

---

# Термодинамика и теплопередача

лектор

Зиякаев Григорий Ракитович

# Лекция 14

## Содержание

- Способы переноса теплоты.
- Температурное поле.
- Градиент температуры.
- Тепловой поток.
- Теплопроводность.
- Теплоотдача.
- Теплопередача.

# Способы переноса теплоты

Теплота передается от тел с более высокой температурой к телам с более низкой температурой. При отсутствии разности температур теплообмен прекращается и наступает тепловое равновесие.

Различают три способа переноса теплоты: **теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.**

**Теплопроводность** – это передача теплоты при контакте между телами и частицами тела. Теплопроводностью тепло передается по твердым телам, в жидкостях и газах.

# Способы переноса теплоты

**Конвекция** – это перемещение массы жидкости или газа из среды с одной температурой в среду с другой температурой.

Если движение вызвано разностью плотностей нагретых и холодных частиц – это **естественная конвекция**, если разностью давлений – **вынужденная конвекция**.

**Тепловое излучение** – это процесс распространения теплоты от излучающего тела с помощью электромагнитных волн.

Он обусловлен температурой и оптическими свойствами излучающего тела (твердых тел, трех- и многоатомных газов).

# Способы переноса теплоты

В твердых телах тепло передается только теплопроводностью.

Только излучением тепло передается между телами, расположенными в вакууме.

Конвекцию невозможно отделить от теплопроводности.

Совместный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью называется **конвективным теплообменом**.

Конвективный теплообмен между поверхностью и омывающей ее средой называется **теплоотдачей**.

Передача теплоты одновременно двумя или тремя способами называется **сложным теплообменом**.

Передача теплоты от одной среды к другой через разделяющую их стенку называется **теплопередачей**.

# Температурное поле

**Температурное поле** тела или системы тел – это совокупность мгновенных значений температур во всех точках рассматриваемого пространства. В общем случае уравнение температурного поля имеет вид

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

где  $t$  – температура;  $x, y, z$  – координаты;  $\tau$  – время.

Такое температурное поле называется **нестационарным**. Если температура с течением времени не изменяется, то температурное поле называется **стационарным**. Тогда

$$t = f(x, y, z, \tau); \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0.$$

# Температурное поле

Температура может быть функцией одной, двух и трех координат; соответственно температурное поле будет одно-, двух- и трехмерным.

Наиболее простой вид имеет уравнение одномерного стационарного температурного поля:  $t = f(x)$ .

Поверхность, объединяющая точки тела с одинаковой температурой, называется **изотермической**.

Изотермические поверхности не пересекаются, они либо замыкаются на себя, либо заканчиваются на границе тела.

Пересечение изотермических поверхностей с плоскостью дает на ней семейство изотерм.

# Градиент температуры

Направление, по которому расстояние между изотермическими поверхностями минимальное, называется **нормалью** ( $n$ ) к изотермической поверхности.

Производная температура по нормали к изотермической поверхности называется **температурным градиентом**;

$$\frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t.$$

Температурный градиент – вектор, направленный по нормали к изотерме в сторону увеличения температуры.

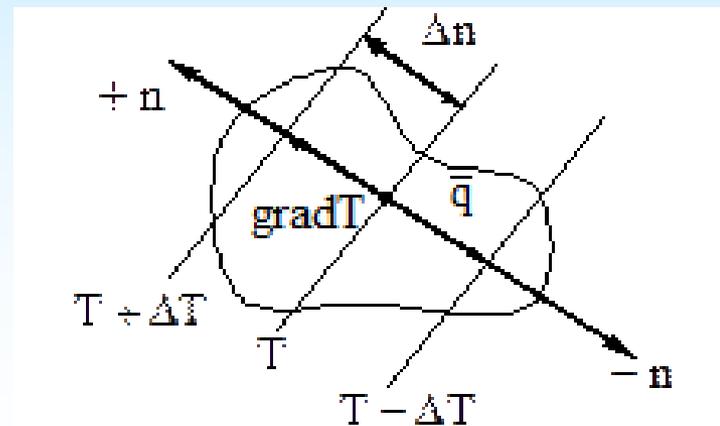


Рис. 1.1. Температурный градиент

# Тепловой поток

Общее количество теплоты, переданное в процессе теплообмена через изотермическую поверхность площадью  $F$  в течение времени  $\tau$ , обозначим  $Q_\tau$ , Дж.

Количество теплоты, переданное через изотермическую поверхность площадью  $F$  в единицу времени, называется тепловым потоком  $Q$ , Вт (Дж/с).

Тепловой поток, переданный через единицу поверхности, называется плотностью теплового потока

$$q = \frac{Q}{F}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Вектор плотности теплового потока направлен по нормали к изотермической поверхности в сторону уменьшения температуры.

# Теплопроводность

Теплота, передаваемая теплопроводностью, описывается **законом Фурье**, согласно которому вектор плотности теплового потока прямо пропорционален температурному градиенту

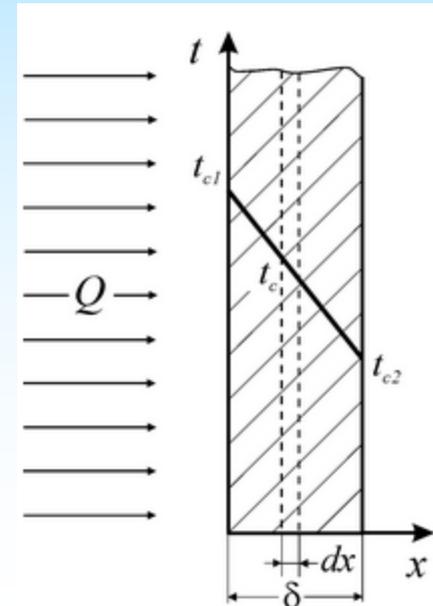
$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Тепловой поток, количество теплоты и плотность теплового потока связаны соотношениями:

$$Q = q F, \text{Вт};$$

$$Q_{\tau} = q F \Delta \tau, \text{Дж},$$

где  $F$ ,  $\text{м}^2$ , – площадь изотермической поверхности;  
 $\Delta \tau$ , с, – промежуток времени.



# Теплопроводность

Коэффициент пропорциональности в уравнении  $\lambda$ , Вт/(м·К) называется **коэффициентом теплопроводности** и характеризует способность тел передавать тепло.

Коэффициент теплопроводности зависит от структуры, плотности, влажности, давления и температуры тел.

Значения коэффициентов теплопроводности определяются экспериментально и для технически важных тел (металлов, строительных и изоляционных материалов, жидкостей, газов) содержатся в справочной литературе.

Наибольшие коэффициенты теплопроводности имеют металлы, наименьшие – теплоизоляционные материалы и газы.

# Теплопроводность

Так как тела могут иметь различную температуру, например, от  $t_1$  до  $t_2$ , то расчеты ведутся при среднем значении коэффициента теплопроводности ( $\lambda_{\text{ср}}$ ) для данного интервала температур.

Если в справочнике значения  $\lambda = f(t)$  даются в виде таблицы, то получить  $\lambda_{\text{ср}}$  для данного интервала температур несложно. Для многих материалов приводится линейная зависимость  $\lambda = f(t)$ :

$$\lambda(t) = a \pm bt,$$

где  $a, b$  – постоянные коэффициенты, присущие конкретному материалу.

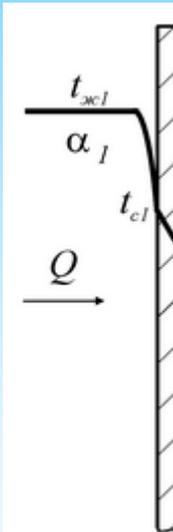
Тогда

$$\lambda_{\text{ср}} = a \pm b \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

# Конвективная теплоотдача

Конвективную теплоотдачу между поверхностью с температурой  $t_c$  и омывающей ее средой с температурой  $t_{ж}$  описывает **закон Ньютона –Рихмана**, согласно которому плотность теплового потока  $q$  прямо пропорциональна разности температур стенки и среды:

$$q = \alpha(t_c - t_{ж}), \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$



Коэффициент пропорциональности в уравнении называется **коэффициентом теплоотдачи**

$$\alpha, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

характеризует интенсивность процесса конвективного теплообмена между поверхностью и омывающей ее средой.

# Конвективная теплоотдача

В теплопередаче принято омывающую поверхность среду (воздух, газ, вода, любой теплоноситель) именовать «жидкость» и обозначать температуру среды  $t_{\text{ж}}$ .

Коэффициент теплоотдачи зависит от температур  $t_c$  и  $t_{\text{ж}}$ , от скорости и от свойств жидкости, от формы, размеров, ориентации поверхности.

Коэффициенты теплоотдачи для различных условий теплообмена рассчитываются по специальным уравнениям.

# Теплопроводность плоской стенки

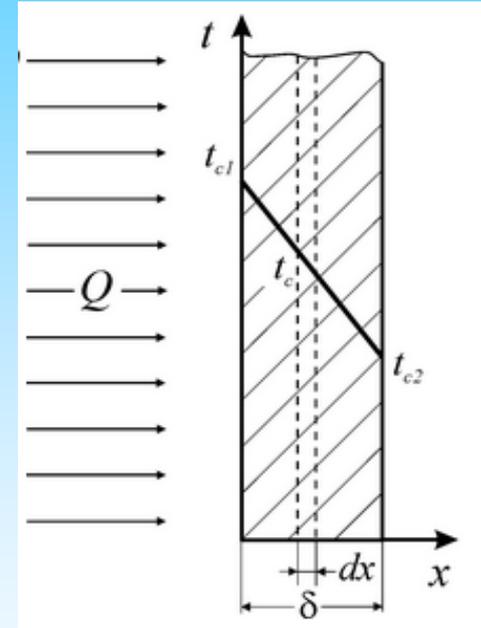
Рассмотрим плоскую однородную стенку толщиной  $\delta$  с постоянным коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  и постоянными температурами на поверхностях  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ .

Расчетная формула для плотности теплового потока

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}), \frac{Вт}{м^2}$$

Поток теплоты, передаваемый через поверхность стенки площадью  $F$ , вычисляется по формуле

$$Q = \frac{\lambda \cdot F}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}), Вт$$



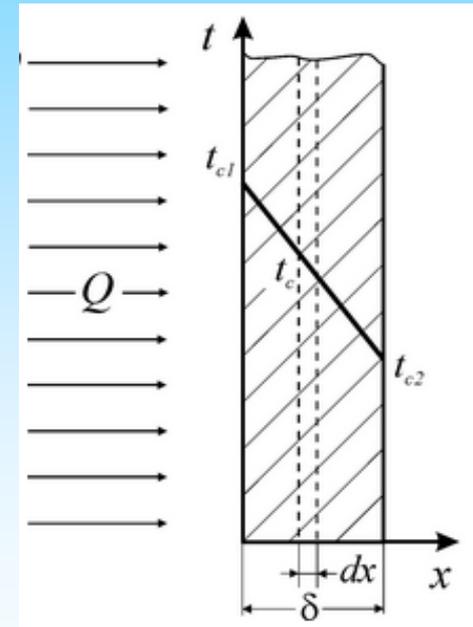
# Теплопроводность плоской стенки

Формулу  $q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2})$ , можно записать в виде

$$q = \frac{(t_{c1} - t_{c2})}{R},$$

где

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$



Величина  $R$  называется **термическим сопротивлением** теплопроводности плоской стенки.

# Теплопроводность плоской стенки

Рассмотрим теплопроводность **многослойной** плоской стенки, состоящей, например, из трех слоев

При стационарном режиме тепловой поток, передаваемый через трехслойную стенку, проходит через все слои, и поэтому для каждого слоя можно записать уравнения:

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_1 - t_2);$$

$$q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_2 - t_3);$$

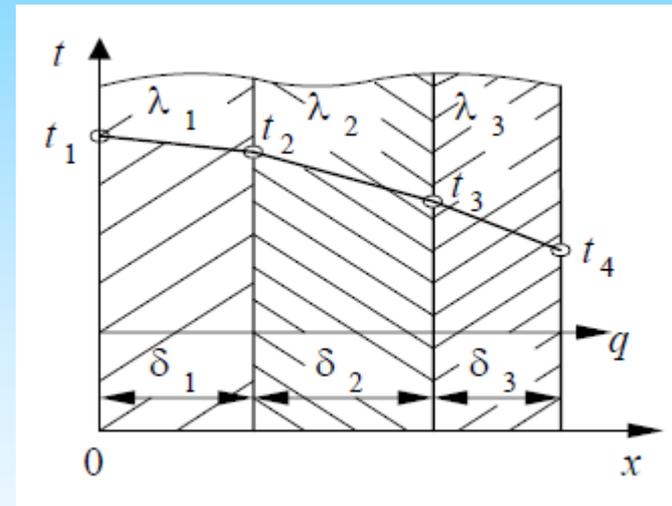
$$q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_3 - t_4),$$

или

$$t_1 - t_2 = \frac{q \delta_1}{\lambda_1};$$

$$t_2 - t_3 = \frac{q \delta_2}{\lambda_2};$$

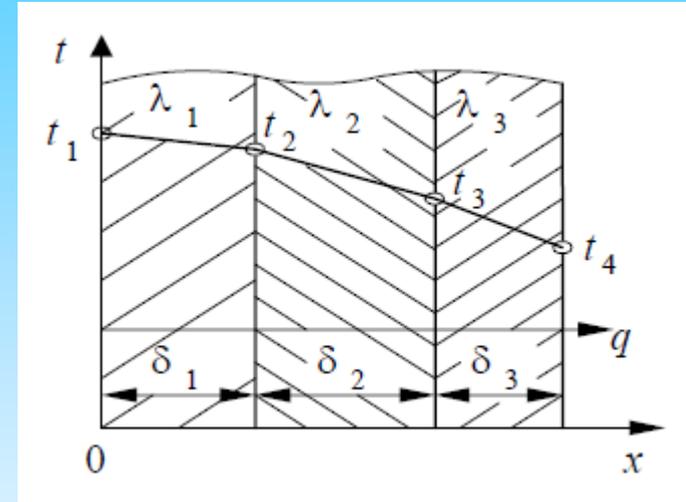
$$t_3 - t_4 = \frac{q \delta_3}{\lambda_3}.$$



# Теплопроводность плоской стенки

Сложив левые и правые части уравнений, получим расчетную формулу для плотности теплового потока, передаваемого через трехслойную стенку,

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}.$$



Общий вид уравнения для многослойной плоской стенки, состоящей из  $n$  однородных слоев с постоянными температурами на наружных поверхностях  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ , имеет следующий вид

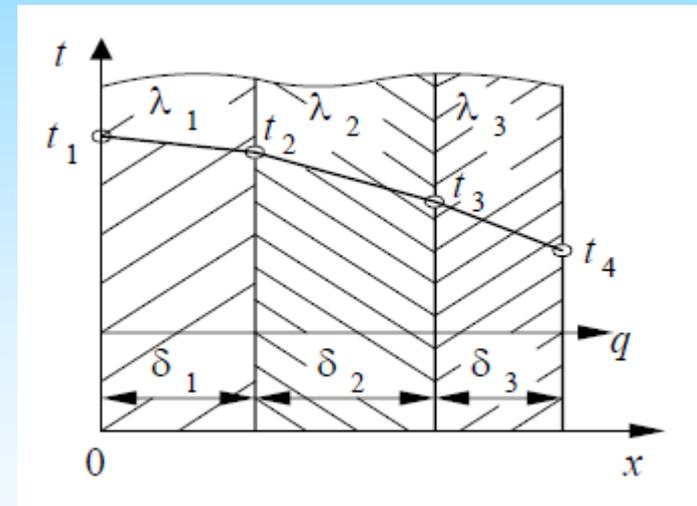
$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}.$$

# Теплопроводность плоской стенки

Средний коэффициент теплопроводности многослойной стенки называют **эффективным** ( $\lambda_{\text{эф}}$ ).

Он равен коэффициенту теплопроводности однородной стенки, толщина и термическое сопротивление которой равны толщине и термическому сопротивлению многослойной стенки:

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$



# Теплопередача

Передача тепла от одной жидкости к другой через разделяющую их стенку называется **теплопередачей**.

Примером теплопередачи служит перенос теплоты от дымовых газов к воде через стенку трубы парового котла, перенос тепла от горячей воды к окружающему воздуху через стенку батареи отопления и т. д.

Теплообмен между поверхностью и средой (теплоносителем) может быть конвективным, если теплоноситель – жидкость (вода, нефть и т. д.), или радиационно-конвективным, когда теплота передается путем конвективного теплообмена и излучением, если теплоноситель – газ (дымовые газы, воздух и т. д.).

# Теплопередача

Рассмотрим теплопередачу через плоскую и цилиндрические стенки при условии только конвективного теплообмена на поверхностях.

Плотность теплового потока  $q$  описывается следующими уравнениями, в зависимости от способа передачи теплоты:

- от горячей жидкости к стенке

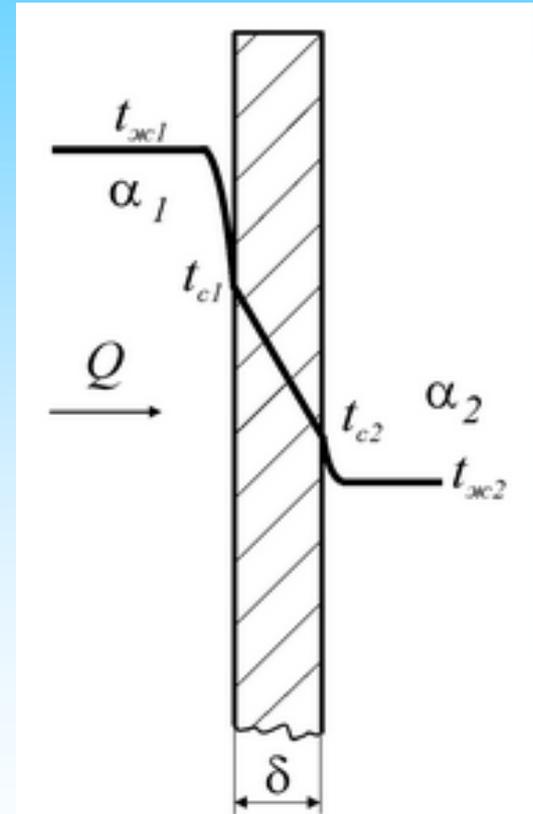
$$q = \alpha_1 (t_{ж1} - t_{c1}),$$

- через стенку

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}),$$

- от стенки к холодной жидкости

$$q = \alpha_2 (t_{c2} - t_{ж2}),$$



# Теплопередача

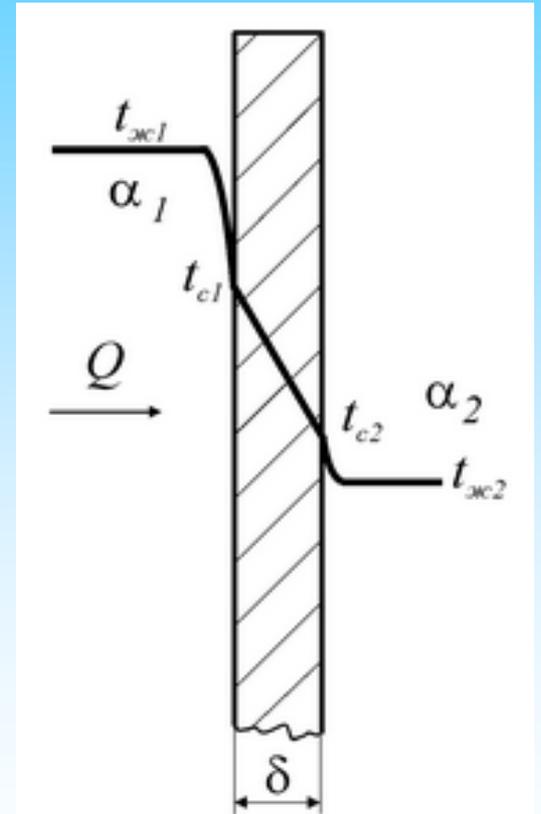
Получаем

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Величины

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1}, \quad R_3 = \frac{1}{\alpha_2}$$

называются термическими сопротивлениями теплоотдачи.



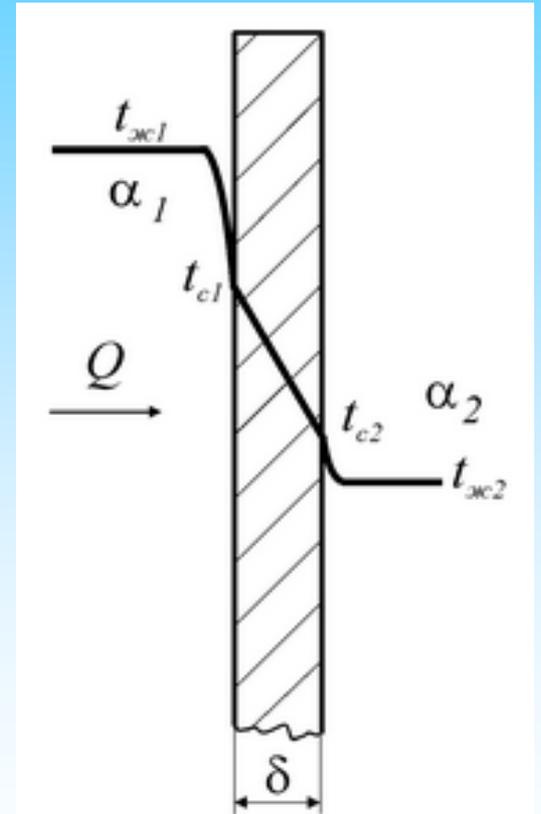
# Теплопередача

Формулу можно записать в виде

$$q = \kappa (t_{ж1} - t_{ж2}),$$

где

$$\kappa = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

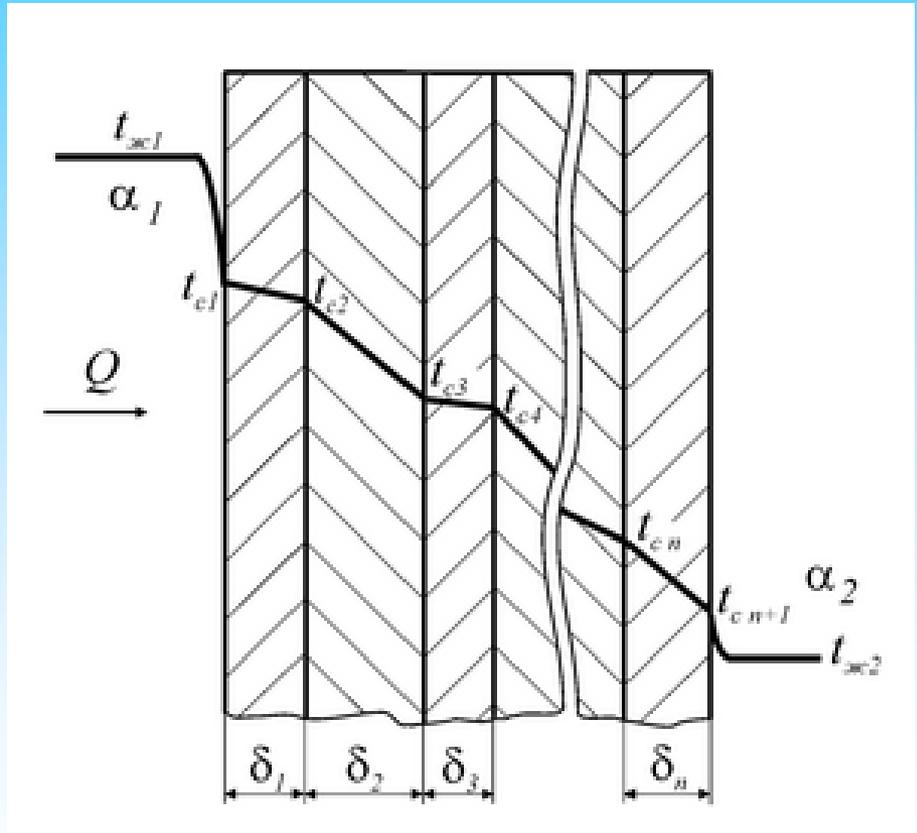


*коэффициент теплопередачи плоской стенки,*  
характеризует интенсивность процесса теплопередачи.

# Теплопередача

Теплопередача через многослойную плоскую стенку рассчитывается по формуле

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$



### Задание № 1. Теплопроводность в многослойной плоской стенке

Теплота газообразных продуктов горения топлива передается через стенку котла кипящей воде. На поверхности стенки заданы граничные условия третьего рода.

Температура газов  $t_{f1} = \dots [^{\circ}\text{C}]$  (графа 1); температура воды  $t_{f2} = \dots [^{\circ}\text{C}]$  (графа 2); коэффициент теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_1 = \dots [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$  (графа 3); коэффициент теплоотдачи от стенки к воде  $\alpha_2 = \dots [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$  (графа 4).

Требуется определить термические сопротивления  $R = \frac{1}{\alpha} = \dots [(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}]$ , коэффициенты теплопередачи  $h$ ,  $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$  и количество теплоты  $q$ ,  $[\text{Дж}]$ , передаваемое от газов к воде через  $1 \text{ м}^2$  поверхности стенки в секунду для следующих случаев:

а) стенка стальная, совершенно чистая, толщина  $\delta_2 = \dots [\text{мм}]$  (графа 6);  $\lambda_2 = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

б) стенка стальная, со стороны воды покрыта слоем накипи толщиной  $\delta_3 = \dots [\text{мм}]$  (графа 7);  $\lambda_3 = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

в) случай (б), дополнительное условие: на поверхности накипи имеется слой масла толщиной  $\delta_4 = \dots [\text{мм}]$  (графа 8);  $\lambda_4 = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

г) случай (в), дополнительное условие: со стороны газов стенка покрыта слоем сажи толщиной  $\delta_1 = \dots [\text{мм}]$  (графа 5);  $\lambda_1 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Приняв количество теплоты для случая а) за 100%, определить в процентах количество теплоты для всех остальных слоев.

Определить температуру  $t_w = \dots [^{\circ}\text{C}]$ , всех слоев стенки для случая г).

Условия задачи приведены в таблице 1.

№ задачи	1	2	3	4	5	6	7	8
	$t_{f1},$ [°C]	$t_{f2},$ [°C]	$\alpha_1,$ [Вт/(м <sup>2</sup> ·К)]	$\alpha_2,$ [Вт/(м <sup>2</sup> ·К)]	$\delta_1,$ мм	$\delta_2,$ мм	$\delta_3,$ мм	$\delta_4,$ мм
1	1200	220	160	3500	1	16	10	1
2	1100	200	150	3000	2	14	5	0.5
3	1000	180	140	2500	1	12	4	1
4	900	160	130	2000	2	10	3	0.5
5	800	140	120	1500	1	8	2	1
6	850	150	60	1000	2	12	10	0.5
7	950	160	70	2000	1	14	9	1
8	1050	170	80	3000	2	16	8	0.5
9	1150	180	90	4000	1	18	7	1
10	1250	190	100	5000	2	20	6	0.5
11	900	225	50	1000	1	14	7	1
12	800	200	40	980	2	13	6	0.5
13	700	175	30	960	1	12	5	1
14	600	150	20	940	2	11	4	0.5
15	500	125	10	920	1	10	3	1
16	575	110	55	2200	2	22	8	0.5
17	675	120	50	2100	1	24	7	1
18	775	130	45	2000	2	26	6	1
19	875	140	40	1900	1	23	5	0.5
20	975	150	35	1800	2	30	4	1
21	1000	100	40	3000	1	10	2	0.5
22	900	125	50	4000	2	12	3	1
23	1050	135	60	3500	1	14	5	0.5
24	950	150	45	4500	2	16	6	1
25	800	200	55	2000	0,5	18	7	0,5
26	850	210	65	2100	1	20	5	1
27	975	175	42	3100	2	22	8	0,5
28	400	100	15	1000	0,5	10	5	1
29	500	120	20	1250	1	12	8	0,5
30	600	140	25	1500	1,5	15	4	1