

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Сибирский федеральный университет»

Кафедра Общей металлургии

ТЕПЛОФИЗИК А

В теории теплообмена изучаются закономерности переноса теплоты из одной части тела (пространства) в другую.

В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА НАХОДЯТ ОТРАЖЕНИЕ

Литейное
производство

это способ изготовления заготовки или готового изделия путем заливки **расплавленного металла** в полость заданной конфигурации с последующим его затвердеванием

Металлургическое
производство

металлургия цветных /тяжелых/легких металлов - это не только комплекс мероприятий по **получению металлов** (добыча, обогащение, металлургический передел, получение отливок чистых металлов и сплавов на их основе), а также **переработка их лома**

Обработка
металлов
давлением

технологический процесс **получения заготовок или деталей** в результате силового воздействия инструмента на обрабатываемый материал.

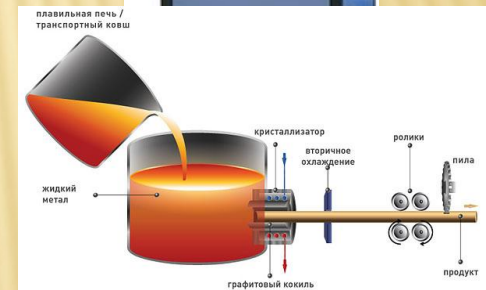
Литейное производство



Дуговая
сталеплавильная
печь



Индукционные
печи для
плавки
драгоценных
металлов

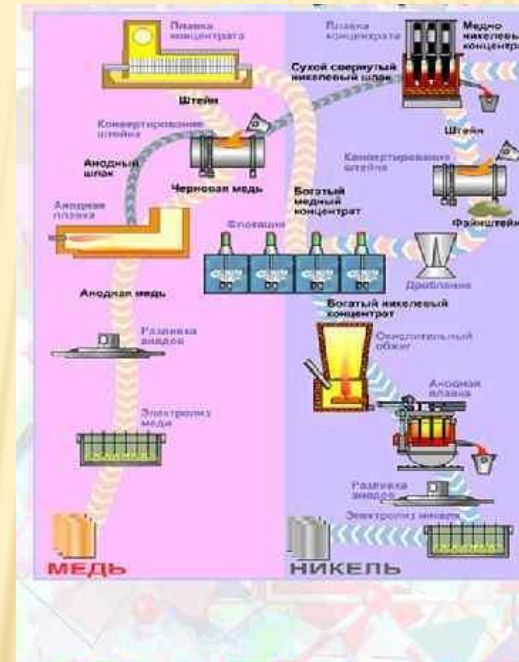


Печи
непрерывного
литья

Металлургическое производство



Получение
алюминия



- 1) Плавка на штейн
- 2) Конвертирование
- 3) Охлаждение и флотационное разделение файнштейна на медный и никелевый концентрат
- 4) Окислительный обжиг никелевого концентрата
- 5) Твердофазное предварительное восстановление никелевого огарка
- 6) Электроплавка на анодный металл
- 7) Электролиз с получением катодного никеля

Технологическая схема
получения никеля из
сульфидных медно-
никелевых руд

Обработка металлов давлением

Для нагрева заготовок

Для
термообработки

Горячая
деформация

Холодная
деформация



Печи
сопротивлен
ия



Камерные
печи



Методически
е печи

□ Теплообмен – это необратимый самопроизвольный процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным распределением температуры.

Чтобы происходил процесс теплообмена, необходимо наличие разницы температур.

□ Теплообмен – это необратимый самопроизвольный процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным распределением температуры.

Чтобы происходил процесс теплообмена, необходимо наличие разницы температур.

Процесс теплообмена, протекающий на границе двух фаз, называется **теплоотдачей**.

Процесс теплообмена между средами, разделенными твердой перегородкой, называется **теплопередачей**.

При рассмотрении процессов теплообмена чаще всего возникает вопрос определения

теплового потока Q
$$Q = \frac{D_{\text{ж}}}{c}$$

- ✓ Это векторная величина
- ✓ Поток направлен в сторону меньших температур

Тепловой поток с единицы (через единицу) площади поверхности называется

удельным тепловым потоком или плотностью теплового потока q

$$q = \frac{Q}{F} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

ТЕПЛООБМЕНА

КОНВЕКЦИ

Я

Процесс переноса теплоты за счет перемещения макрообъемов среды из области с одной температурой в область с другой температурой.

- Этот вид теплообмена имеет место только в подвижных средах (жидкостях и газах).

ТЕПЛОВОЕ

ИЗЛУЧЕНИ

Е

**Радиационный,
лучистый**

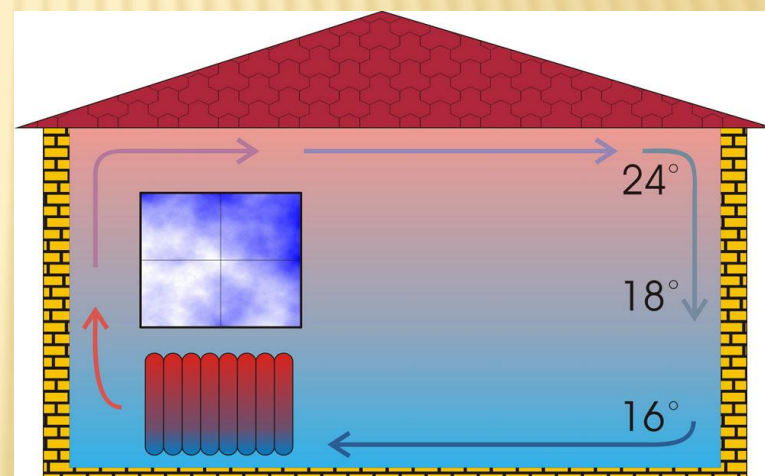
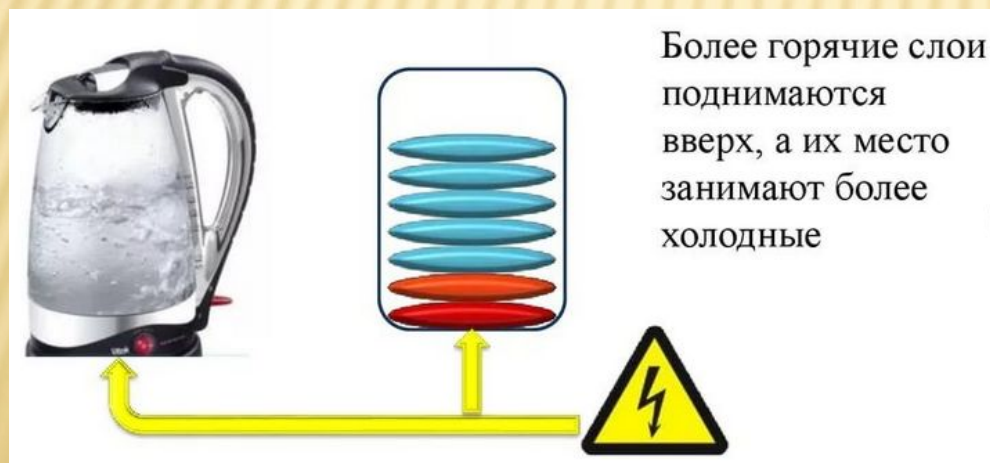
процесс переноса энергии электромагнитными волнами в определенном диапазоне частот.

ТЕПЛО- ПРОВОДНОС ТЬ

процесс переноса теплоты за счет хаотического теплового движения или тепловых колебаний микрочастиц (молекул, атомов, ионов).

- При непосредственном контакте между частями происходит обмен энергией.
- В чистом виде теплопроводность встречается только в сплошных твердых телах.

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

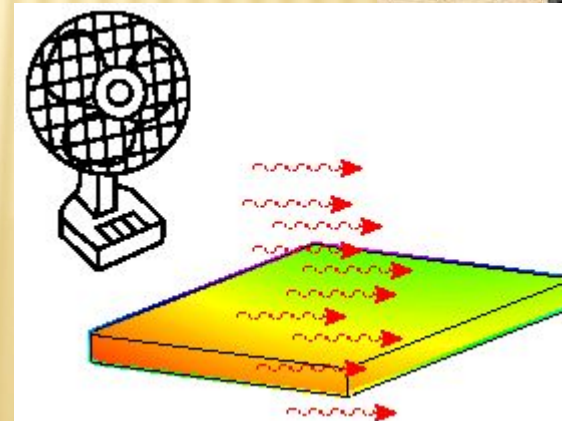


КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

В зависимости от причин, вызывающих движение (конвекцию) среды различают

СВОБОДНУ
Ю

ВЫНУЖДЕННУ
Ю



СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ

перемещение среды вызвано неоднородностью поля плотности, что в свою очередь связано с неоднородностью поля температур.

- ✓ Например, более прогретые слои среды вследствие уменьшения ее плотности начинают подниматься вверх, их место занимают более холодные, таким образом возникает движение среды.
- ✓ Здесь **основным фактором** является **разница температур (Δt)** в среде или между средой и поверхностью, с которой происходит теплообмен.

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

обусловлена неоднородностью поля давлений

- ✓ Например, действием насоса, вентилятора, компрессора и т.п., когда создается направленный поток среды в определенную сторону.
- ✓ В этом случае **основным фактором** является **скорость движения среды**.

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

В случае конвективной теплоотдачи, то есть конвективного теплообмена между поверхностью тела и средой, тепловой поток определяется по формуле

Ньютона – Рихмана

$$Q = \alpha_K \cdot (t_{\text{П}} - t_{\text{С}}) \cdot F$$

где $t_{\text{П}}$ и $t_{\text{С}}$ – температура поверхности и среды, в которой происходит перенос тепла °С;

$(t_{\text{П}} - t_{\text{С}}) = \Delta t$ – температурный напор, °С;

F – площадь поверхности теплообмена, м²;

α_K – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Коэффициент теплоотдачи конвекцией (α_k) показывает, какое количество теплоты отдается с 1 м^2 (или на 1 м^2) поверхности в единицу времени при разности температур между средой и поверхностью в 1°C

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

- Так как процесс теплоотдачи описывается системой дифференциальных уравнений, аналитическое решение которой затруднено, то α_k часто определяют по *критериям подобия*.

Функциональная зависимость между критериями может быть представлена в виде

$$Nu = f(Gr, Re, Pr)$$

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

- Так как процесс теплоотдачи описывается системой дифференциальных уравнений, аналитическое решение которой затруднено, то α_k часто определяют по *критериям подобия*.

Функциональная зависимость между критериями может быть представлена в виде

$$Nu = f(Gr, Re, Pr)$$

КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ

$$Nu = f(Gr, Re, Pr)$$

1. КРИТЕРИЙ НУССЕЛЬТА –

✓ является определяемым

✓ характеризует конвективный
теплообмен на границе «среда –
поверхность»

$$Nu = \frac{\alpha_K \cdot l}{\lambda}$$

l – характерный линейный размер, [м];

λ – коэффициент теплопроводности
среды, Вт/(м·К);

КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ

$$Nu = f(Gr, Re, Pr)$$

2. КРИТЕРИЙ РЕЙНОЛЬДСА –

характеризует соотношение сил инерции и сил вязкости в потоке

✓ **Указывает на характер течения**

среды;

$$Re = \frac{\omega \cdot l}{\nu}$$

ω – скорость истечения среды, [м/с];

ν – кинематический коэффициент вязкости среды, [м²/с];

$$Nu = f(Gr, Re, Pr)$$

3. КРИТЕРИЙ ГРАСГОФА –

характеризует подъемную силу, возникающую в среде за счет разницы плотностей (температур)

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 [м/с^2]$;

β – коэффициент объемного расширения,

Δt –

$\Delta t = (t_{\Pi} - t_c)$ –

температурный напор, $[^{\circ}C]$;

l – характерный линейный размер, $[м]$;

ν – кинематический

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot (t_{\Pi} - t_c) \cdot l^3}{(t_{CP} + 273) \cdot \nu^2}$$

КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ

$$Nu = f(Gr, Re, Pr)$$

4. КРИТЕРИЙ ПРАНДТЛЯ –

**характеризует
физические
свойства среды**

ν – кинематический коэффициент
вязкости

среды, $[m^2/s]$;

a – коэффициент
температуропроводности
среды, $[m^2/s]$;

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

ρ – плотность среды, $[kg/m^3]$;

c – удельная теплоемкость среды,
 $[J/(kg \cdot K)]$;

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot c \cdot \rho}{\lambda}$$

КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ

$$Nu = f(Gr, Re, Pr)$$

5. КРИТЕРИЙ ПЕКЛЕ –

Характеризует отношение количества теплоты, переносимой конвекцией к теплоте, переносимой теплопроводностью.

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{\omega \cdot l}{a}$$

Re – критерий Рейнольдса

Pr – критерий Прандтля

ω – скорость истечения среды, [м/с];

l – характерный линейный размер, [м];

a – коэффициент

температуропроводности

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

ХАРАКТЕРНЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ

ФОРМА
ПОВЕРХНОСТИ

ПЛОСКАЯ

ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ

$l = \text{наименьший размер}$

(EM; FK; AB; CD)

ВЕРТИКАЛЬНАЯ

$l = \text{высоту } (h)$

(EA; MB; FD; KC)

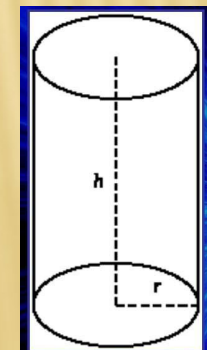
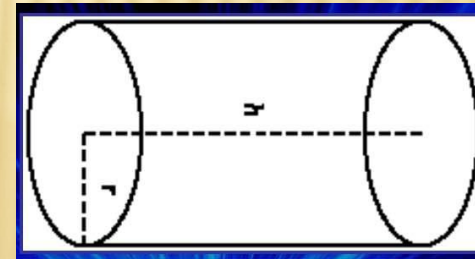
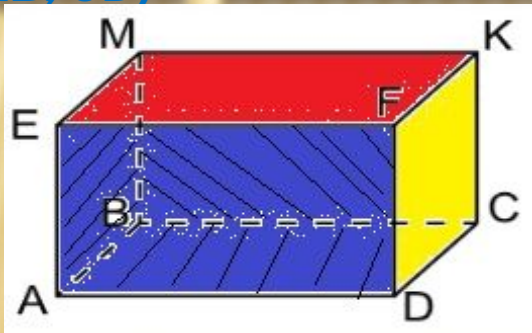
ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ

$l = \text{диаметр } (d=2R)$

ВЕРТИКАЛЬНАЯ

$l = \text{высоте}$

(длине) (h)



ОСОБЕННОСТЬ

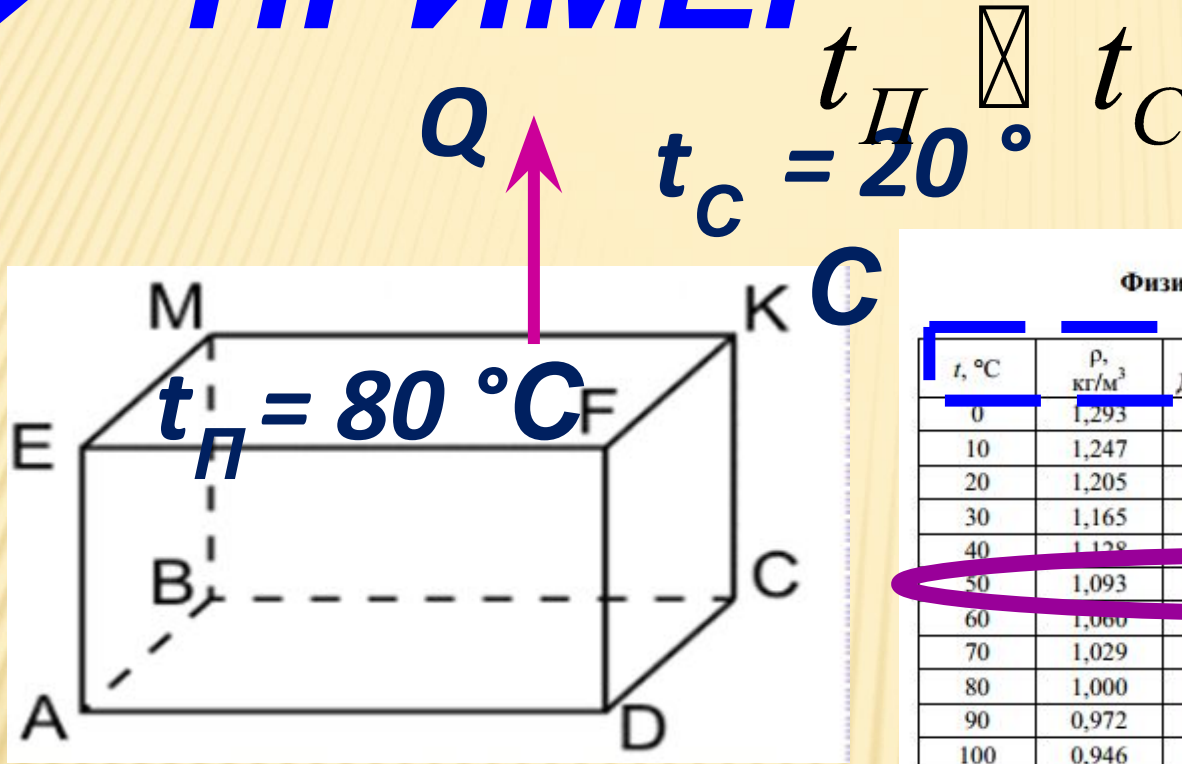


Особенность определения числа любого критерия подобия заключается в том, что некоторые величины к расчету выбирают из справочных таблиц при средней температуре среды, а именно.

$$t_{CP} = 0,5 \cdot (t_{II} + t_C)$$

№	Название	Обозначение	Единицы измерения
1	Кинематический коэффициент вязкости	ν	$\text{м}^2/\text{с}$
2	Коэффициент температуропроводности	a	$\text{м}^2/\text{с}$ $\text{кг}/\text{м}^3$
3	Плотность среды	ρ	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
4	Удельная теплоемкость среды	c	$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

ПРИМЕР



$$t_{CP} = 0,5 \cdot (t_{\Pi} + t_{\text{C}}) =$$

$$0,5 \cdot (80 + 20) = 50^{\circ}\text{C}$$

Приложение 1

Физические параметры сухого воздуха
при давлении 101,3 кПа

$t, ^{\circ}\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, 10^3, \text{Дж/(м}^3 \cdot \text{K)}$	$\lambda, 10^{-2}, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$a, 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu, 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	1,300	2,44	18,8	13,28	0,707
10	1,247	1,301	2,51	20,0	14,16	0,705
20	1,205	1,301	2,59	21,4	15,06	0,703
30	1,165	1,301	2,67	22,9	16,00	0,701
40	1,128	1,301	2,76	24,3	16,96	0,699
50	1,093	1,301	2,83	25,7	17,95	0,698
60	1,060	1,301	2,90	27,2	18,97	0,696
70	1,029	1,301	2,96	28,6	20,02	0,694
80	1,000	1,302	3,05	30,2	21,09	0,692
90	0,972	1,303	3,13	31,9	22,10	0,690
100	0,946	1,303	3,21	33,6	23,13	0,688
120	0,898	1,303	3,34	36,8	25,45	0,686
140	0,854	1,303	3,49	40,3	27,80	0,684
160	0,815	1,304	3,64	43,9	30,09	0,682
180	0,779	1,304	3,78	47,5	32,49	0,681
200	0,746	1,310	3,93	51,4	34,85	0,680
250	0,674	1,312	4,27	61,0	40,61	0,677
300	0,615	1,318	4,60	71,6	48,33	0,674
350	0,566	1,323	4,91	81,9	55,46	0,676
400	0,524	1,330	5,21	93,1	63,09	0,678
500	0,456	1,344	5,74	115,3	79,38	0,687
600	0,404	1,358	6,22	138,3	96,89	0,699

РАСЧЕТ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

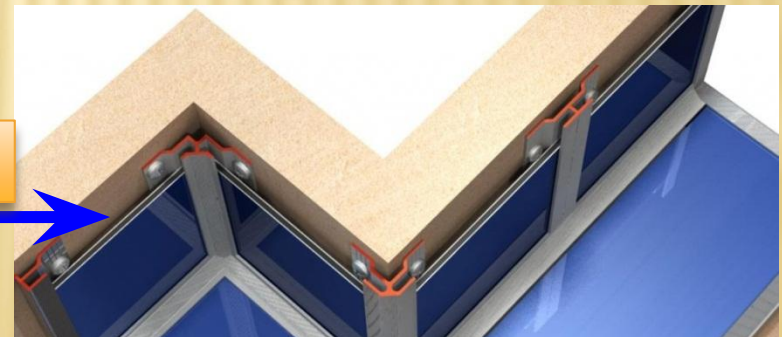
В НЕОГРАНИЧЕННОМ
ПРОСТРАНСТВЕ

В ОГРАНИЧЕННОМ
ПРОСТРАНСТВЕ



В малом ограниченном
пространстве (прослойки, щели,
кольцевые каналы, зазоры)

ЗАЗОР
 R



РАСЧЕТ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

- Необходимо рассчитать величину *теплового потока* **Q, Вт**
- либо *удельный тепловой поток* **q,**

$$Q = \alpha_K \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{с}}) \cdot F \text{ [Вт]}$$

формула
**Ньютона –
Рихмана**

$$q = \frac{Q}{F} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

НЕОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Чтобы рассчитать величину теплового потока Q , необходимо определить **коэффициент теплоотдачи конвекцией α_K** , а значит, найти критерий Nu :

$$Nu = \frac{\alpha_K \cdot l}{\lambda} \quad \longrightarrow \quad \alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$

НЕОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

При свободной конвекции, когда внешние факторы не действуют, критериальное уравнение принимает вид

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

Тогда **критерий Nu** определяется по уравнению Лоренца

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

где **c** и **n** – коэффициент и показатель степени, зависящие

НЕОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

Определяют критерий Грасгофа

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot (t_{\Pi} - t_C) \cdot l^3}{(t_{CP} + 273) \cdot \nu^2}$$

- ✓ Теплофизические свойства среды выбирают из справочных таблиц при средней температуре среды $t_{CP} = 0,5 \cdot (t_{\Pi} + t_C)$
- ✓ Коэффициент объемного расширения β равен $\beta = \frac{1}{(t_{CP} + 273)}$



НЕОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

Определяют
критерий
Прандтля
по справочнику

Приложение 1

Физические параметры сухого воздуха
при давлении 101,3 кПа

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, 10^3, \text{Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$	$\lambda, 10^{-2}, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$a, 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu, 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	1,300	2,44	18,8	13,28	0,707
10	1,247	1,301	2,51	20,0	14,16	0,705
20	1,205	1,301	2,59	21,4	15,06	0,703
30	1,165	1,301	2,67	22,9	16,00	0,701
40	1,128	1,301	2,76	24,3	16,96	0,699
50	1,093	1,301	2,83	25,7	17,95	0,698
60	1,060	1,301	2,90	27,2	18,97	0,696
70	1,029	1,301	2,96	28,6	20,02	0,694
80	1,000	1,302	3,05	30,2	21,09	0,692
90	0,972	1,303	3,13	31,9	22,10	0,690
100	0,946	1,303	3,21	33,6	23,13	0,688
120	0,898	1,303	3,34	36,8	25,45	0,686
140	0,854	1,303	3,49	40,3	27,80	0,684
160	0,815	1,304	3,64	43,9	30,09	0,682
180	0,779	1,304	3,78	47,5	32,49	0,681
200	0,746	1,310	3,93	51,4	34,85	0,680
250	0,674	1,312	4,27	61,0	40,61	0,677
300	0,615	1,318	4,60	71,6	48,33	0,674
350	0,566	1,323	4,91	81,9	55,46	0,676
400	0,524	1,330	5,21	93,1	63,09	0,678
500	0,456	1,344	5,74	115,3	79,38	0,687
600	0,404	1,358	6,22	138,3	96,89	0,699

НЕОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

Определяют произведение $Gr \cdot Pr$

По табл. находят значения
эмпирических коэффициентов c и

n

Зависимость C и n от $Gr \cdot Pr$

$Gr \cdot Pr$	$1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$
C	1,18	0,54	0,133
n	0,125	0,25	0,33

НЕОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

По уравнению Лоренца
определяют значение
критерия Nu

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

Определяют
величину
коэффициен
т
теплоотдач

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$

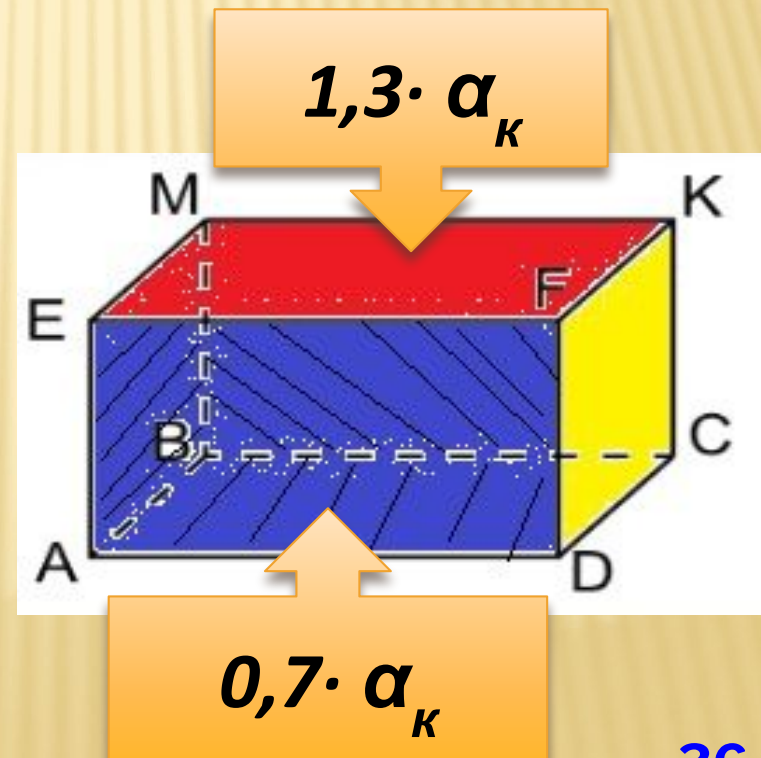
НЕОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Величина α_k , найденная по критерию Nu , справедлива для вертикального расположения поверхности.

□ Если теплоотдающая плоская поверхность расположена горизонтально и обращена вверх, то α_k надо умножить на **1,3**

□ Если горизонтальная поверхность обращена вниз, то умножить на **0,7**.

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$



НЕОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Определяют тепловой поток

$$Q = \alpha_K \cdot (t_{\text{П}} - t_{\text{С}}) \cdot F, [\text{Вт}]$$

*Определяют удельный тепловой
поток*

$$q = \frac{Q}{F}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

РАСЧЕТ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

- Необходимо рассчитать величину *теплового потока* Q , Вт
- либо *удельный тепловой поток* q ,
 Вт/м^2

В этом случае, характерна слабо развитая конвекция.

- Количество теплоты, переносимое конвекцией, становится сравнимо с теплотой, *переносимой теплопроводностью*

ОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

□ *Тепловой поток*

$$Q = \frac{\lambda_{ЭKB}}{\delta} \cdot [t_1 - t_2] \cdot F, [\text{Вт}]$$

□ *Удельный тепловой поток*

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{\lambda_{ЭKB}}{\delta} \cdot [t_1 - t_2], \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

ОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

где δ – расстояние между
поверхностями теплообмена, [м];

t_1 и t_2 – температуры этих
поверхностей, [°C];

F – площадь поверхности
теплообмена, [м²];

$\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент
теплопроводности, [Вт/(м·K)]

ОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Чтобы рассчитать величину теплового потока Q , необходимо определить **эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ЭКВ}}$** по формуле:

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \varphi \cdot \lambda$$

где

φ – коэффициент, учитывающий конвективную составляющую в теплообмене

ОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

коэффициент ϕ зависит от
значения произведения **Gr · Pr**
согласно критериальной
зависимости

$$\phi = f(\text{Gr} \cdot \text{Pr})$$

- ✓ Если **Gr · Pr < 1000**, тогда $\phi = 1,0$
- ✓ Если **Gr · Pr > 1000**, тогда

$$\phi = 0,18 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25}$$

НЕОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

$$\varphi = f(\text{Gr} \cdot \text{Pr})$$

Определяют критерий Грасгофа

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot (t_1 - t_2) \cdot l^3}{(t_{CP} + 273) \cdot \nu^2}$$

- ✓ Теплофизические свойства среды выбирают из справочных таблиц при средней температуре среды $t_{CP} = 0,5 \cdot (t_1 + t_2)$
- ✓ Коэффициент объемного расширения $\beta = \frac{1}{(t_{CP} + 273)}$
- ✓ За характерный линейный размер принимают расстояние между поверхностями теплообмена, $l =$



ОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

$$\varphi = f(\text{Gr} \cdot \text{Pr})$$

Определяют
критерий
Прандтля
по справочнику
при средней
температуре
поверхностей

Приложение 1

Физические параметры сухого воздуха
при давлении 101,3 кПа

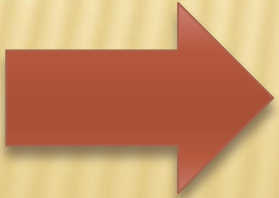
$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, 10^3, \text{Дж/(м}^3 \cdot \text{K)}$	$\lambda, 10^{-2}, \text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$a, 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu, 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	1,300	2,44	18,8	13,28	0,707
10	1,247	1,301	2,51	20,0	14,16	0,705
20	1,205	1,301	2,59	21,4	15,06	0,703
30	1,165	1,301	2,67	22,9	16,00	0,701
40	1,128	1,301	2,76	24,3	16,96	0,699
50	1,093	1,301	2,83	25,7	17,95	0,698
60	1,060	1,301	2,90	27,2	18,97	0,696
70	1,029	1,301	2,96	28,6	20,02	0,694
80	1,000	1,302	3,05	30,2	21,09	0,692
90	0,972	1,303	3,13	31,9	22,10	0,690
100	0,946	1,303	3,21	33,6	23,13	0,688
120	0,898	1,303	3,34	36,8	25,45	0,686
140	0,854	1,303	3,49	40,3	27,80	0,684
160	0,815	1,304	3,64	43,9	30,09	0,682
180	0,779	1,304	3,78	47,5	32,49	0,681
200	0,746	1,310	3,93	51,4	34,85	0,680
250	0,674	1,312	4,27	61,0	40,61	0,677
300	0,615	1,318	4,60	71,6	48,33	0,674
350	0,566	1,323	4,91	81,9	55,46	0,676
400	0,524	1,330	5,21	93,1	63,09	0,678
500	0,456	1,344	5,74	115,3	79,38	0,687
600	0,404	1,358	6,22	138,3	96,89	0,699

ОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

$$\varphi = f(\text{Gr} \cdot \text{Pr})$$

Определяют произведение $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$

Выбирают

- ✓ Если $\text{Gr} \cdot \text{Pr} < 1000$,
тогда $\varphi = 1,0$  $\lambda_{\text{ЭКВ}} = \lambda$
- ✓ Если $\text{Gr} \cdot \text{Pr} > 1000$,
тогда  $\lambda_{\text{ЭКВ}} = \left[0,18 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \right] \cdot \lambda$

ОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Определяют тепловой поток

$$Q = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{\delta} \cdot (t_1 - t_2) \cdot F, [\text{Вт}]$$

Определяют удельный тепловой

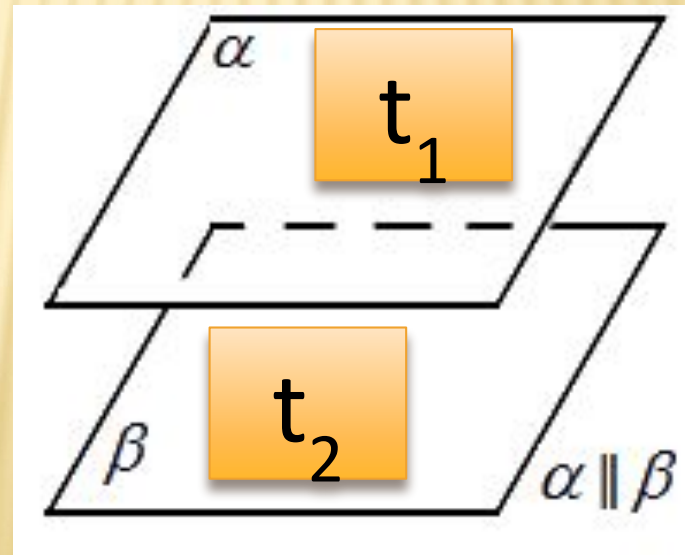
$$q = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{\delta} \cdot (t_1 - t_2), \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

ОГРАНИЧЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Примечание

$$Q = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{\delta} \cdot (t_1 - t_2) \cdot F, [\text{Вт}]$$

За величину F
принимают
теплоотдающую
поверхность



$$t_1 > t_2$$



$$F \text{ при } t_1$$

РАСЧЕТ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

В этом случае теплоотдача
зависит от:

- скорости потока
- характера движения

ЛАМИНАРНЫ
Й

ТУРБУЛЕНТН
ЫЙ

ПЕРЕХОДНЫЙ

характера движения среды

ЛАМИНАРНЫ Й

Такое движение среды, при котором ее частицы движутся параллельно друг другу и их траектории не пересекаются.

$$Re < 2400$$



характера движения среды



ПЕРЕХОДНЫЙ

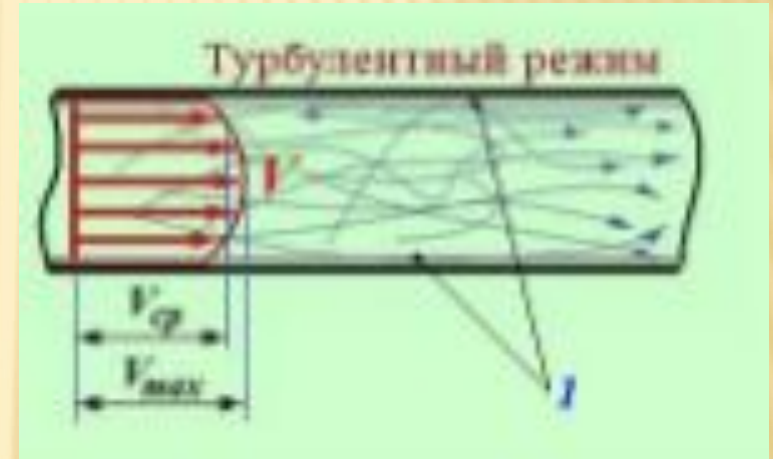
упорядоченное **движение** частиц очень неустойчиво, и при малейшем изменении условий перемещения **потока**, может произойти **переход** от ламинарного режима к турбулентному, и наоборот.

$$2400 < Re < 3200$$

характера движения среды

ТУРБУЛЕНТН ЫЙ

- Неизбежно происходит перемешивание среды.
- У стенок скорость потока практически равна 0 м/с. Здесь возникает неподвижный слой среды, который называют **пограничным слоем**



$$Re > 3200$$

РАСЧЕТ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ТРУБАХ ИЛИ КАНАЛАХ

- Необходимо рассчитать величину *теплового потока* **Q, Вт**

$$Q = \alpha_K \cdot (t_{\Pi} - t_c) \cdot F [\text{Вт}]$$

- либо *удельный тепловой поток* **q, Вт/м²**

$$q = \frac{Q}{F} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

Чтобы рассчитать величину теплового потока Q , необходимо определить коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k , а значит, найти критерий Nu :

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda} \rightarrow \alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Критериальное уравнение
зависит от характера течения
среды

ЛАМИНАРНЫ
Й

$$Nu = f(Gr, Re, Pr)$$

ТУРБУЛЕНТН
ЫЙ

$$Nu = f(Re, Pr)$$

ПЕРЕХОДНЫЙ

$$Nu = f(Pr)$$

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Чтобы рассчитать величину теплового потока Q , необходимо определить

1. Характер течения среды

$$Re = \frac{\omega \cdot l}{\nu}$$

где

ω – скорость
истечения среды,
[м/с];

ν – кинематический
коэффициент
вязкости среды,
[м²/с];

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

- ✓ Если критерий **$Re < 2400$** , то
режим движения среды
ламинарный

$$Nu = 0,17 \cdot Re_c^{0,33} \cdot Pr_c^{0,43} \cdot Gr_c^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_{\pi}} \right)^{0,25}$$

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

- ✓ Если критерий $Re < 3200$, то режим движения среды **турбулентный**

$$Nu = 0,021 \cdot Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_\Pi} \right)^{0,25}$$

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

- ✓ Если критерий $2400 < Re < 3200$,
то режим движения среды
переходный

$$Nu = k \cdot Re_c^{0,43}$$

где $k = f(Re_c)$

*определяется по табл. в зависимости от
значения критерия Re_c*

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Примечание

$$Nu = 0,021 \cdot Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_\Pi} \right)^{0,25}$$

Индекс «**c**» означает, что все параметры среды взяты при ее средней температуре

$$t_{CP} = 0,5 \cdot \left(t_C^{ex} + t_C^{blx} \right)$$

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Примечание

$$Nu = 0,021 \cdot Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_c}{Pr_n} \right)^{0,25}$$


Pr_n – критерий Прандтля тоже взят для среды, но при средней температуре поверхности

$$t_{П.СР} = 0,5 \cdot \left(t_{П}^{вх} + t_{П}^{вых} \right)$$

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Примечание

При этом

✓ за характерный размер ℓ принимают гидравлический диаметр канала,

т.е. $\ell = d_{\text{гидр}}$

Где

F – площадь поперечного сечения

канала, [м²];

Π – внутренний периметр канала, [м]

$$d_{\text{гидр}} = \frac{4 \cdot F}{\Pi}$$

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Чтобы рассчитать величину теплового потока Q , необходимо определить

2. Коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$Nu = \frac{\alpha_K \cdot l}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$$

ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ

Чтобы рассчитать величину теплового потока Q , необходимо определить

3. Определяем тепловой поток (Q)
или **4. Удельный тепловой поток (q)**

$$Q = \alpha_K \cdot (t_{\Pi} - t_c) \cdot F, [\text{Вт}]$$

$$q = \frac{Q}{F}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

ТЕПЛООБМЕНА

КОНВЕКЦИ

Я

Процесс переноса теплоты за счет перемещения макр-объемов среды из области с одной температурой в область с другой температурой.

- Этот вид теплообмена имеет место только в подвижных средах (жидкостях и газах).

ТЕПЛОВОЕ

ИЗЛУЧЕНИ

Е

**Радиационный,
лучистый**

процесс переноса энергии электромагнитными волнами в определенном диапазоне частот.

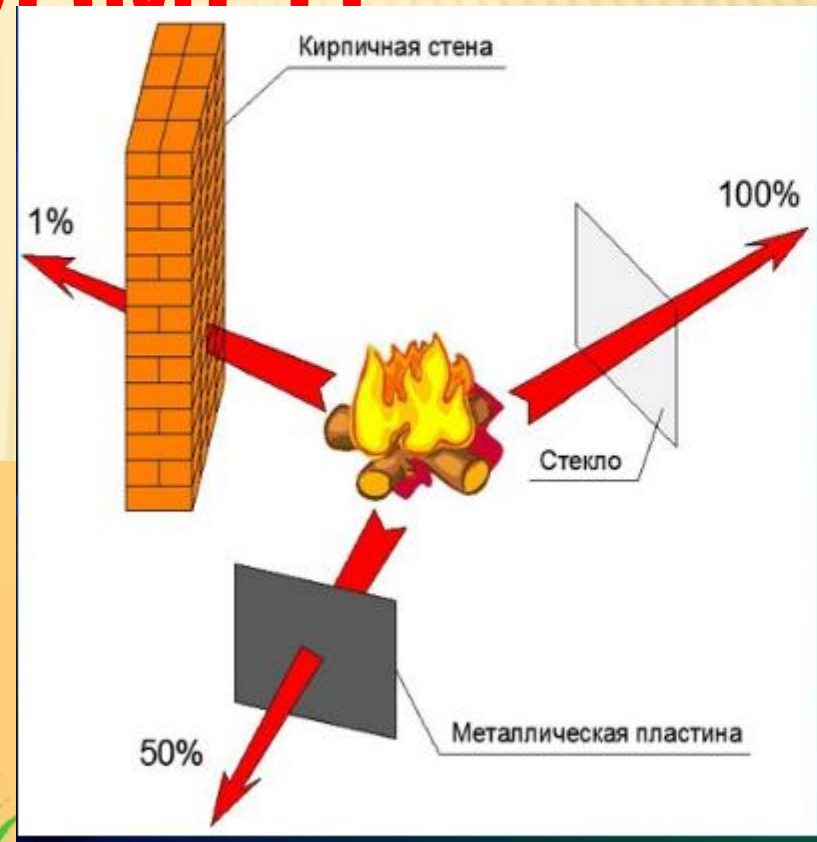
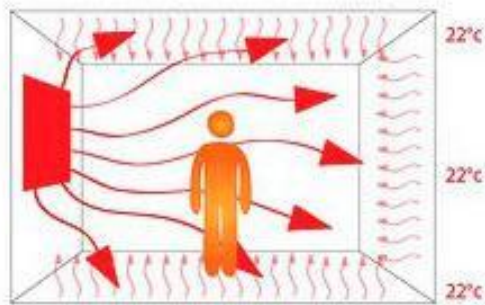
ТЕПЛО- ПРОВОДНОС ТЬ

процесс переноса теплоты за счет хаотического теплового движения или тепловых колебаний микрочастиц (молекул, атомов, ионов).

- При непосредственном контакте между частями происходит обмен энергией.
- В чистом виде теплопроводность встречается только в сплошных твердых телах.

РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Инфракрасное отопление





РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Все реальные тела, имеющие температуру, отличную от *абсолютного нуля* ($-273,15^{\circ}\text{C}$), излучают энергию.

Распределение излучаемой энергии по длинам волн зависит от

- температуры,
- физического строения тела.



РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Спектр излучения,

характеризующийся набором полос
и линий излучения,

- ✓ *твердых тел* является
непрерывным (сплошным),
- ✓ *газов* – прерывистым
(дискретным),

РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

- ✓ Большинство твердых тел поглощает и излучает тепловую энергию тонким поверхностным слоем
- ✓ газы и некоторые полупрозрачные материалы – всем объемом.

РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

К тепловому излучению относится излучение в диапазоне длин волн от **0,4 до 800 мкм.**

Оно включает в себя

- ✓ *видимое излучение 0,4–0,8 мкм*
- ✓ *инфракрасное излучения 0,8–800 мкм*

РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Количество энергии, излучаемое телом по всем длинам волн с площади F в единицу времени, называется

**поток
интегрального
излучения, или полным
поток излучения Q ,**

Вт





РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Поток интегрального
излучения, отнесенный к
единице площади поверхности
излучателя

Различают

Отношение плотности потока
излучения малого интервала
длин волн к величине этого
интервала длин волн

**Плотность
потока
интегрального
излучения**

$$q = \frac{dQ}{dF} \left[\frac{Вт}{м^2} \right]$$

**Плотность
потока
спектрального
излучения**

$$q_\lambda = \frac{dq}{d\lambda} \left[\frac{Вт}{м^3} \right]$$

ЗАКОНЫ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНЕ

1. Плотность потока
спектрального
излучения абсолютно
черного тела согласно

закону Планка

$$q_{0\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{\left[e^{\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T} \right)} - 1 \right]}$$

где

$q_{0\lambda}$ – плотность потока спектрального излучения АЧТ
(абсолютно черного тела) с длиной волны λ ,

[Вт/м³];

C_1 и C_2 – постоянные Планка,

$$C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$$

$$C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Максимальная

плотность потока
спектрального
излучения АЧТ
пропорциональна
температуре в пятой
степени

где

$$q_{0\lambda} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{\left[e^{\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T} \right)} - 1 \right]}$$

$q_{0\lambda}$ – плотность потока спектрального излучения АЧТ
(абсолютно черного тела) с длиной волны λ ,

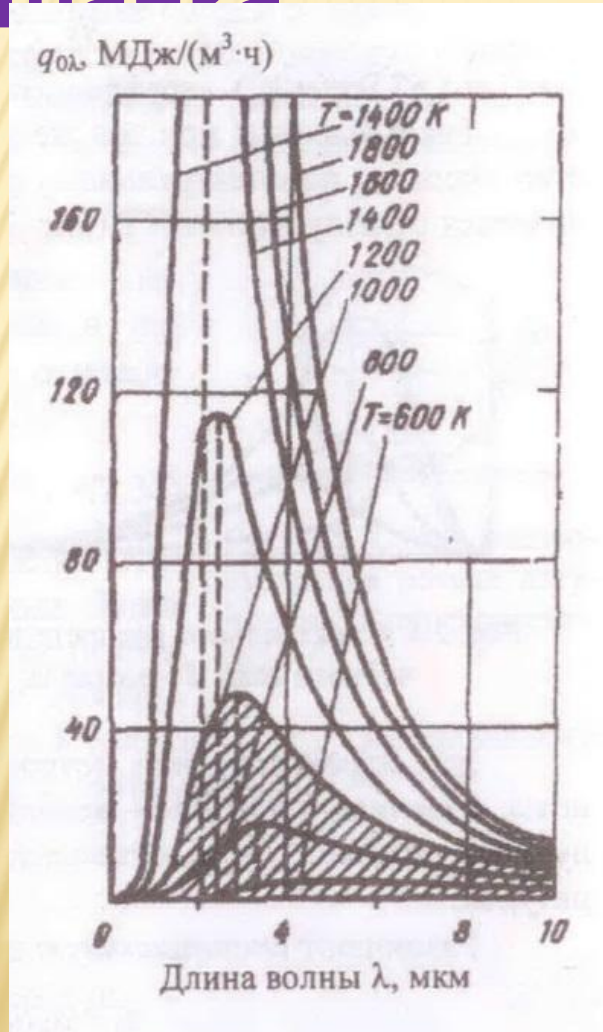
[Вт/м³];

C_1 и C_2 – постоянные Планка,

$$C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$$

$$C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Графическое представление закона Планка



**Зависимость
спектральной
плотности потока
излучения АЧТ от
длины волны и
температуры**

ОСОБЕННОСТИ ЗАКОНА ПЛАНКА

- Интенсивность излучения АЧТ при любой температуре в области малых длин волн резко возрастает, достигая максимального значения, затем уменьшается.
- Повышение температуры АЧТ приводит к увеличению интенсивности излучения всех длин волн, при этом максимум излучения смещается в сторону коротких длин волн.

2. Согласно **закону Вина** произведение длины волны соответствующей максимальной плотности спектрального излучения АЧТ на его абсолютную температуру является величиной постоянной

$$\lambda_{\max} \cdot T = C_3$$

где

C_3 – 3-я константа Планка,

$$C_3 = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

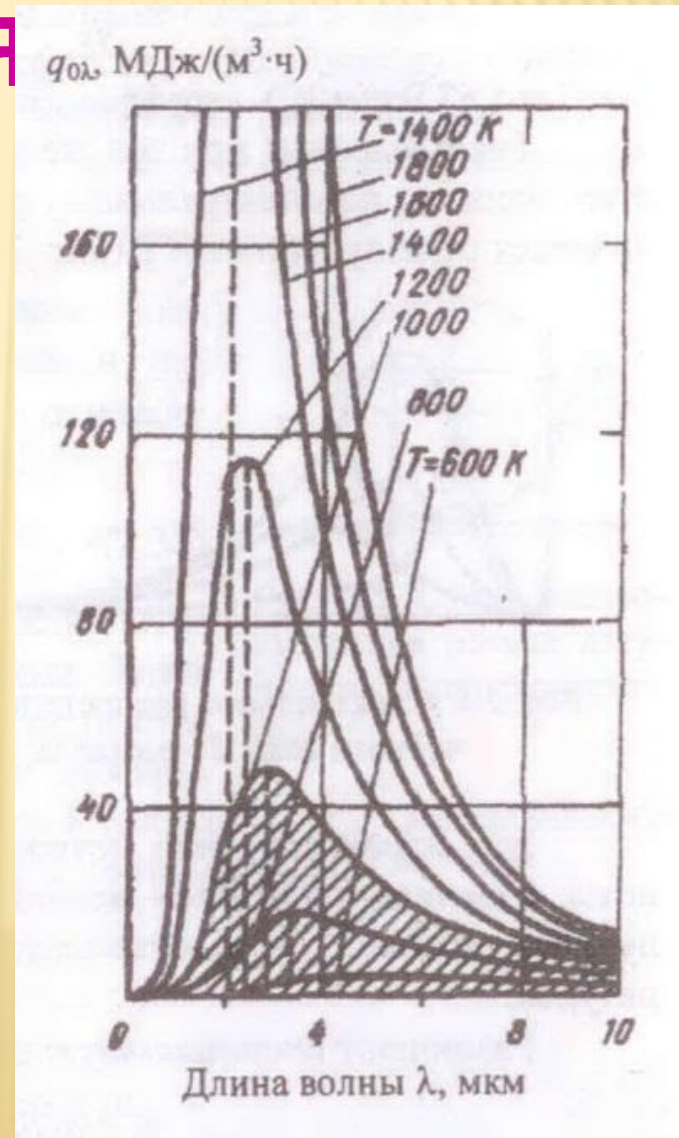
T – абсолютная температура АЧТ, [К]

Устанавливает связь между длиной волны, соответствующей максимуму спектральной плотности излучения АЧТ и температурой.

ОСОБЕННОСТИ ЗАКОНА СМЕЩЕНИЯ

С ростом температуры
 $\lambda_{\max}$ смещается в
сторону коротких длин
волн.

$$\lambda_{\max} \cdot T = C_3$$



3. Распределение плотности потока интегрального излучения по различным направлениям q_{α} дает **закон Ламберта**

Плотность потока излучения АЧТ в каком-либо направлении будет пропорционально плотности излучения в направлении **нормали** q_n и **косинусу угла** α между нормалью и этим направлением

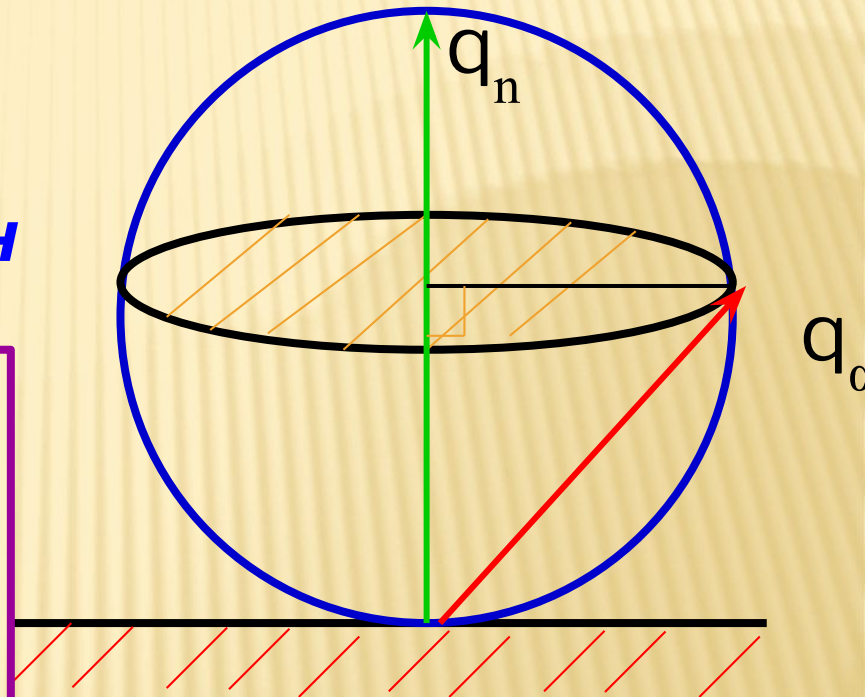


Схема
распространения
потока излучаемого в
пространство

$$q_{\alpha} = q_n \cdot \cos \alpha$$

ОСОБЕННОСТИ ЗАКОНА ЛАМБЕРТА

Плотность потока излучения в направлении нормали связана с *плотностью потока полусферического излучения* q_0 , определяемого законом Стефана-Больцмана

$$q_n = \frac{q_0}{\pi} \quad \Rightarrow \quad q_\alpha = \frac{q_0 \cdot \cos \alpha}{\pi}$$

где

q_0 – плотность потока излучения в направлении нормали, определяется по закону Стефана – Больцмана;

α – угол между нормалью и данным направлением потока

4. Собственный полусферический интегральный поток, излучаемый АЧТ, выражается **законом Стефана – Больцмана**

$$q_0 = \sigma_0 \cdot T^4 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

где

σ_0 – постоянная Больцмана, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

T – абсолютная температура АЧТ, [K];

C_0 – коэффициент излучения АЧТ, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$

4. Собственный полусферический интегральный поток для реального тела, рассчитанные на основе **закона Стефана – Больцмана** равен

где

$$q_0 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

ε – степень черноты тела

Для характеристики нечерных тел введено понятие **степени черноты** – величина, показывающая во сколько раз излучение реального тела меньше излучения АЧТ при одинаковых температурах.

Рассмотрим расчет потока излучением в системе серых тел

❶ Если система состоит из двух серых тел, между которыми происходит переизлучение, то при наличии разницы температур между телами результирующий поток Q определяется через *приведенную степень черноты $\varepsilon_{\text{пр}}$, учитывающую*

- ✓ степени черноты поверхностей ε_1 и ε_2 ,
- ✓ их форму и размеры,
- ✓ взаимное расположение

Рассмотрим расчет потока излучением в системе серых тел

$$Q = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F$$

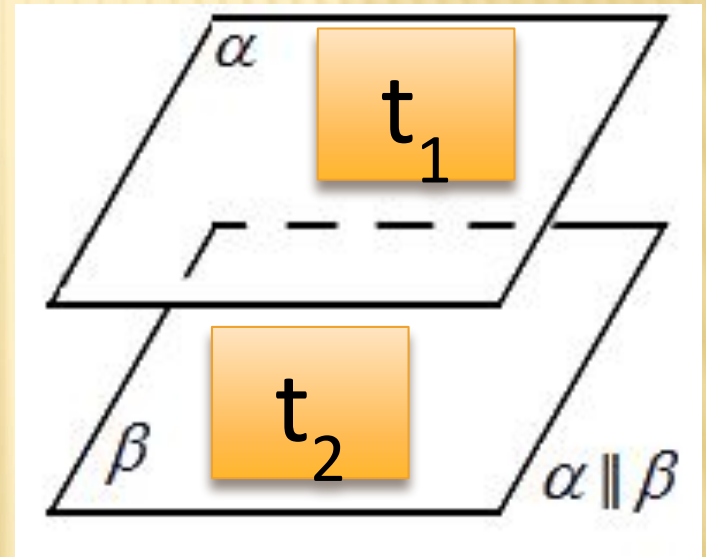
$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты;

F – теплоотдающая поверхность, [м²]

Рассмотрим расчет потока излучением в системе серых тел

1 УСЛОВИЕ

- поверхности плоские и параллельно расположенные



$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

Рассмотрим расчет потока излучением в системе серых

2 УСЛОВИЕ тел

первая поверхность находится внутри второй



- ✓ коаксиальные цилиндры,
- ✓ сфера в сфере,
- ✓ поверхность расплава
- ✓ поверхность нагреваемого материала и внутренняя поверхность футеровки печи

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{F_1}{F_2} \right) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]}$$

Рассмотрим расчет потока излучением в системе серых тел

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

тел

Индекс «1»

относится к
меньшей
поверхности

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{F_1}{F_2} \right) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]}$$



$F = F_1$, т. е. расчет
ведут по меньшей
площади
поверхности.

$$Q = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F$$

Рассмотрим расчет потока излучением в системе серых тел

② Если лучистый поток уходит с поверхности F в пространство, заполненное средой с температурой t_2 , отличной от температуры поверхности t_1 , и при этом среда сама не излучает и не отражает этот поток обратно на поверхность, то излучаемый поток

$$Q = \varepsilon_{\Pi} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F$$

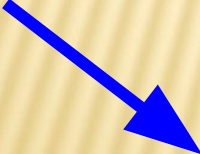
В этом случае, поскольку переизлучения не происходит, вместо приведенной степени черноты в расчет берется **степень черноты поверхности ε**

Рассмотрим расчет потока излучением в системе серых тел

③ В расчетах при определении результирующего потока Q пользуются выражением

$$Q = \alpha_{\text{и}} \cdot (t_1 - t_2) \cdot F$$

ВМЕСТО


$$Q = \epsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F$$

$\alpha_{\text{и}}$ –

коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К):

Рассмотрим расчет потока излучением в системе серых тел

Коэффициент теплоотдачи излучением определяем, как

1. приравниваем обе части уравнений

$$Q = \alpha_{\text{и}} \cdot (t_1 - t_2) \cdot F \quad Q = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F$$

2. получаем

$$\alpha_{\text{и}} \cdot (t_1 - t_2) \cdot F = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F$$

Рассмотрим расчет потока излучением в системе серых тел

Коэффициент теплоотдачи излучением определяем, как

3. выражаем α_u

$$\alpha_u = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F}{(t_1 - t_2) \cdot F}$$

4. площади сокращаем

$$\alpha_u = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{(t_1 - t_2)}$$

Рассмотрим расчет потока излучением в системе серых тел

5. Если температура печи (излучающего газа) T_p постоянна, а поверхность нагреваемого металла меняет температуру от начальной T_n до конечной T_k , то средний за период нагрева коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле

$$\bar{\alpha}_и = \frac{\varepsilon_{пр} \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{(T_{II}^4 - T_K^4) \cdot (T_{II}^4 - T_H^4)}}{\sqrt{(T_{II} - T_K) \cdot (T_{II} - T_H)}}$$

σ_0 – постоянная Больцмана,

$$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4);$$

1. Расчет потерь тепла при наличии экранов и через отверстия в печах.
2. Теплообмен при наличии излучающих газов.
3. Суммарный тепловой поток.
4. Перенос теплоты теплопроводностью.
5. Тепло – и массоперенос в технологических процессах.