{\nu_{ж}} \quad (10)$$

где  $W$  – средняя скорость течения жидкости, м/с;

$\nu_{ж}$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости при данной температуре движущейся среды  $t_{ж}$ , м<sup>2</sup>/с;

При  $Re < 2300$  движение жидкости является ламинарным;

При  $Re > 10^4$  – режим течения турбулентный;

Если имеет место  $2300 < Re < 10^4$ , то режим будет переходный.

2) Критерий Прандтля  $Pr$  определяет физические свойства жидкости:

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda_{ж}} = \frac{\nu}{a} \quad (11)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Н·с/м<sup>2</sup>;

$a$  – коэффициент температуропроводности жидкости при данной температуре, м<sup>2</sup>/с;

$C_p$  – изобарная массовая теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К);

$\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности, определяемый при температуре жидкости  $t_{ж}$ , Вт/(м·К).

3) Критерий Грасгофа  $Gr$  характеризует соотношение подъемных сил, возникающих в жидкости при нагреве, и сил вязкости:

$$Gr_{ж} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta_{ж} \cdot \Delta t}{\nu_{ж}} \quad (12)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>

$\Delta t$  – разность температур поверхности (стенки) и жидкости, между которыми происходит теплообмен, °С или К.

$\beta_{ж}$  – коэффициент объемного расширения жидкости, 1/К.

Для жидких теплоносителей коэффициент  $\beta_{ж}$  выбирают из справочных таблиц.

Для газообразных теплоносителей коэффициент  $\beta_{ж}$  рассчитывают по формуле:

$$\beta_{ж} = \frac{1}{T_{ж}}, \quad 1/K \quad (13)$$

где  $T_{ж} = t_{ж} + 273$  – абсолютная температура К.

4) Критерий Нуссельта  $Nu$  характеризует интенсивность теплообмена в пограничном слое между жидкостью и поверхностью омываемого тела.

Для процессов конвективного теплообмена критериальное уравнение представляют в виде:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{ж}} = f(Re, Gr, Pr) \quad (14)$$

где  $l$  – характерный размер, м;

Для различных режимов течения жидкости критерий Нуссельта определяется по следующим формулам:

а) При ламинарном вязкостном режиме ( $Pr_{ж} \cdot Gr_{ж} < 8 \cdot 10^5$ ):

$$Nu = 0,15 \cdot Re_{ж}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}} \right)^{0,25} \quad (15)$$

где  $Pr_{ж}$  – критерий Прандтля, определенный для температуры жидкости;  
 $Pr_{с}$  – критерий Прандтля, определенный для температуры стенки.

б) При ламинарном вязкостно-гравитационном режиме ( $Pr_{ж} \cdot Gr_{ж} \geq 8 \cdot 10^5$ ):

$$Nu = 0,15 \cdot Re_{ж}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot Gr_{ж}^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}} \right)^{0,25} \quad (16)$$

в) При переходном режиме:

$$Nu = 0,008 \cdot Re_{ж}^{0,9} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \quad (17)$$

г) При турбулентном режиме:

$$Nu = 0,021 \cdot Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \quad (18)$$

где  $\varepsilon_l$  – поправочный коэффициент, учитывающийся при отношении  $l/d < 50$ . Если  $l/d \geq 50$ , то  $\varepsilon_l = 1$ .

Определив критерий Нуссельта из уравнения (14) находят коэффициент теплообмена  $\alpha$ .

#### 4. ПРОЦЕСС ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Теплопередача - это теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их твёрдую стенку (рис.4) или через поверхность раздела между ними.

Теплопередача включает в себя:

- теплоотдачу от более горячей жидкости к стенке;
- теплопроводность в стенке;
- теплоотдачу от стенки к более холодной жидкости.

Рассмотрим процесс теплопередачи через плоскую стенку при стационарном режиме (рис. 4). У нас имеется плоская однослойная стенка с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  и толщиной  $\delta$ .

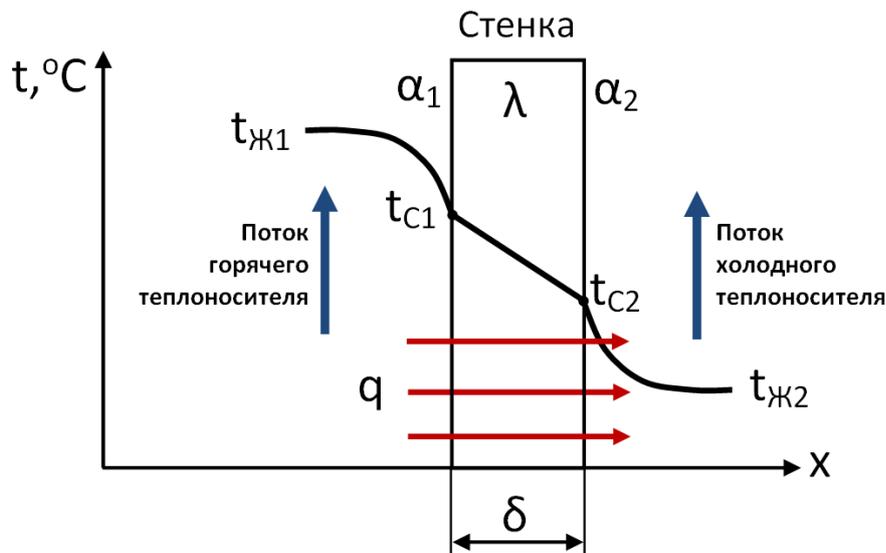


Рис. 4 Теплопередача через плоскую однослойную стенку

По одну сторону стенки находится горячая среда с температурой  $t_{ж1}$ , по другую – холодная среда с температурой  $t_{ж2}$ . Температуры поверхностей обозначим  $t_{с1}$  и  $t_{с2}$ .

Значение коэффициента теплоотдачи от горячей жидкости к поверхности стенки будет  $\alpha_1$ , от поверхности стенки к холодной жидкости -  $\alpha_2$ .

Плотность теплового потока  $q$  величина постоянная во времени и не зависит от координаты  $x$ .

В данном случае мы можем записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} q = \alpha_1(t_{ж1} - t_{c1}) - \text{уравнение теплоотдачи} \\ q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{c1} - t_{c2}) - \text{уравнение теплопроводности} \\ q = \alpha_2(t_{c2} - t_{ж2}) - \text{уравнение теплоотдачи} \end{cases} \quad (19)$$

Решая эту систему, получим уравнение плотности теплового потока:

$$q = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}) = K \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}), \text{ Вт/м}^2 \quad (20)$$

где  $K$  – называется коэффициентом теплопередачи,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К} \quad (21)$$

Коэффициент теплопередачи  $K$  характеризует интенсивность передачи теплоты. Он численно равен количеству теплоты, которое передаётся через  $1 \text{ м}^2$  поверхности стенки в  $1$  секунду при разности температур между жидкостями в  $1 \text{ К}$ .

На практике коэффициент теплопередачи определяется опытным путём.

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется полным термическим сопротивлением  $R$  процесса:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт} \quad (22)$$

Тепловой поток при теплопередаче определяется:

$$\Phi = K \cdot A \cdot \Delta t, \text{ Вт} \quad (23)$$

где  $\Delta t = t_{ж1} - t_{ж2}$  - температурный напор,  $^{\circ}\text{C}$ .