



**Физико-технический  
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



**Лекция 18. Конвективный теплообмен  
в ядерном реакторе**  
Теплоотдача в однофазной среде при вынужденном  
течении жидкости

06 мая  
2016



Указанные распределения скоростей устанавливаются на определенном расстоянии от входа в трубу или канал, которое называется участком гидродинамической стабилизации.

Наряду с участком гидродинамической стабилизации при неизотермическом течении существует участок тепловой стабилизации, на котором теплообмен между жидкостью и стенкой трубы осуществляется только в пределах теплового пограничного слоя. В центральной части потока сохраняется постоянная температура, равная температуре жидкости на входе в трубу.

При ламинарном режиме течения жидкости в трубе различают вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы.

Вязкостный режим характерен для течения вязких жидкостей (мазут, масло и т. д.) в трубах малого диаметра с высокой скоростью и при небольших температурных напорах  $\Delta t = (t_c - t_{жс})$ .



Расчет средних коэффициентов теплоотдачи при вязкостном режиме производят по уравнению

$$\overline{\text{Nu}}_{\text{жсд}} = 1,55 \left( \text{Re}_{\text{жсд}} \frac{d}{l} \right)^{0,33} \cdot \left( \frac{\mu_c}{\mu_{\text{жс}}} \right)^{-0,14} \cdot \varepsilon_l \quad (7)$$

$\text{Re} = \text{Re} \cdot \text{Pr} = \frac{w \cdot d}{a}$  – число Пекле;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

$d, l$  – внутренний диаметр и длина трубы;

$\varepsilon_l$  – поправка на начальный гидродинамический участок.

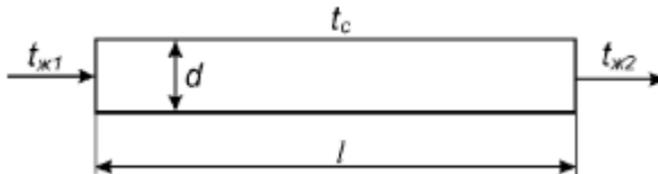
$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{1}{\text{Re}} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} < 0,1 \quad \varepsilon_l = \frac{0,1 \left( \frac{1}{\text{Re}} \frac{l}{d} \right)^{-1/7}}{1 + 2,5 \frac{1}{\text{Re}} \frac{l}{d}} \\ \left( \frac{1}{\text{Re}} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \geq 0,1 \quad \varepsilon_l = 1 \end{aligned} \right\}$$



Определяющей температурой в уравнении является средняя температура жидкости для участка трубы длиной  $l$

$$\overline{t_{жс}} = t_c \pm \overline{\Delta t}$$

где  $\overline{\Delta t}$  - средний температурный напор.



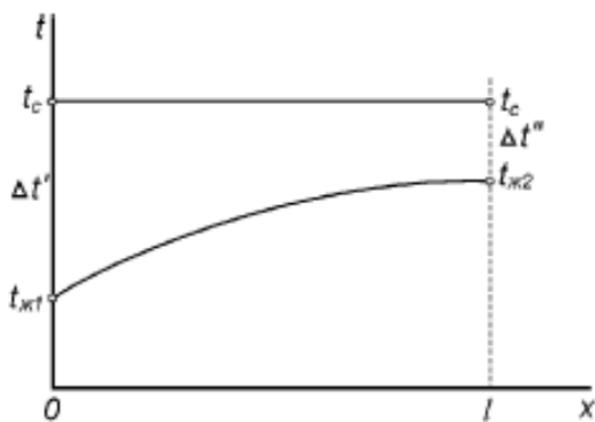


При  $\frac{\Delta t'}{\Delta t''} \geq 2$  средний температурный напор определяется как  
средний логарифмический

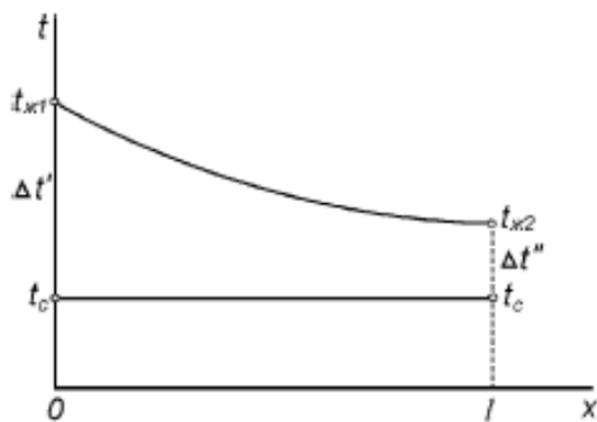
$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}},$$

при  $\frac{\Delta t'}{\Delta t''} < 2$  средняя температура жидкости равна среднеарифметической

$$\overline{t_{ж}} = \frac{t_{ж1} + t_{ж2}}{2}.$$



а) При нагреве



б) При охлаждении

График изменения температур теплоносителей



Вязкостно-гравитационный режим характерен для течения невязких жидкостей в трубах большого диаметра при невысоких скоростях и значительных температурных напорах. В этом случае из-за разностей плотностей различных слоев жидкости на вынужденное движение накладывается свободное движение, которое турбулизует ламинарный поток. Коэффициент теплоотдачи в этом случае

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

При  $(\text{Gr}_{\text{жcd}} \cdot \text{Pr}_{\text{жс}}) \geq 8 \cdot 10^5$  и  $\text{Re}_{\text{жcd}} < 2300$  сказывается влияние естественной конвекции и для расчета среднего коэффициента теплоотдачи рекомендуется уравнение

$$\overline{\text{Nu}}_{\text{жcd}} = 0,15 \cdot \text{Re}_{\text{жcd}}^{0,33} \cdot \text{Pr}_{\text{жс}}^{0,43} \cdot \text{Gr}_{\text{жcd}}^{0,1} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{жс}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \quad (8)$$



Определяющей температурой является средняя температура жидкости в трубе. Коэффициент  $\varepsilon_l$  учитывает влияние участка тепловой стабилизации. При  $l/d \geq 50$   $\varepsilon_l = 1$ , для коротких труб он имеет другие значения

$l/d$	1	2	5	10	15	20	30	40
$\varepsilon_l$	1.9	1.7	1.44	1.28	1.18	1.13	1.05	1.02

При  $(Gr_{жcd} \cdot Pr_{жс}) < 8 \cdot 10^5$  и  $Re_{жcd} < 2300$  режим течения жидкости в трубе является вязкостным.

При турбулентном режиме течения жидкости ( $Re_{жcd} > 10^4$ ) для расчета среднего коэффициента теплоотдачи рекомендуется использовать уравнение

$$\overline{Nu}_{жcd} = 0,021 \cdot Re_{жcd}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \quad (9)$$



Определяющей температурой является средняя температура жидкости. Поправочный коэффициент  $\varepsilon_l$  для коротких труб выбирается из

Значения поправочных коэффициентов в зависимости от длины трубы при турбулентном режиме течения

$Re_{жид}$	$l/d$						
	1	2	5	10	20	30	40
$1 \cdot 10^4$	1.65	1.50	1.34	1.23	1.13	1.07	1.03
$2 \cdot 10^4$	1.51	1.40	1.27	1.18	1.10	1.05	1.02
$5 \cdot 10^4$	1.34	1.27	1.18	1.13	1.08	1.04	1.02
$10^5$	1.28	1.22	1.15	1.10	1.06	1.03	1.02
$10^6$	1.14	1.11	1.08	1.05	1.03	1.02	1.01



Для переходного режима течения жидкости в трубах  $2300 < Re_{жcd} < 10^4$  характерна периодическая смена ламинарного и турбулентного течений. Для расчета среднего коэффициента теплоотдачи используется уравнение для турбулентного режима течения с учетом поправки  $\varepsilon_{пер} < 1$ . В зависимости от  $Re_{жcd}$  этот коэффициент принимает следующие значения

**Значения поправочных коэффициентов в зависимости от числа Рейнольдса при переходном режиме течения**

$Re_{жcd}$	2300	3000	5000	6000	8000	10000
$\varepsilon_{пер}$	0.40	0.57	0.72	0.81	0.96	1.00



Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в каналах некруглого сечения рассчитывается по выше приведенным уравнениям для труб. Определяющим размером в этих уравнениях является эквивалентный диаметр, который рассчитывается по формуле

$$d_{\text{экв}} = \frac{4F}{P}$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения канала;  $P$  – «смоченный» периметр.

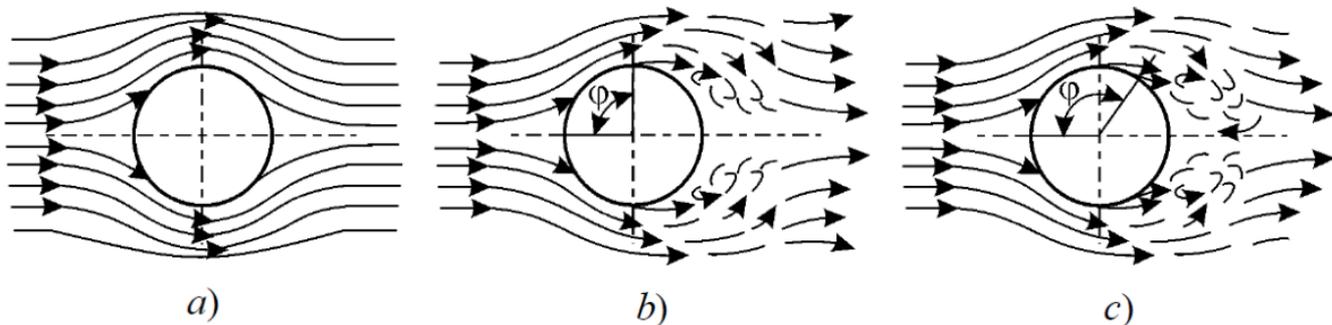
Для каналов кольцевого сечения (труба в трубе) средний коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности внутренней трубы к жидкости в кольцевом зазоре рассчитывается по уравнению

$$\overline{\text{Nu}}_{\text{жс}d_{\text{экв}}} = 0,017 \cdot \text{Re}_{\text{жс}d_{\text{экв}}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{жс}}^{0,4} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{0,18} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{жс}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} \quad (10)$$

$$d_{\text{экв}} = d_2 - d_1$$



Процесс теплоотдачи при поперечном обтекании трубы характеризуется рядом особенностей, которые связаны с гидродинамикой движения жидкости вблизи поверхности трубы

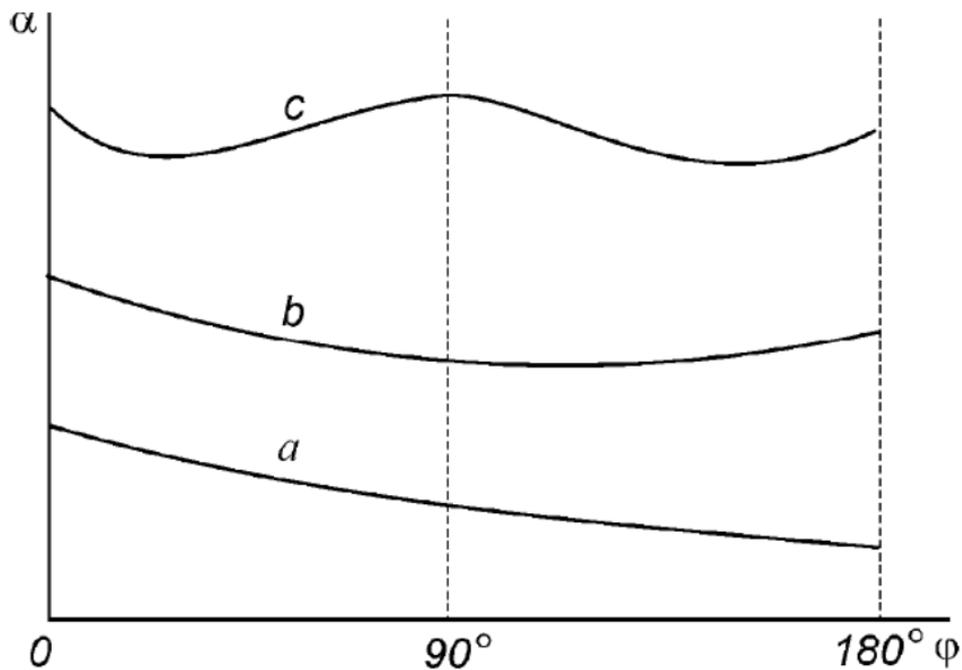


Поперечное омывание труб при различных  
режимах течения жидкости

Гидродинамика движения жидкости определяется числом  
Рейнольдса



При небольших скоростях потока жидкости  $Re < 40$  обтекание трубы плавное (см. рис. а), при более высоких скоростях  $40 < Re < 1000$  происходит отрыв ламинарного пограничного слоя от поверхности трубы. Угол отрыва составляет  $\varphi = (80 - 90)^\circ$  (b). При значениях  $Re > 10^5$  ламинарное течение в пограничном слое сменяется турбулентным. Угол отрыва турбулентного пограничного слоя от поверхности трубы составляет  $\varphi = (120-140)^\circ$  (с).



Характер изменения коэффициента теплоотдачи  
от режима течения жидкости



Коэффициент теплоотдачи принимает наибольшее значение на лобовой части трубы, где толщина пограничного слоя минимальная. Из-за увеличения толщины пограничного слоя по периметру трубы коэффициент теплоотдачи уменьшается, достигая минимального значения в точке отрыва потока (кривая *a*). В области циркуляционной зоны происходит увеличение коэффициента теплоотдачи за счет разрушения пограничного слоя (кривая *b*). Для случая *c* первое увеличение коэффициента теплоотдачи связано со сменой режима течения в пограничном слое, второе – с отрывом турбулентного пограничного слоя.



Для расчета среднего по периметру трубы коэффициента теплоотдачи рекомендуются следующие уравнения:

При  $Re < 40$

$$\overline{Nu}_{жcd} = 0,76 Re_{жcd}^{0,4} Pr_{жс}^{0,37} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (11)$$

При  $40 < Re < 1000$

$$\overline{Nu}_{жcd} = 0,5 Re_{жcd}^{0,5} Pr_{жс}^{0,38} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (12)$$

При  $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$

$$\overline{Nu}_{жcd} = 0,25 Re_{жcd}^{0,6} Pr_{жс}^{0,38} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (13)$$

При  $2 \cdot 10^5 < Re < 10^7$

$$\overline{Nu}_{жcd} = 0,023 Re_{жcd}^{0,8} Pr_{жс}^{0,37} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (14)$$



Формулы действительны для случая, когда угол между направлением потока жидкости и осью трубы  $\psi$ , называемый углом атаки, равен  $90^\circ$ . Если  $\psi < 90^\circ$ , то найденный по формулам (11) – (14) коэффициент теплоотдачи следует умножить на поправочный коэффициент

$$\varepsilon_\psi = 1 - 0,54 \cos^2 \psi$$