

ТЕПЛОМАССООБМЕН

Теплообмен при омывании труб

2017 год

Лекция № 9

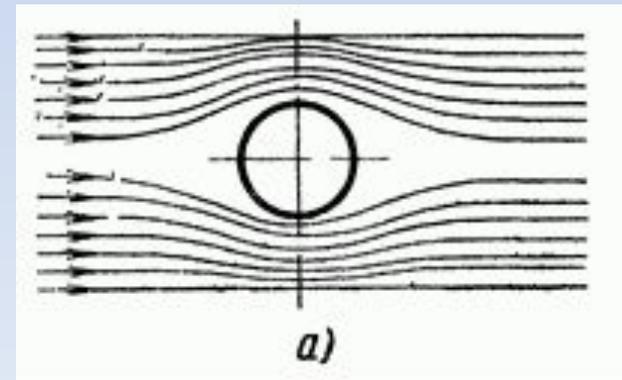
План

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

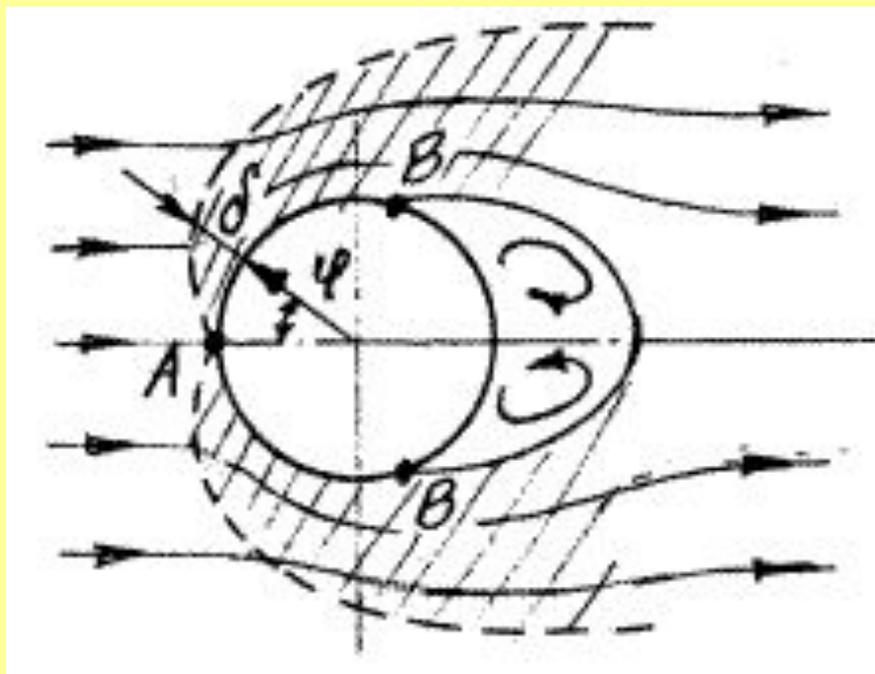
1. Теплообмен при поперечном омывании одиночной трубы

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

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

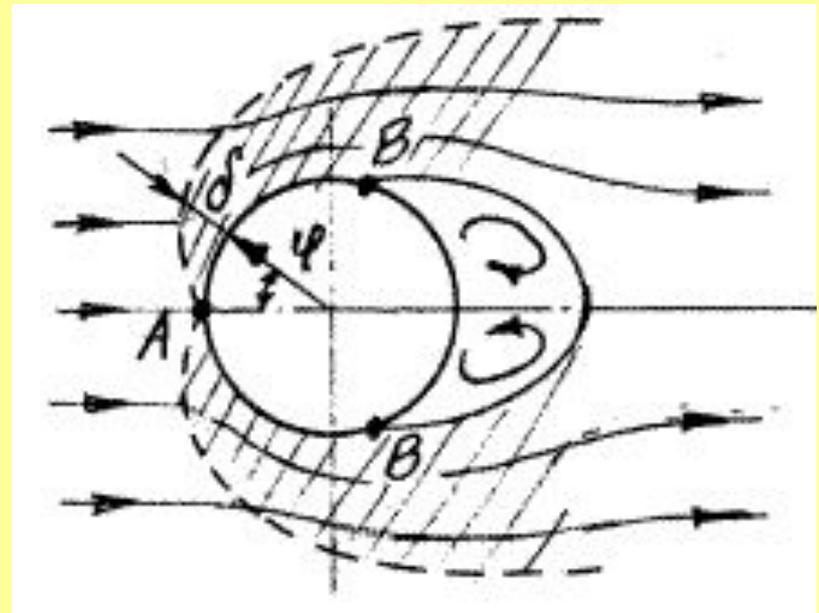
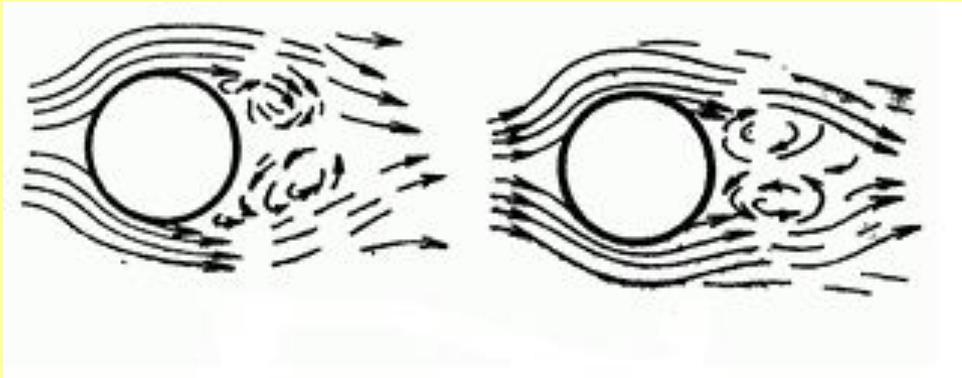


- При больших значениях числа Re условия омывания лобовой и кормовой половин трубы различны.

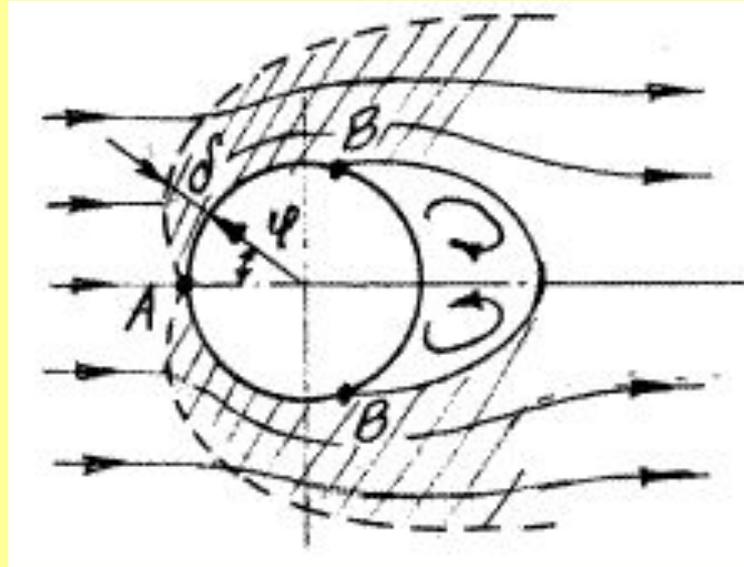


Ламинарный пограничный слой, образующийся в лобовой части трубы около вертикального диаметра, отрывается от ее поверхности и в кормовой части образуются два симметричных вихря.

- 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 φ происходит отрыв ламинарного пограничного слоя.

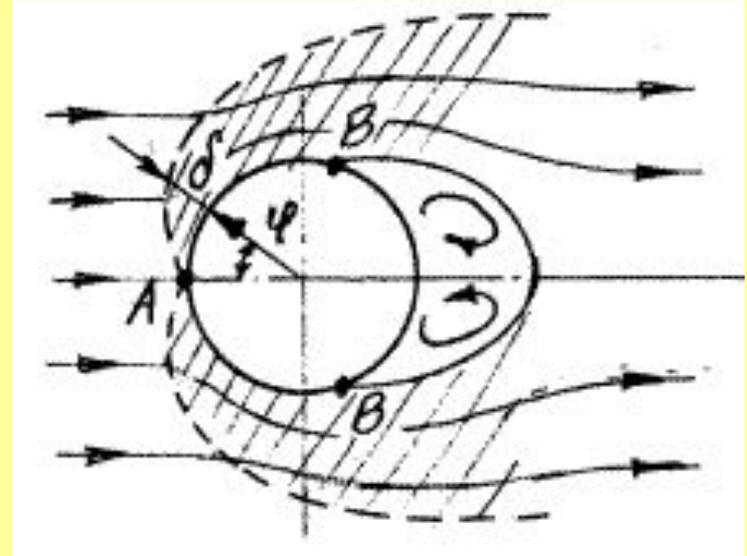


- При больших значениях числа Re ламинарный пограничный слой переходит в турбулентный, а отрыв слоя происходит при $\varphi = 120 \div 130^\circ$.



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

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

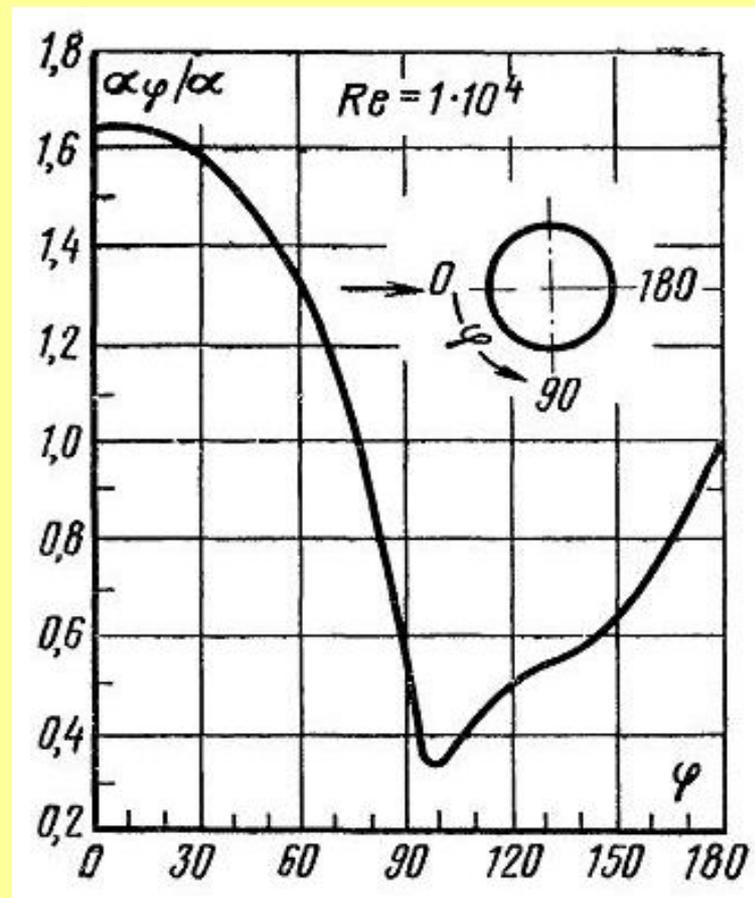


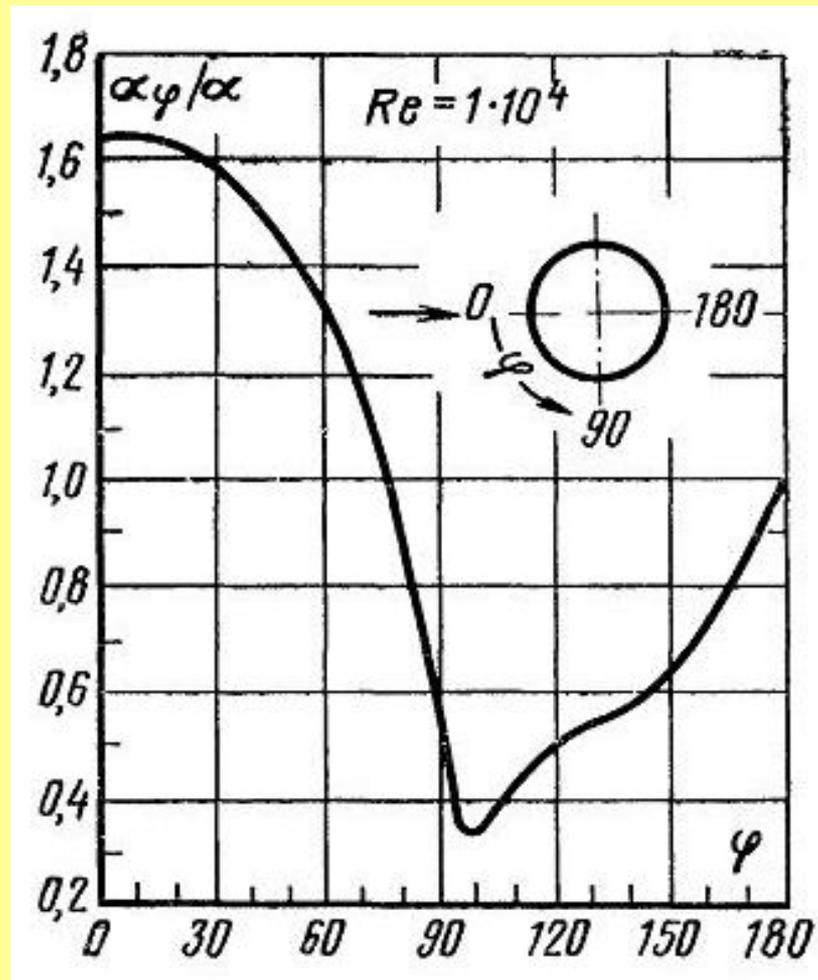
На появление турбулентного пограничного слоя большое влияние оказывает начальная турбулентность потока, чем она больше, тем при меньших значениях числа Re появляется турбулентный пограничный слой.

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.

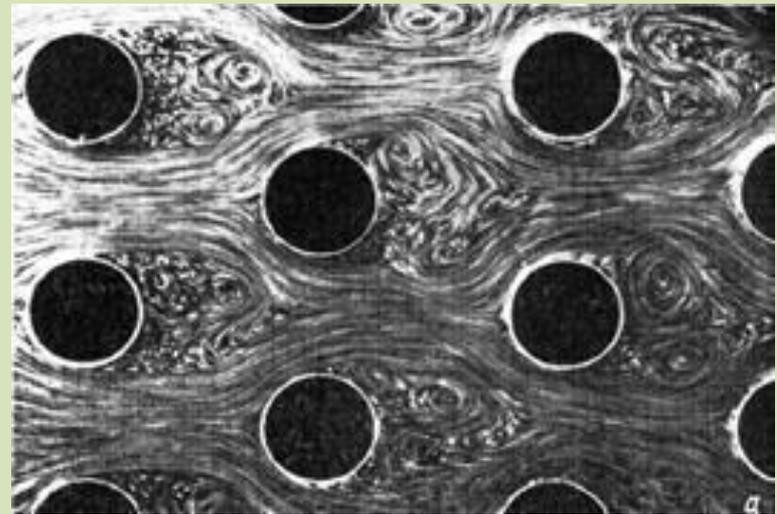
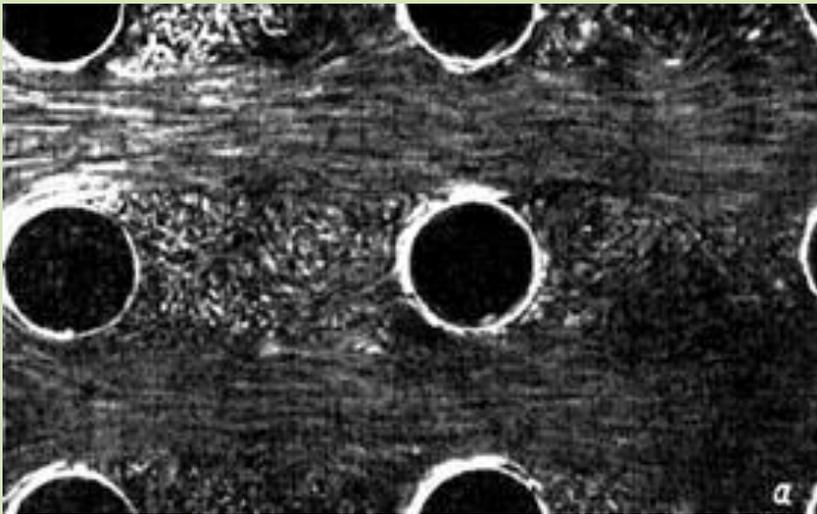
Формулы (1), (2), (3) и (4) справедливы для цилиндра, который располагается перпендикулярно направлению потока.

2. Теплообмен при поперечном омывании пучков труб

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

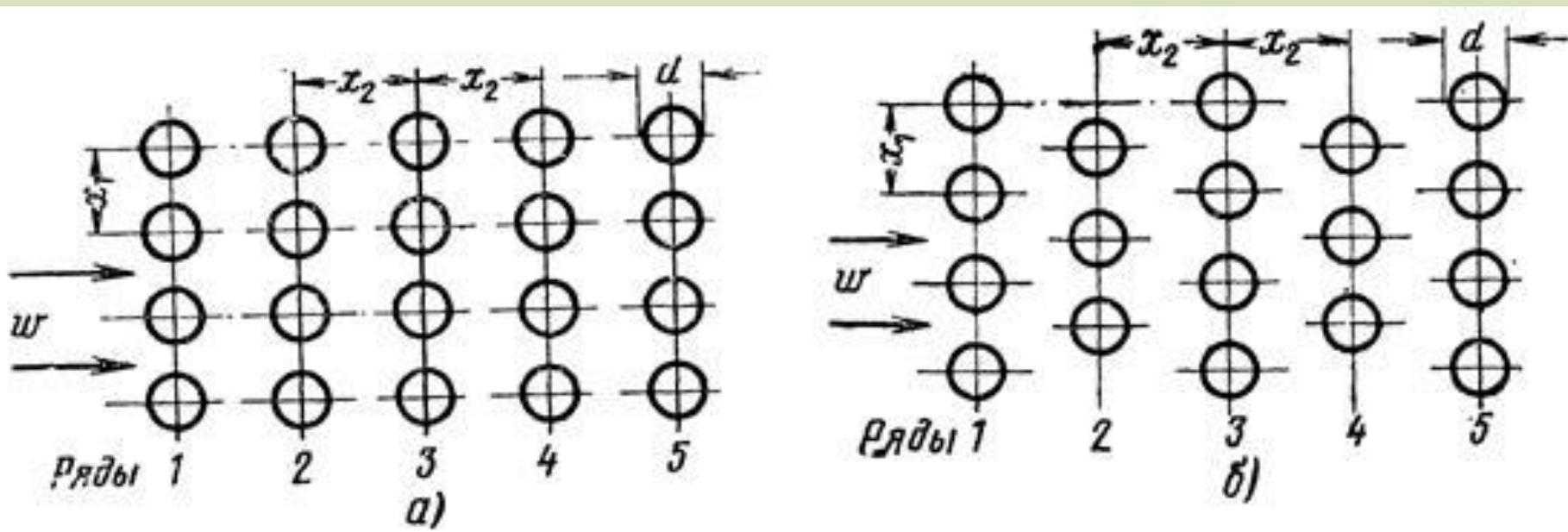
Теплообменные аппараты, собирающиеся из пучка круглых труб и омываемые поперечным потоком жидкости, имеют в технике большое распространение.

- 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.**

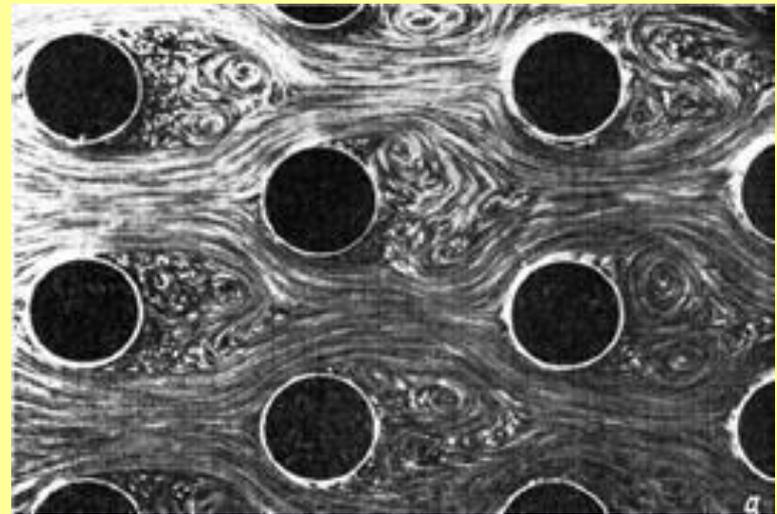
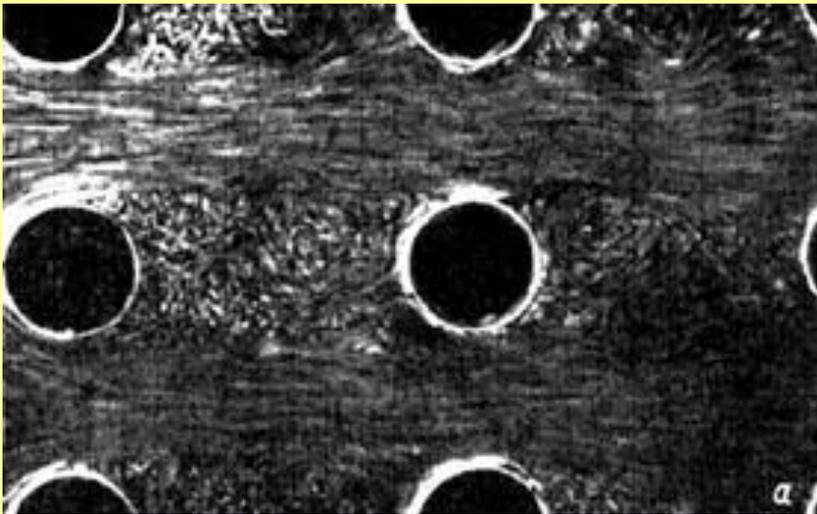
При турбулентном течении теплообмен в пучках определяется различными законами.

- 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 $Re = 1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^5$.**

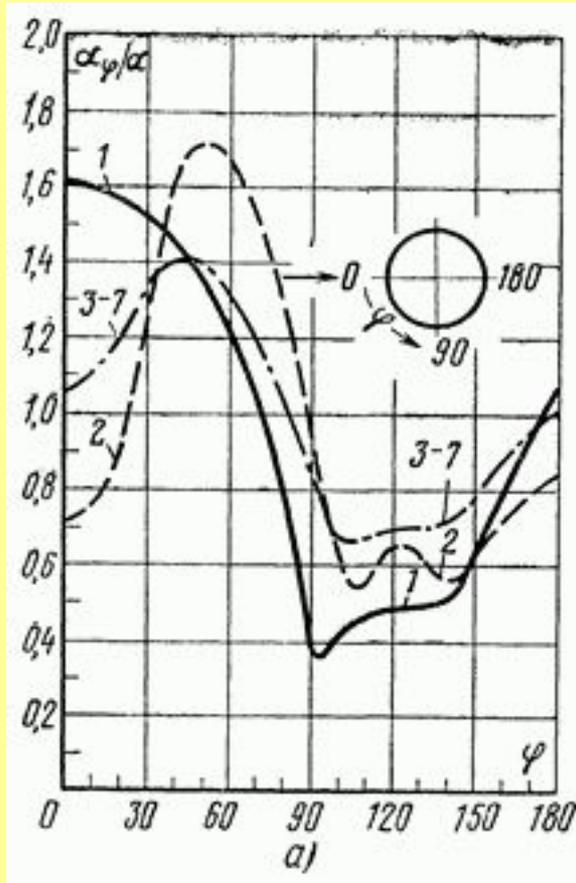
Рассмотрим особенности данного режима.

- 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.

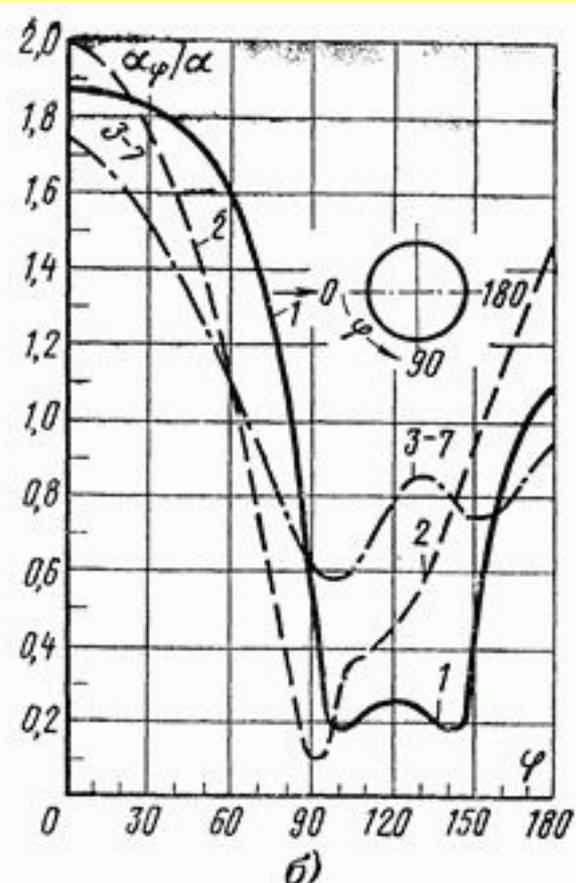
- При шахматном расположении труб загоразивание одних труб другими не происходит.
- Вследствие этого коэффициент теплоотдачи при шахматном расположении труб в одинаковых условиях выше, чем при коридорном.



коридорное



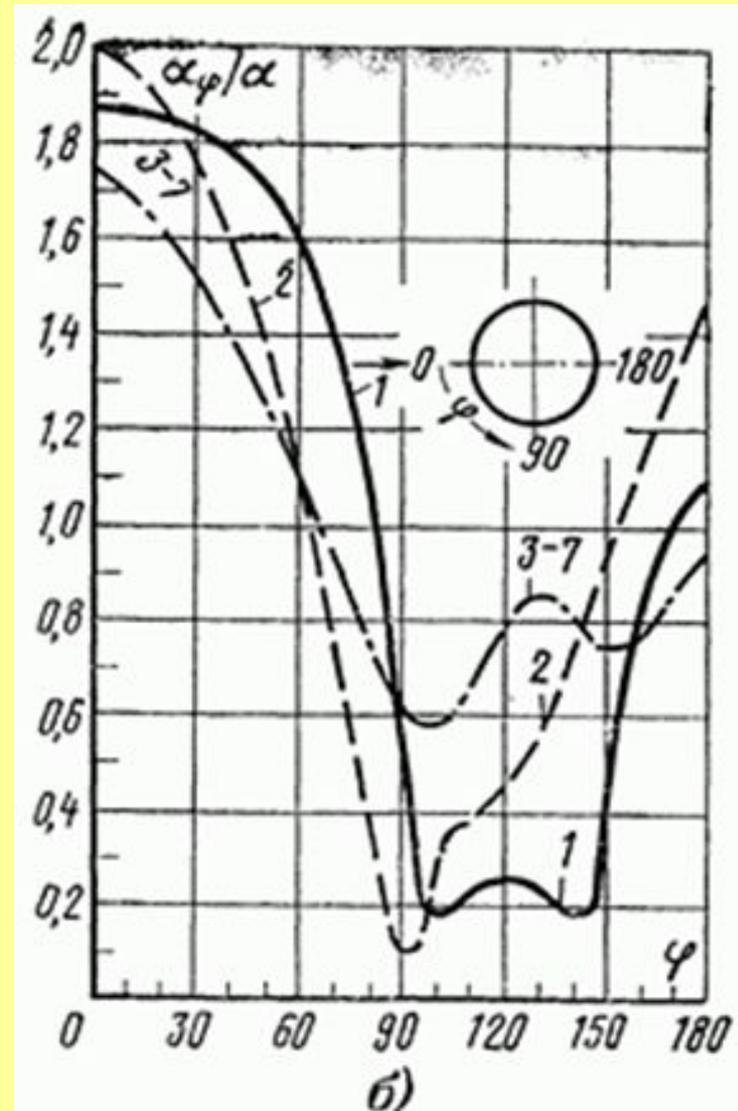
шахматное



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

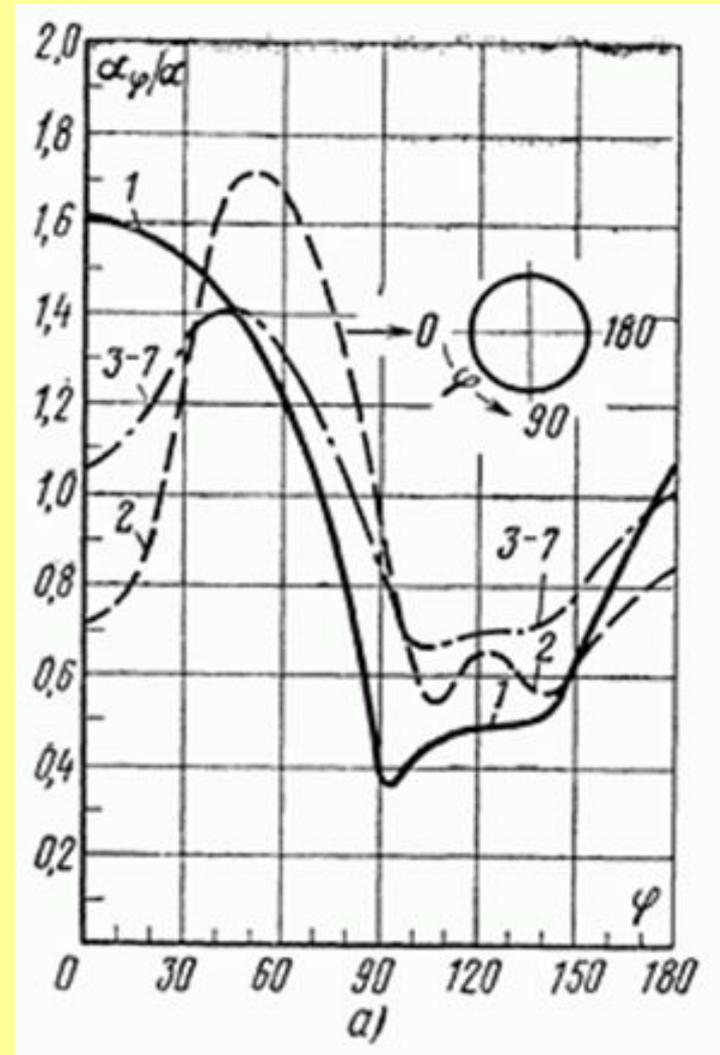
□ Из представленных кривых следует, что коэффициент теплоотдачи α_φ для любого ряда шахматного расположения труб в лобовой части (при $\varphi = 0$) получает максимальное значение и изменение его мало отличается от изменения коэффициента теплоотдачи для одиночной трубы.

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 α_φ 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 ϵ_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.