

# **ТЕПЛОМАССООБМЕН**

## **Теплообмен при омывании труб**

**2017 год**

**Лекция № 9**

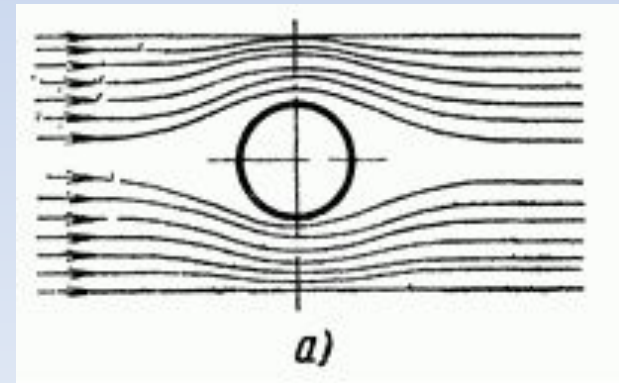
# План

- 1. Теплообмен при поперечном омывании одиночной трубы.
- 2. Теплообмен при поперечном омывании пучков труб.

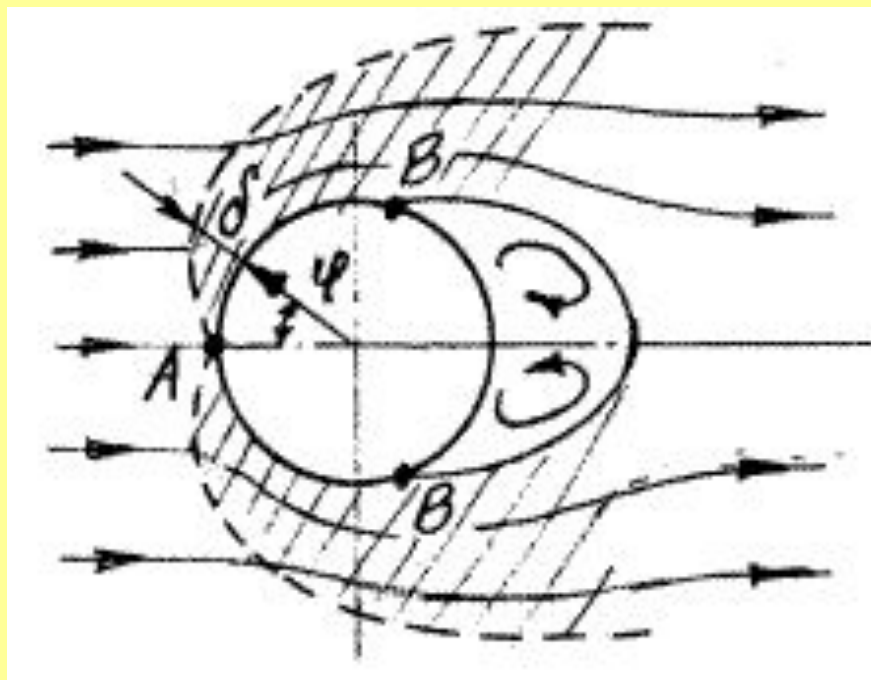
# 1. Теплообмен при поперечном омывании одиночной трубы

- Процесс теплоотдачи при поперечном потоке жидкости, омывающей одиночную круглую трубу, характеризуется рядом особенностей..

Плавное, безотрывное омывание поверхности круглой трубы наблюдается только при  $Re < 5$ .

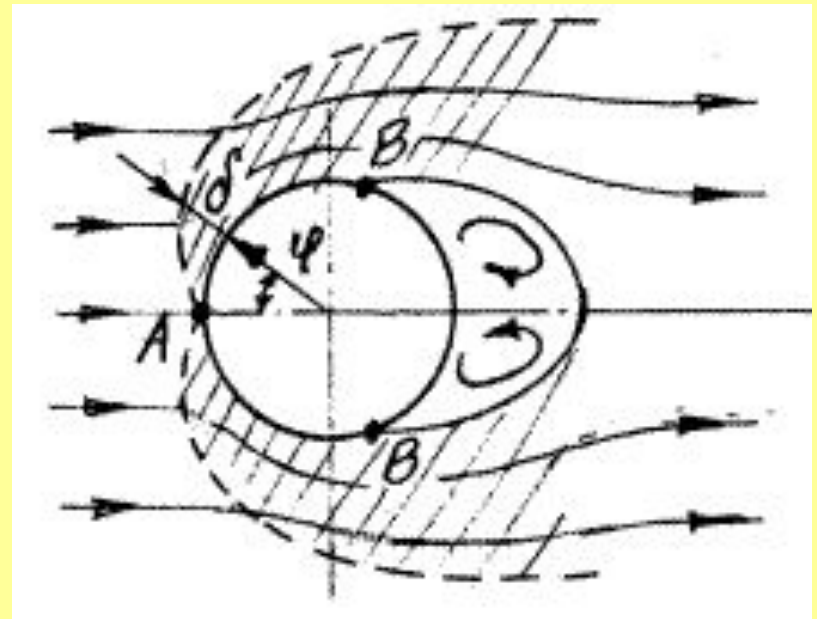
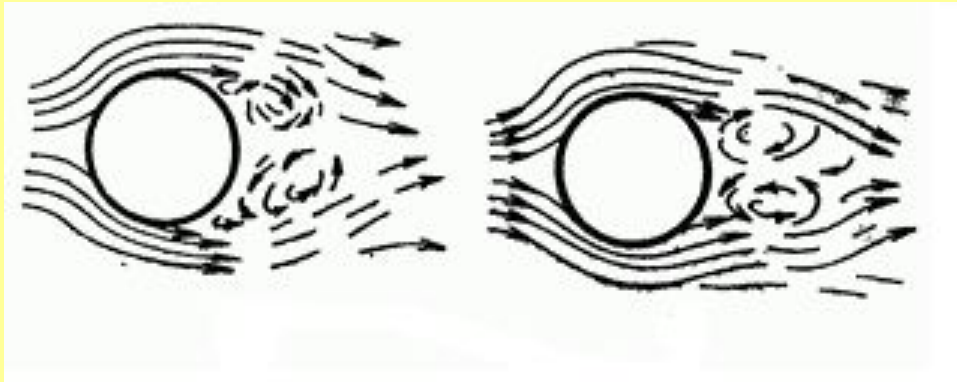


- При больших значениях числа  $Re$  условия омывания лобовой и кормовой половин трубы различны.

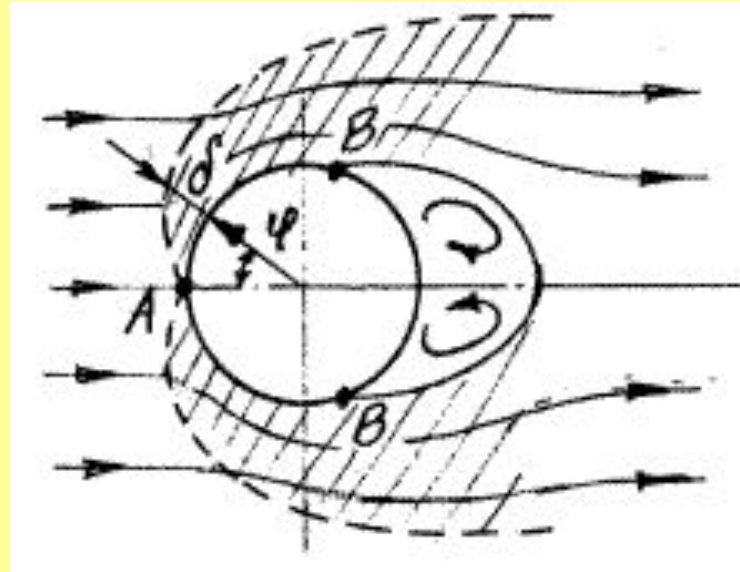


Ламинарный пограничный слой, образующийся в лобовой части трубы около вертикального диаметра, отрывается от ее поверхности и в кормовой части образуются два симметричных вихря.

- При углах  $\varphi = 80 \div 85^\circ$ , считая от лобовой точки, поверхность трубы омывается потоком жидкости безотрывно, вся остальная ее часть находится в вихревой зоне.
- Чем больше скорость потока, тем при больших углах  $\varphi$  происходит отрыв ламинарного пограничного слоя.

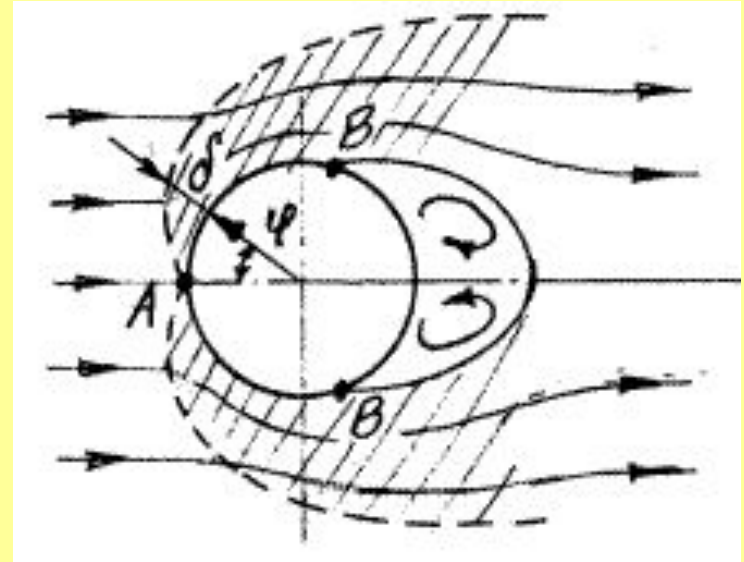


- При больших значениях числа  $Re$  ламинарный пограничный слой переходит в турбулентный, а отрыв слоя происходит при  $\varphi = 120 \div 130^\circ$ .



- Это смещение приводит к уменьшению вихревой зоны в кормовой части трубы и обтекание ее улучшается.

- *Турбулентный пограничный слой* появляется при числах  $Re = 1 \cdot 10^5 \div 4 \cdot 10^5$ .

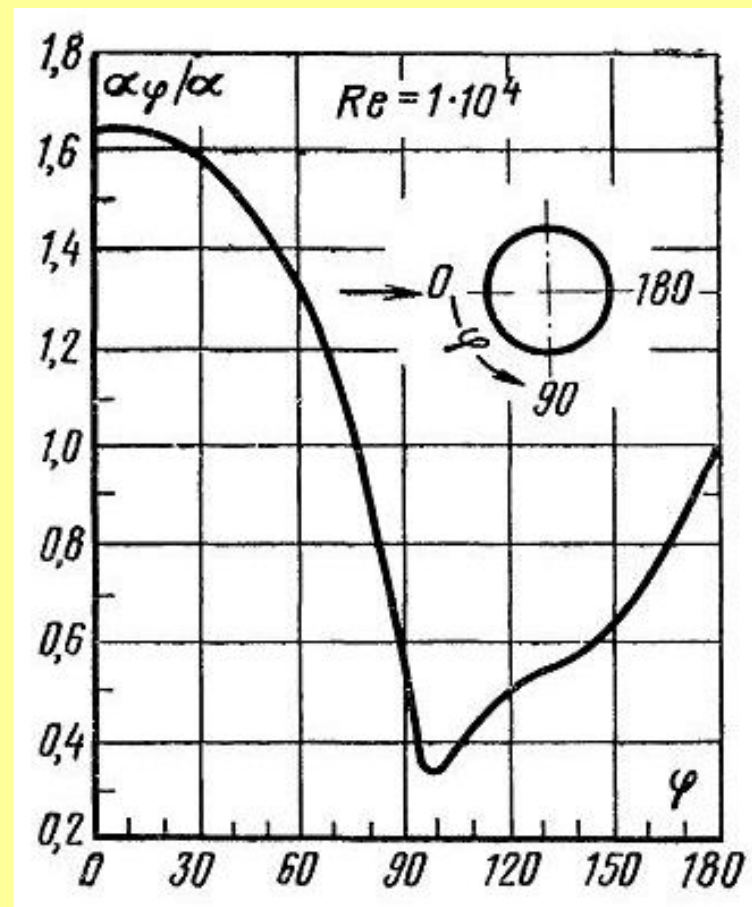


На появление турбулентного пограничного слоя большое влияние оказывает начальная турбулентность потока, чем она больше, тем при меньших значениях числа  $Re$  появляется турбулентный пограничный слой.

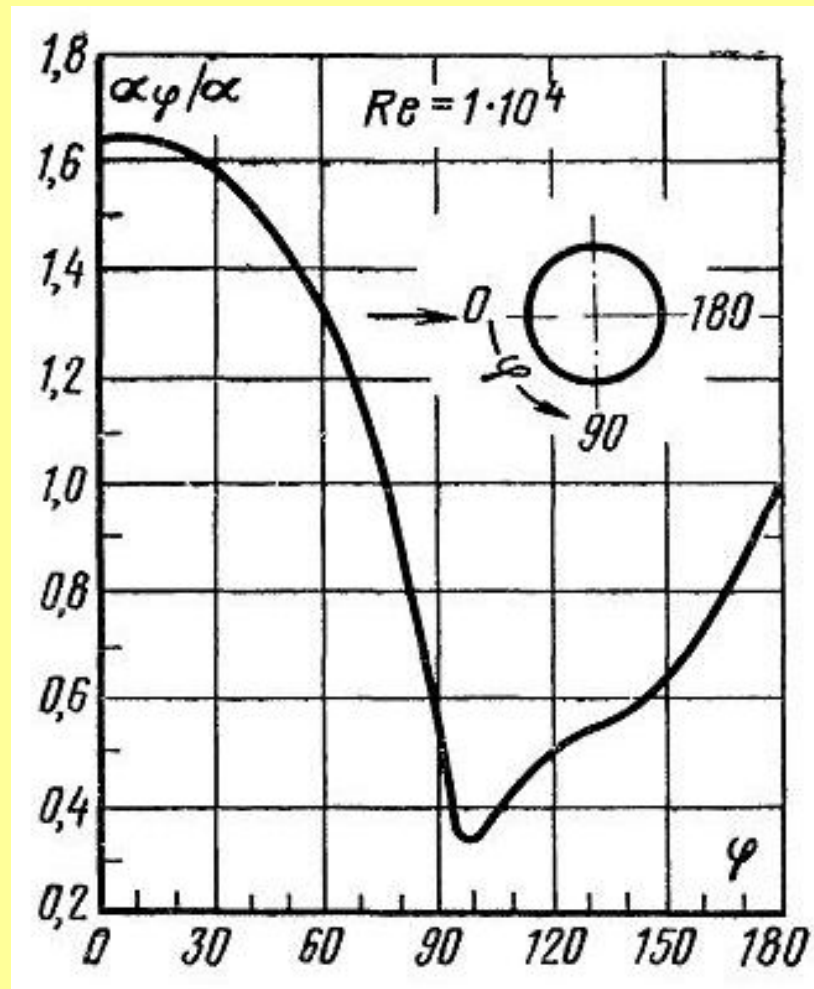
Такая картина движения жидкости при поперечном обтекании одиночной трубы в значительной мере отражается на коэффициенте теплоотдачи по окружности.

В лобовой части трубы ( $\varphi=0$ ) коэффициент теплоотдачи имеет наибольшее значение, т. к. пограничный слой имеет наименьшую толщину.

- По мере движения жидкости вдоль поверхности толщина пограничного слоя увеличивается и достигает максимального значения у экватора, что примерно соответствует месту отрыва пограничного слоя.







- Благодаря увеличению толщины пограничного слоя коэффициент теплоотдачи уменьшается и у экватора достигает наименьшего значения.

- За экватором кормовая часть цилиндра омывается жидкостью, имеющей сложный вихревой характер движения.
- При этом происходит разрушение пограничного слоя, толщина его уменьшается, коэффициент теплоотдачи увеличивается, достигая максимального значения при  $\varphi = 180^\circ$ , и может сравняться с теплоотдачей в лобовой части трубы.
- **Описанная картина движения жидкости справедлива для чисел  $Re = 5 \div 2 \cdot 10^5$ .**

**При больших значениях числа  $Re > 2 \cdot 10^5$  теплоотдача круговой трубы исследована недостаточно.**

- Из сказанного выше следует, что *теплоотдача по окружности одиночной трубы при поперечном обтекании тесно*:
  - Связана с характером омывания ее поверхности;
  - Зависит от скорости и направления потока жидкости;
  - От температуры и диаметра трубы;
  - От направления теплового потока;
  - От внешних тел, изменяющих степень турбулизации потока, и т.п.

***Все эти моменты указывают на трудность теоретического решения данной задачи.***

- В результате обобщения экспериментальных данных были получены следующие уравнения подобия, позволяющие определять средний коэффициент теплоотдачи по окружности одиночной трубы:

При  $Re_{\text{жд}} = 5 \div 1 \cdot 10^3$

$$\bar{Nu}_{\text{жд}} = 0,5 \cdot Re_{\text{жд}}^{0,5} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,38} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \cdot \quad (1)$$

Для воздуха

$$\bar{Nu}_{\text{жд}} = 0,43 \cdot Re_{\text{жд}}^{0,5} \cdot \quad (2)$$

- При  $Re_{жд} = 1 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5$

$$\overline{Nu}_{жд} = 0,25 \cdot Re_{жд}^{0,6} \cdot Pr_{ж}^{0,38} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad (3)$$

- Для воздуха

$$\overline{Nu}_{жд} = 0,216 \cdot Re_{жд}^{0,6} \quad (4)$$

- При вычислении чисел подобия по формулам (1), (2), (3) и (4):
- За определяющий размер принят внешний диаметр трубы.
- За определяющую температуру – средняя температура жидкости.
- Скорость отнесена к самому узкому сечению канала.

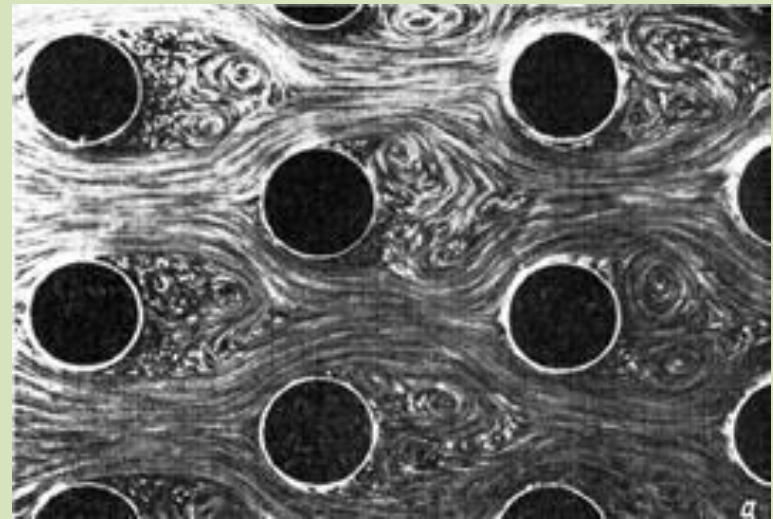
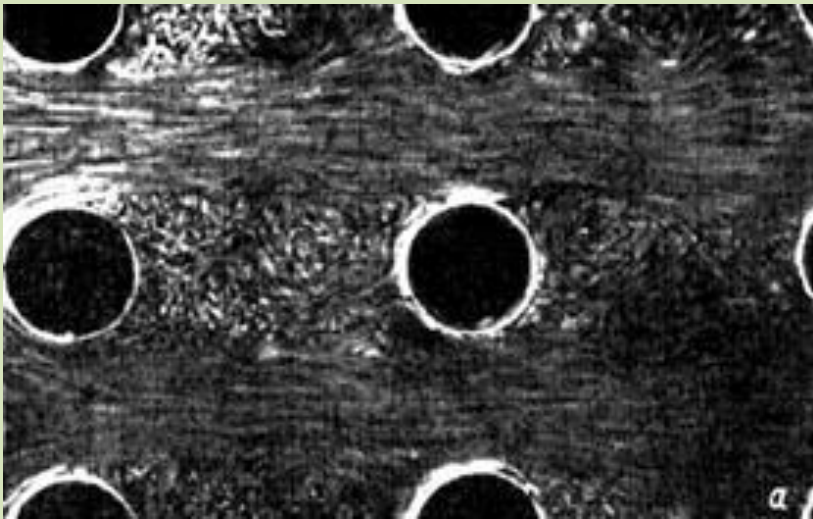
*Формулы (1), (2), (3) и (4) справедливы для цилиндра, который располагается перпендикулярно направлению потока.*

## 2. Теплообмен при поперечном омывании пучков труб

- Сложная гидродинамическая картина омывания одиночной трубы делается еще более сложной при омывании пучка круглых труб.

Теплообменные аппараты, собирающиеся из пучка круглых труб и омываемые поперечным потоком жидкости, имеют в технике большое распространение.

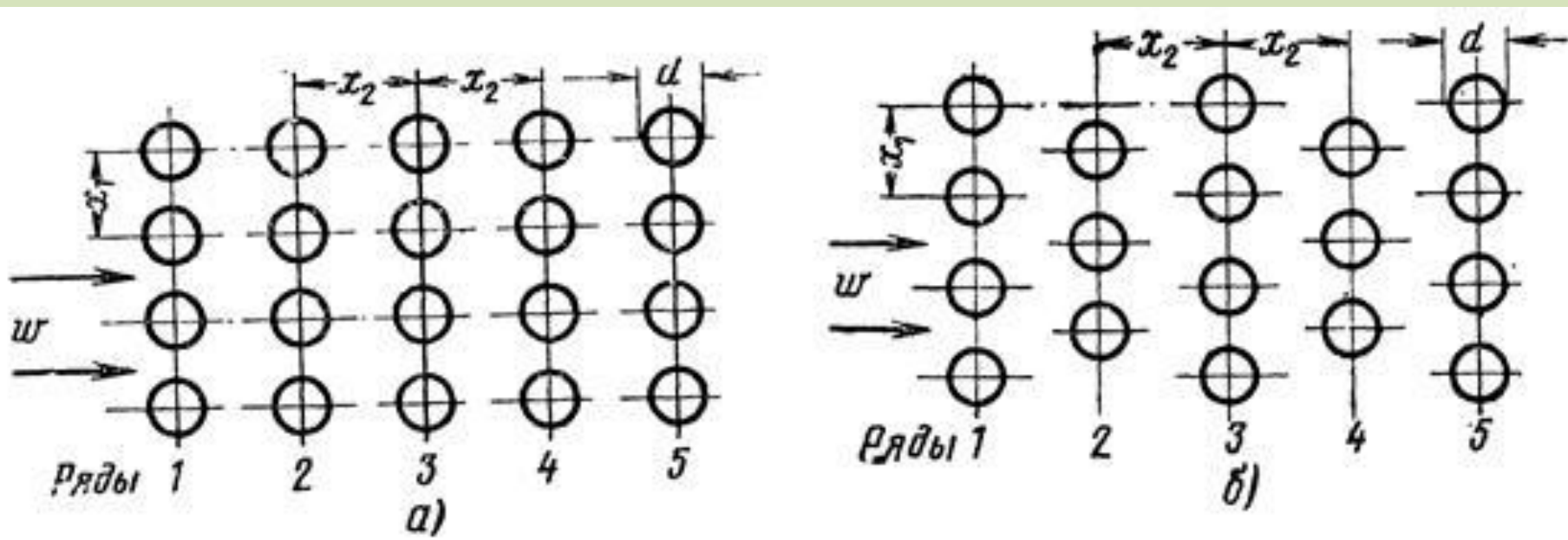
- Применяется в основном два вида расположения труб в пучках: **коридорный** и **шахматный**.
- **Характеристиками пучка труб считаются:**
  - Внешний диаметр труб;
  - Количество рядов труб по движению жидкости;





- **Характеристиками пучка труб считаются:**

- Отношение расстояния между осями труб по ширине пучка к внешнему диаметру труб  $x_1/d$  ;
- Отношение расстояния между осями двух соседних рядов труб по направлению движения жидкости к внешнему диаметру труб  $x_2/d$  .



*От расположения труб в значительной степени зависит характер движения жидкости, омывание труб каждого ряда и в целом теплообмен в пучке.*

- Если в канале было турбулентное движение жидкости, то оно будет турбулентным и в пучке труб, причем степень турбулизации будет возрастать от ряда к ряду, так как пучок труб является очень хорошим турбулирующим устройством.

- Если в канале перед пучком режим течения был ламинарным, то в зависимости от числа  $Re$  в пучке труб может быть как ламинарное, так и турбулентное течение жидкости.
- При малых значениях числа  $Re < 1 \cdot 10^3$ , ламинарный режим течения может сохраняться и в пучке труб.
- **В теплообменных аппаратах, как правило, встречается турбулентное течение жидкости.**

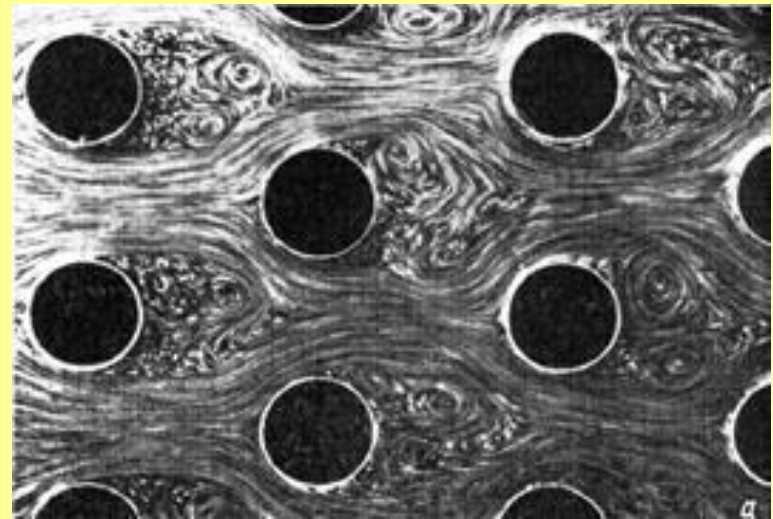
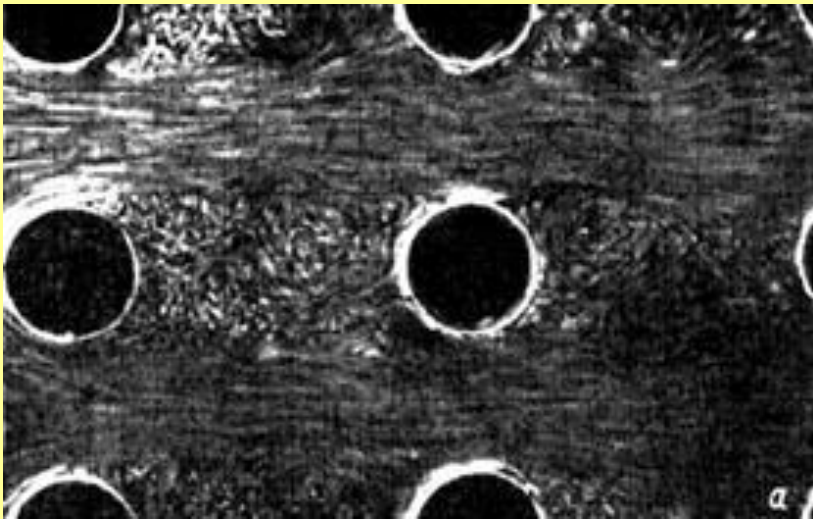
## При турбулентном течении теплообмен в пучках определяется различными законами.

- Изменение законов теплоотдачи связано с появлением на трубах пучка турбулентного пограничного слоя, который может появиться при  $Re \approx 1 \cdot 10^5$ .
- При  $Re = 1 \cdot 10^5$  лобовая часть трубы омывается ламинарным пограничным слоем, а кормовая находится в вихревой зоне, при этом в межтрубном пространстве движение жидкости будет турбулентным. Такой режим называется *смешанным* режимом движения жидкости.
- **Наиболее изученным является смешанный режим, которому соответствуют значения числа  $Re = 1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^5$ .**

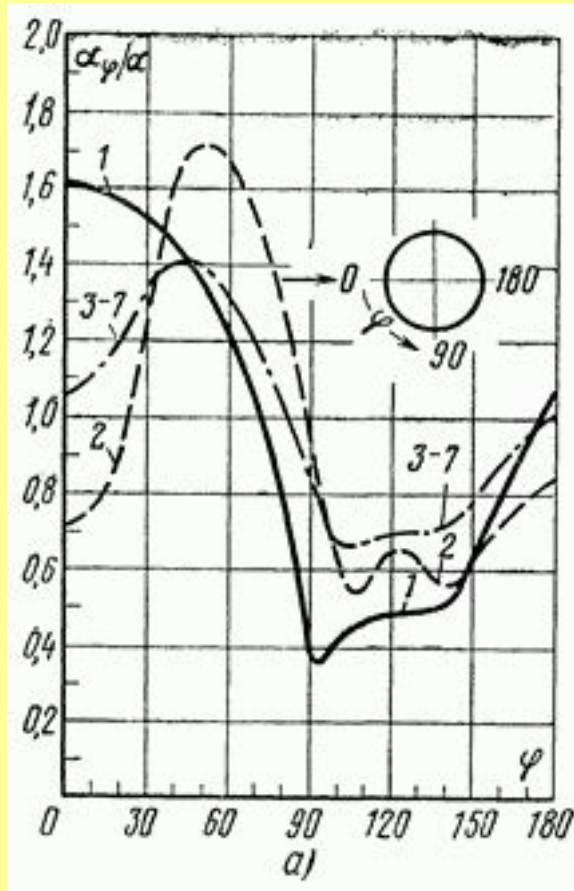
## Рассмотрим особенности данного режима.

- Омывание трубок первого ряда в пучке практически не отличается от омывания одиночной трубы и зависит только от начальной турбулентности потока.
- Характер омывания следующих рядов труб в обоих пучках (коридорный, шахматный) изменяется.
- При коридорном расположении трубы любого ряда затеняются соответствующими трубами предыдущего ряда, что ухудшает омывание лобовой части, и большая часть поверхности трубы находится в слабой вихревой зоне.

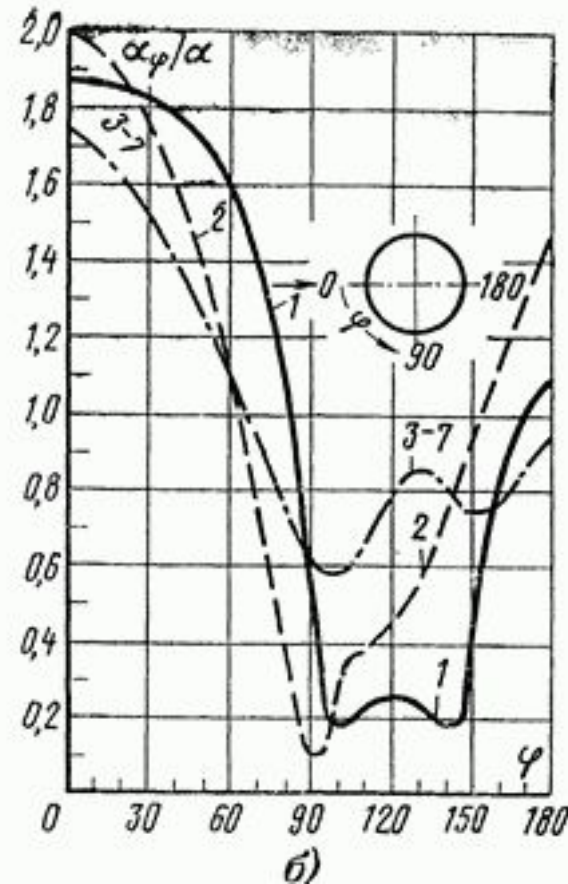
- При шахматном расположении труб загоразивание одних труб другими не происходит.
- Вследствие этого коэффициент теплоотдачи при шахматном расположении труб в одинаковых условиях выше, чем при коридорном.



## коридорное



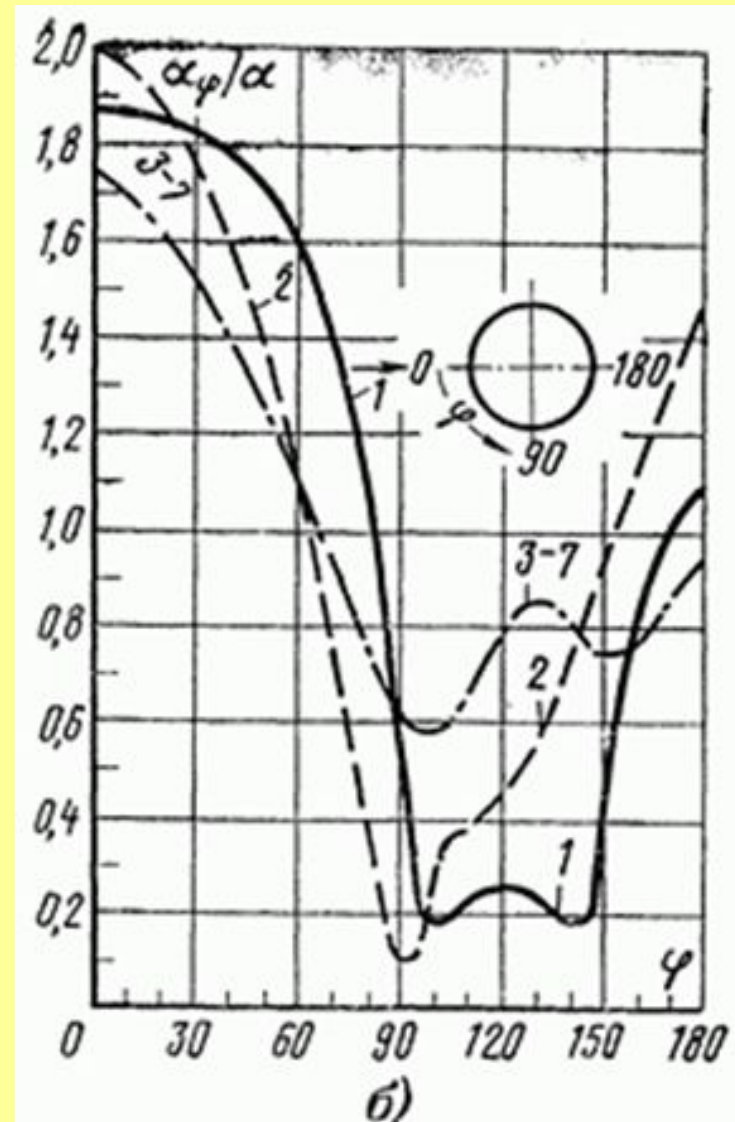
## шахматное



Изменение локального коэффициента теплоотдачи по окружности трубы в зависимости от угла  $\varphi$  для первого и последующих рядов семирядного и шахматного расположения пучков.

□ Из представленных кривых следует, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha_\varphi$  для любого ряда шахматного расположения труб в лобовой части (при  $\varphi = 0$ ) получает максимальное значение и изменение его мало отличается от изменения коэффициента теплоотдачи для одиночной трубы.

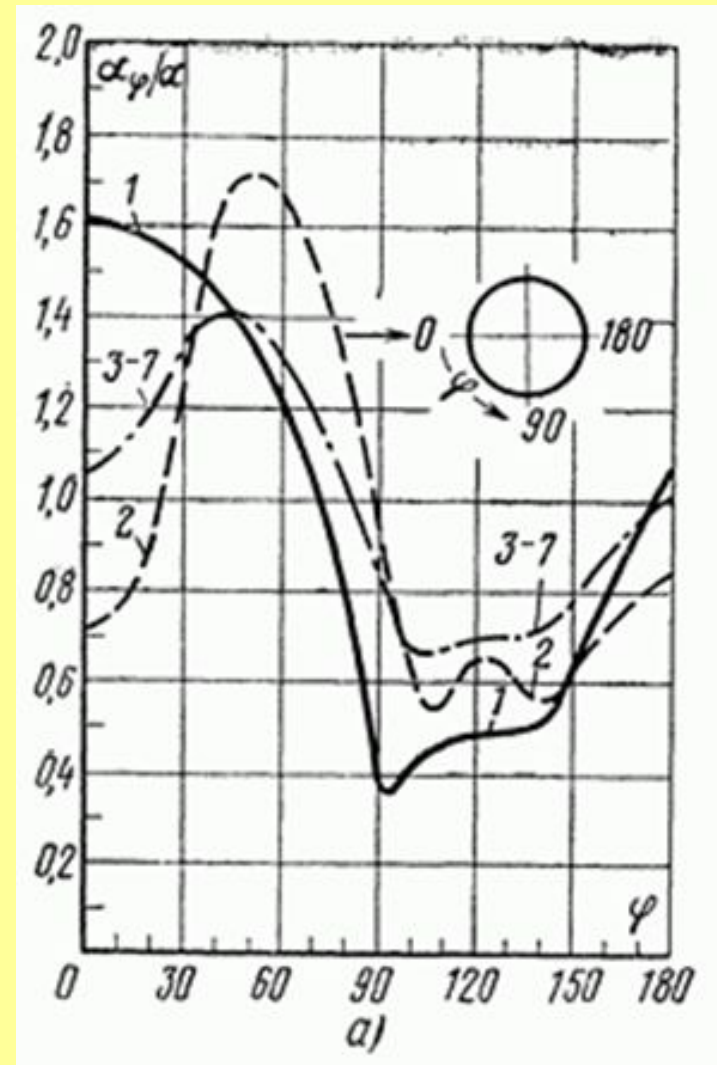
## шахматное





## коридорное

- Такое же изменение коэффициента теплоотдачи имеет место и для первого ряда коридорного расположения пучка.
- Для трубок второго и следующих рядов коридорного расположения получается два максимума теплоотдачи  $\alpha_\varphi$  при углах  $50 - 60^\circ$  к направлению потока.
- Из этого следует, что теплоотдача как в лобовой, так и в кормовой части труб меньше по сравнению с теплоотдачей одиночной трубы.



□ При любом расположении труб *каждый ряд вызывает дополнительную турбулизацию.*

□ Поэтому коэффициент теплоотдачи для труб второго ряда выше, чем для первого, а для третьего выше, чем для второго.

□ Начиная с третьего ряда поток жидкости стабилизируется и коэффициент теплоотдачи для всех последующих рядов остается постоянным.

- Если теплоотдачу третьего ряда принять за 100%, то теплоотдача первого ряда коридорных и шахматных пучков составляет лишь 60%.
- Теплоотдача второго ряда коридорного пучка составляет – 90%, а шахматного – 70%.
- В целом *теплоотдача в шахматных пучках за счет лучшей турбулизации потока выше, чем в коридорных.*
- В целом теплоотдача в пучках зависит от расстояния между трубами.

- Зависимость от расстояния между трубами учитывается поправочным коэффициентом  $\epsilon_s$ , который представляет собой влияние относительных шагов.

Для глубинных рядов коридорного расположения пучка

$$\epsilon_s = \left( \frac{s_2}{d} \right)^{-0,15}$$

Для шахматного: при

$$\frac{s_1}{s_2} < 2$$

$$\epsilon_s = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^{0,166}$$

при

$$\frac{s_1}{s_2} \geq 2$$

$$\epsilon_s = 1,12.$$

- При расчете теплообменных аппаратов и определения среднего коэффициента теплоотдачи третьего ряда пучка труб при смешанном режиме ( $Re_{жд} = 1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^5$ ) применяются следующие уравнения:

При коридорном расположении труб

$$\bar{Nu}_{жд} = 0,26 \cdot Re_{жд}^{0,65} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot \epsilon_s \quad (1)$$

При шахматном расположении труб

$$\bar{Nu}_{жд} = 0,41 \cdot Re_{жд}^{0,6} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot \epsilon_s \quad (2)$$

- Для воздуха расчетные формулы упрощаются и принимают вид:

При коридорном расположении труб

$$\bar{Nu}_{жд} = 0,194 \cdot Re_{жд}^{0,65} \quad (3)$$

При шахматном расположении труб

$$\bar{Nu}_{жд} = 0,35 \cdot Re_{жд}^{0,6} \quad (4)$$

- При вычислении чисел подобия:
    - За определяющую температуру – средняя температура жидкости.
    - За определяющую скорость – скорость жидкости в самом узком сечении ряда.
    - За определяющий размер принят внешний диаметр трубы.
- Формулы справедливы для любых капельных жидкостей и газов.