

## Часть 2

# Основы теории теплообмена

### Занятие 10

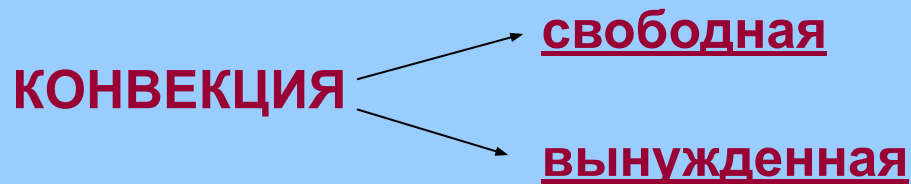
Конвективный теплообмен. Уравнение Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи. Основы теории подобия. Критериальные уравнения теплообмена. Теплоотдача при естественной конвекции. Теплоотдача при вынужденном движении теплоносителя.

# Конвективный теплообмен

## конвекция, теплоотдача

- процесс теплообмена, осуществляемый между твердой поверхностью и омывающим ее текучим.

Происходит в газах и жидкостях



# Конвективный теплообмен

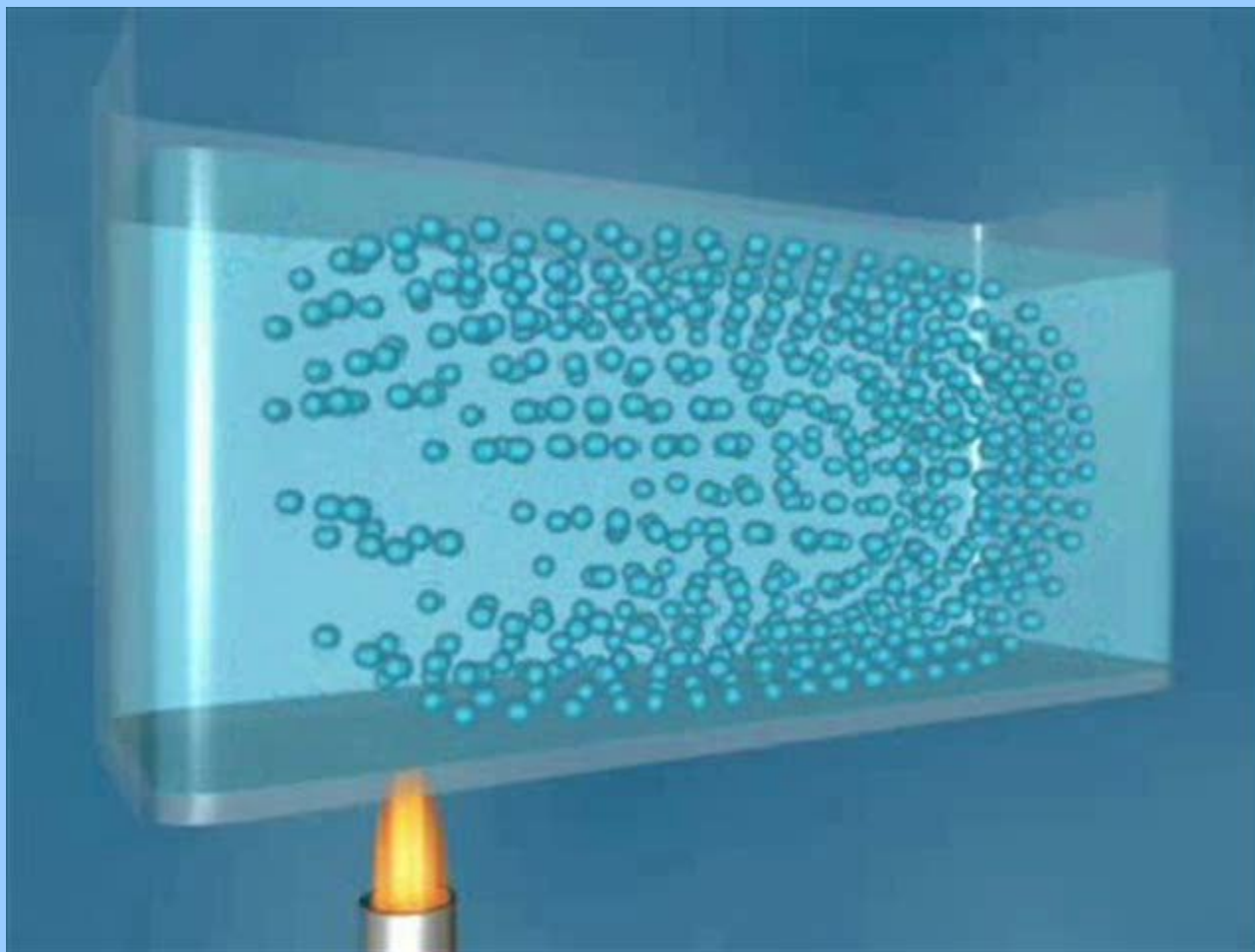
Перемешивание



Фильм101

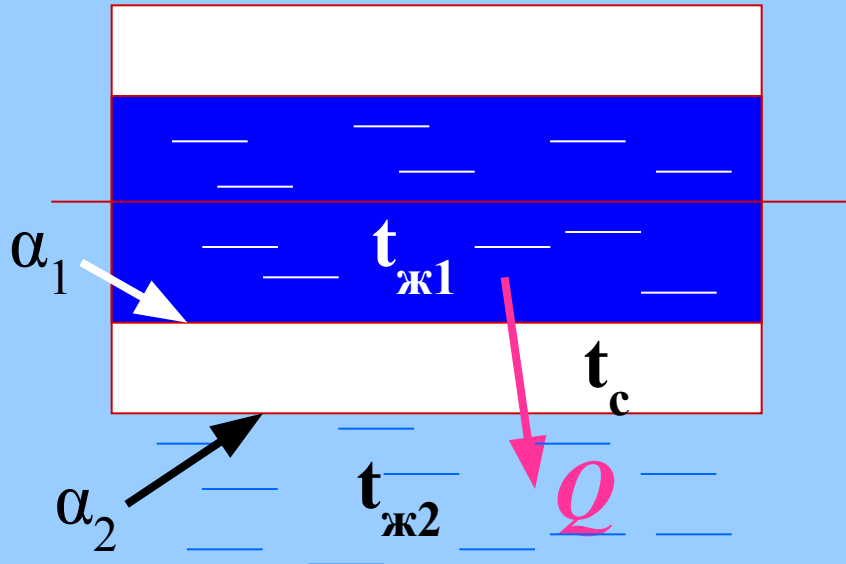
# Конвективный теплообмен

конвекция



Фильм 083

Изучается на основе закона  
Ньютона-Рихмана:



$$Q = \alpha F |t_c - t_{ж}| \quad \text{Вт}$$

$$q = \alpha |t_c - t_{ж}| \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$Q = \alpha_1 F |t_{ж1} - t_c|$$

$$Q = \alpha_2 F |t_c - t_{ж2}|$$

$\alpha$ - коэффициент  
теплоотдачи  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$

$\alpha$ - коэффициент  
теплоотдачи

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha} \quad \text{- термическое  
сопротивление  
теплоотдачи}$$

Коэффициент теплоотдачи зависит:

- от термодинамического состояния и физических свойств среды, омывающей поверхность
- от скорости и режима движения жидкости
- от формы и размеров поверхности

Определяется – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО!!!

Для распространения результатов эксперимента на другие явления используется ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ

**Теория подобия состоит из трех теорем:**

**1. У подобных явлений значения одноименных критериев подобия одинаковы**

**Для тепловых явлений используют следующие критерии подобия:**

# Критерии подобия:

Критерий теплоотдачи  
(Нуссельта)

$$Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda_f}$$

Критерий  
динамического  
подобия (Рейнольдса)

$$Re = \frac{wl_0}{\nu}$$

Критерий  
Грасгофа

$$Gr = \frac{gl_0\beta\Delta t}{\nu^2}$$

Критерий  
Прандтля

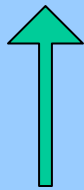
$$Pr = \frac{\nu}{a}$$



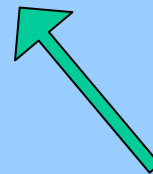
## Вторая теорема:

2. Математическое описание изучаемого явления должно быть представлено в виде критериального уравнения.

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Gr}, \text{Pr})$$



Определяемый  
критерий



Определяющие  
критерии

## Третья теорема:

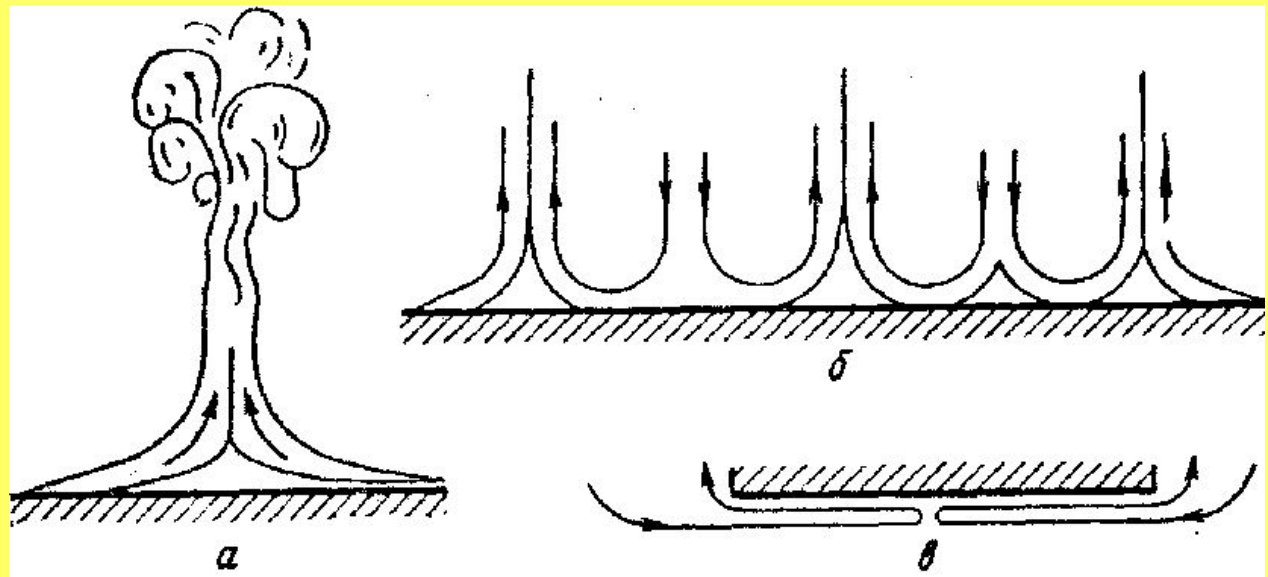
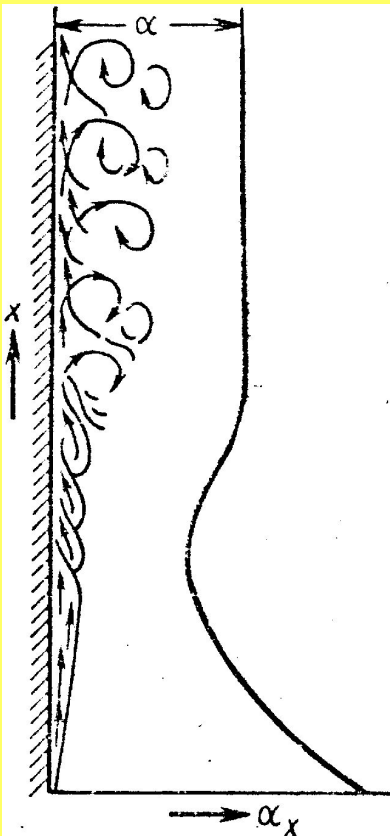
**3. Подобными следует считать такие явления для которых математическое описание совпадает и одноименные определяющие критерии подобия численно равны.**

**Выделяются группы явлений на которые распространяются результаты опытов**

# Теплоотдача при свободном ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ

Осуществляется за счет разности температур, вызывающих изменение плотности текучего.

## 1. В неограниченном пространстве



# Теплоотдача при свободном движении жидкости

1. В неограниченном пространстве  
описывается критериальным уравнением:

$$Nu_{\text{ж}} = B(\text{Pr}_{\text{ж}} \cdot \text{Gr}_{\text{ж}})^n \left( \frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{с}}} \right)^{0,25}$$

## Вертикальная поверхность

$\text{Pr} \cdot \text{Gr}$	$B$	$n$
$10^3—10^9$	0,76	$\frac{1}{4}$
$5 \cdot 10^2—2 \cdot 10^7$	0,15	$\frac{1}{3}$

## Горизонтальная поверхность

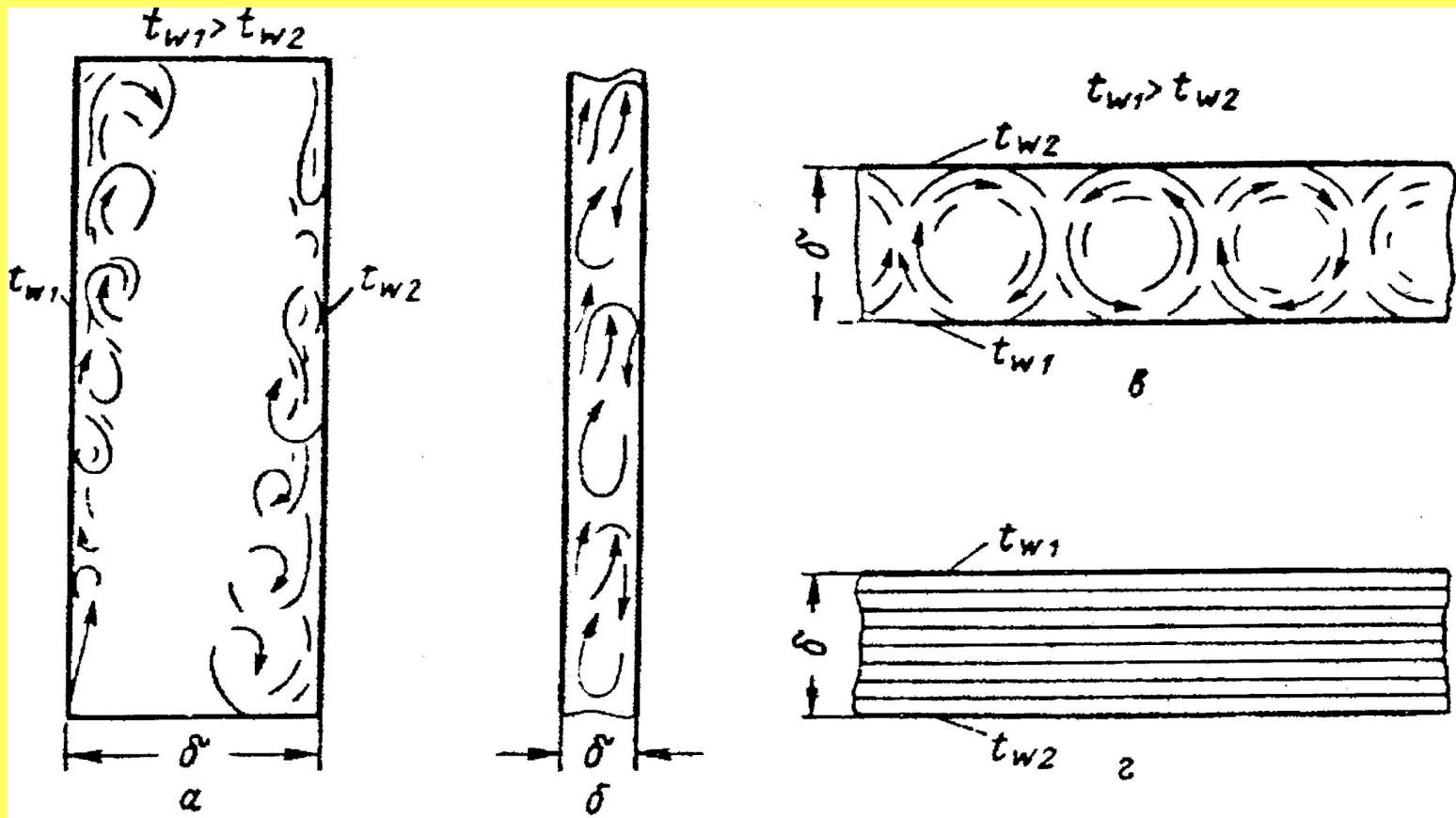
$\text{Pr} \cdot \text{Gr}$	$B$	$n$
$10^3—10^8$	0,5	$\frac{1}{4}$

Для плит, обращенных вверх  $B=0,3$   
Для плит, обращенных вниз  $B/0,3$

# Теплоотдача при свободном ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ

## 1. В ограниченном пространстве

Узкие глухие каналы, оконные рамы и т.п.



# Теплоотдача при свободном движении жидкости

1. В ограниченном пространстве  
определяется как и для явления теплопроводности

$$q = \frac{(t_{c1} - t_{c2})\lambda_{\text{Э}}}{\delta}$$

$$\lambda_{\text{Э}} = \varepsilon\lambda_{\text{Ж}}$$

$\varepsilon$  - поправка на конвекцию

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

# Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

Режим течения определяется числом  $Re$

$Re < 2000$  – ламинарное  
 $2000 < Re < 10000$  – переходное  
 $Re \gg 10^4$  - турбулентное

1. Течение жидкости в трубах  
уравнение для ламинарного течения

$$Nu_{ж} = 0,15 Re_{ж}^{0,33} Pr_{ж}^{0,43} Gr_{ж}^{0,1} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

# Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

Режим течения определяется числом  $Re$

$Re < 2000$  – ламинарное  
 $2000 < Re < 10000$  – переходное  
 $Re \gg 10^4$  - турбулентное

1. Течение жидкости в трубах  
уравнение для турбулентного течения

$$Nu_{ж} = 0,021 \cdot Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \cdot \varepsilon_R$$



# Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

$\varepsilon_l$  – зависит от длины трубы

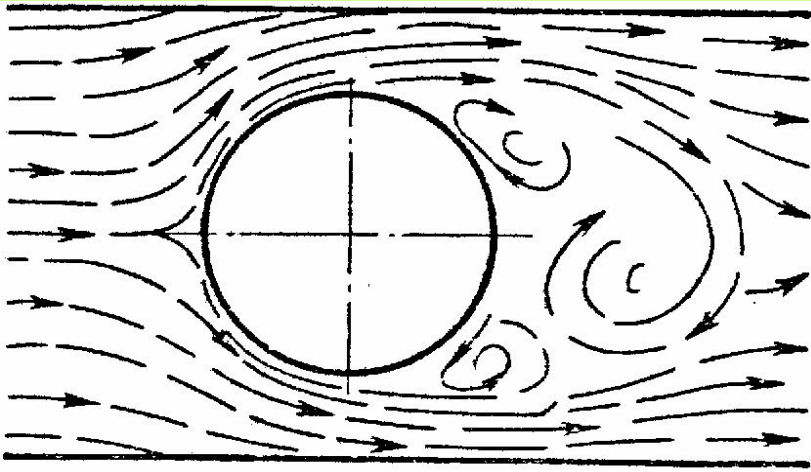
$l/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\varepsilon_l$	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1

$\varepsilon_R$  – зависит от радиуса закругления

$$\varepsilon_R = 1 + 1,77 \frac{d}{R_{\text{ИЗ}}}$$

# Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

## 1. Поперечное омывание труб

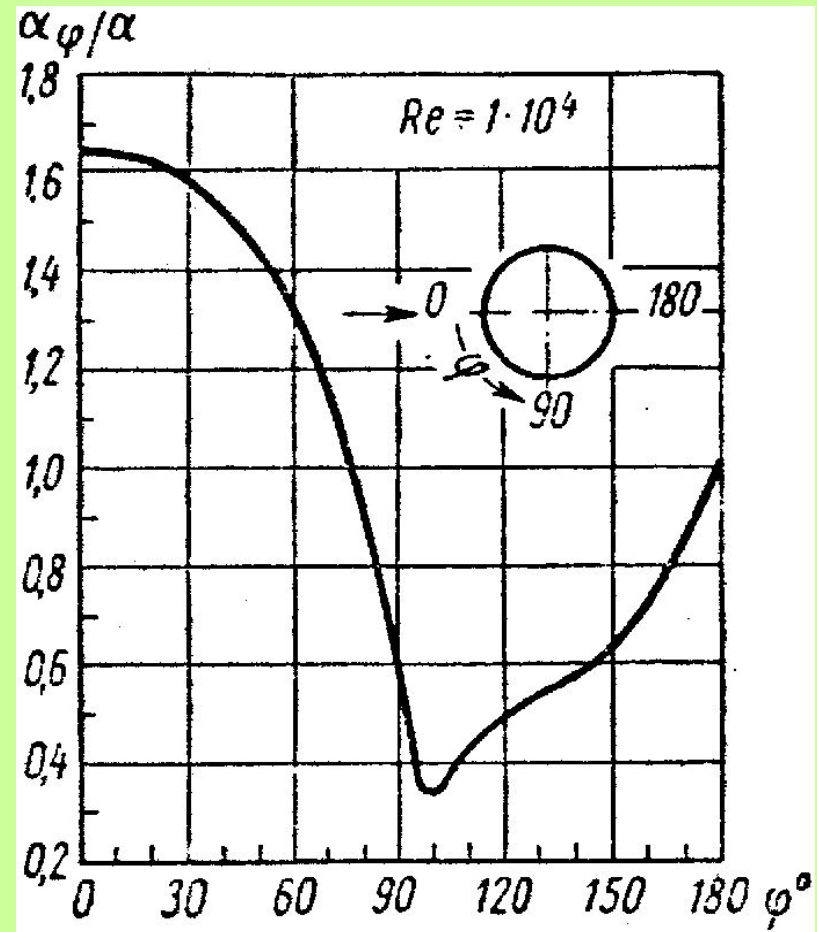


Среднее значение теплоотдачи:

$$Nu_{\text{ж}} = C \cdot Re_{\text{ж}}^n \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,38} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25}$$

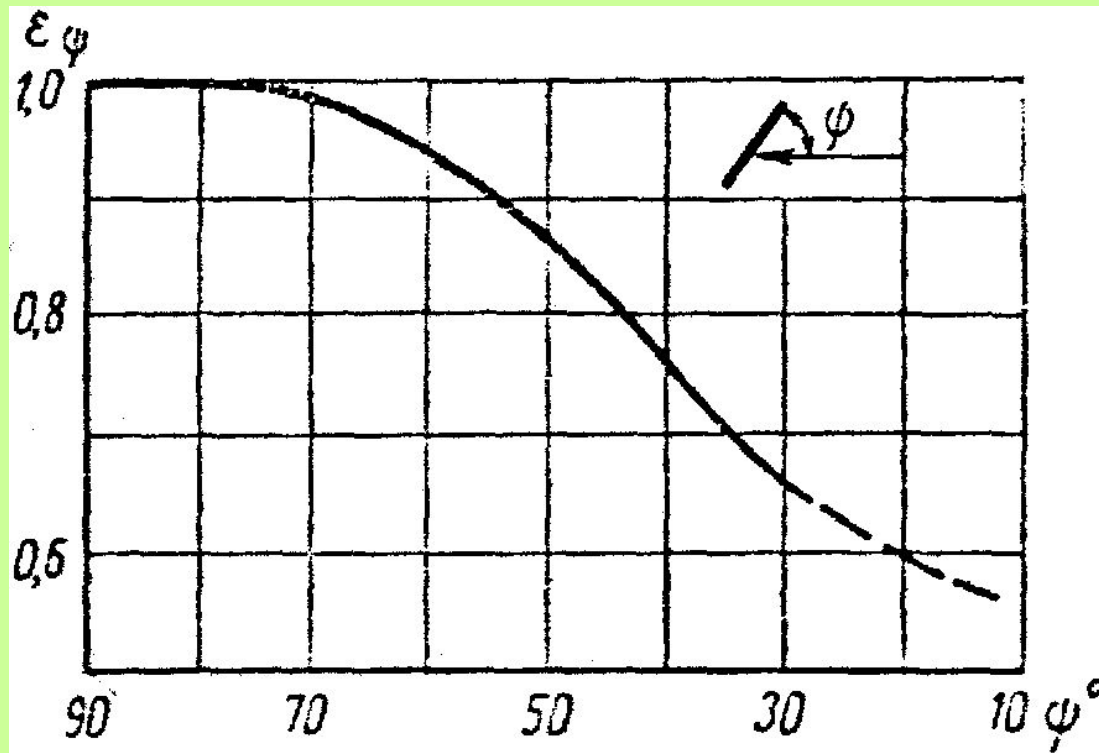
Re	C	n
$10^2 - 10^3$	0,59	0,47
$10^3 - 10^5 \cdot 2$	0,21	0,62

## Одиночная труба



# Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

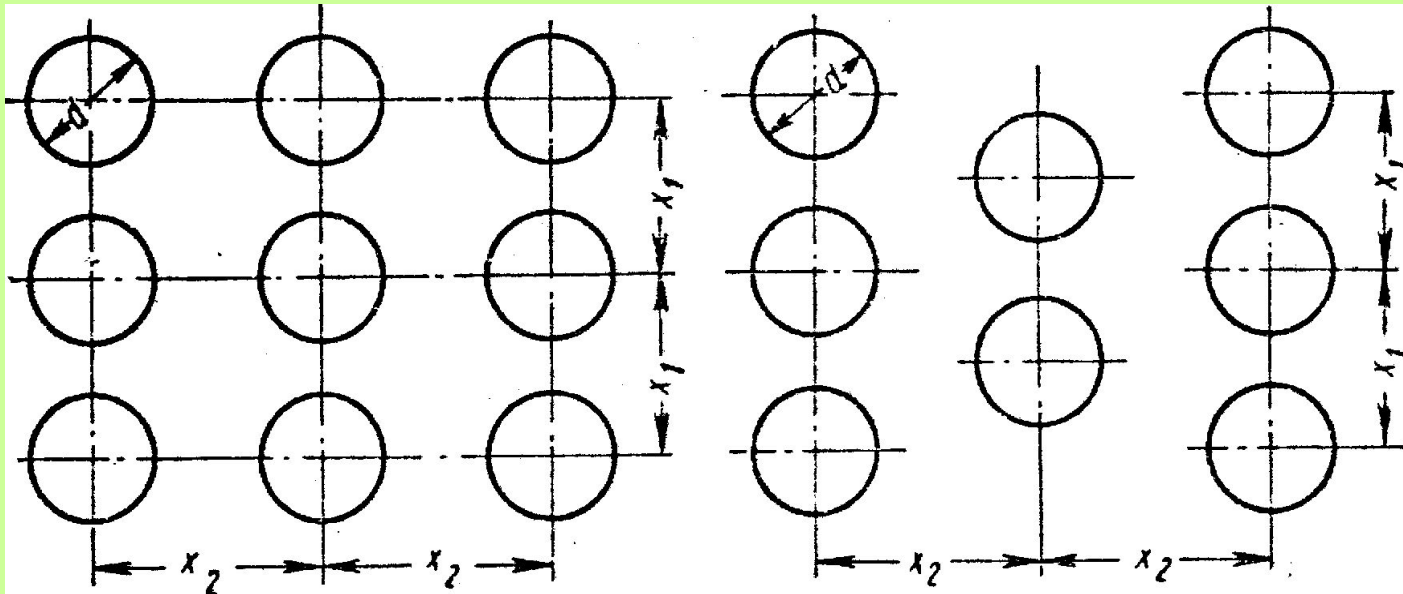
При изменении угла атаки вводится  
поправочный коэффициент  $\varepsilon_\phi$



# Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

## 1. Поперечное омывание труб

## Пучки труб



**Коридорное  
расположение**

**Шахматное  
расположение**

# Теплоотдача при вынужденном движении жидкости

Среднее значение теплоотдачи:

**Коридорное  
расположение**

$$Nu_{\text{ж}} = 0,23 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,65} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,33} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25}$$

**Шахматное  
расположение**

$$Nu_{\text{ж}} = 0,41 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,6} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,33} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25}$$

Для воздуха:

$$Nu_{\text{ж}} = 0,21 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,65}$$

$$Nu_{\text{ж}} = 0,37 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,6}$$