



**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



**Лекция 17. Конвективный теплообмен
в ядерном реакторе**
Теплоотдача в однофазной среде при вынужденном
течении жидкости

25 апреля
2016



Вынужденное течение жидкости (вынужденная конвекция) возникает под действием разности давлений, которая в совокупности с теплофизическими свойствами определяет скорость движения жидкости w . Таким образом, при вынужденном движении жидкости определяющими числами подобия являются числа Рейнольдса и Прандтля

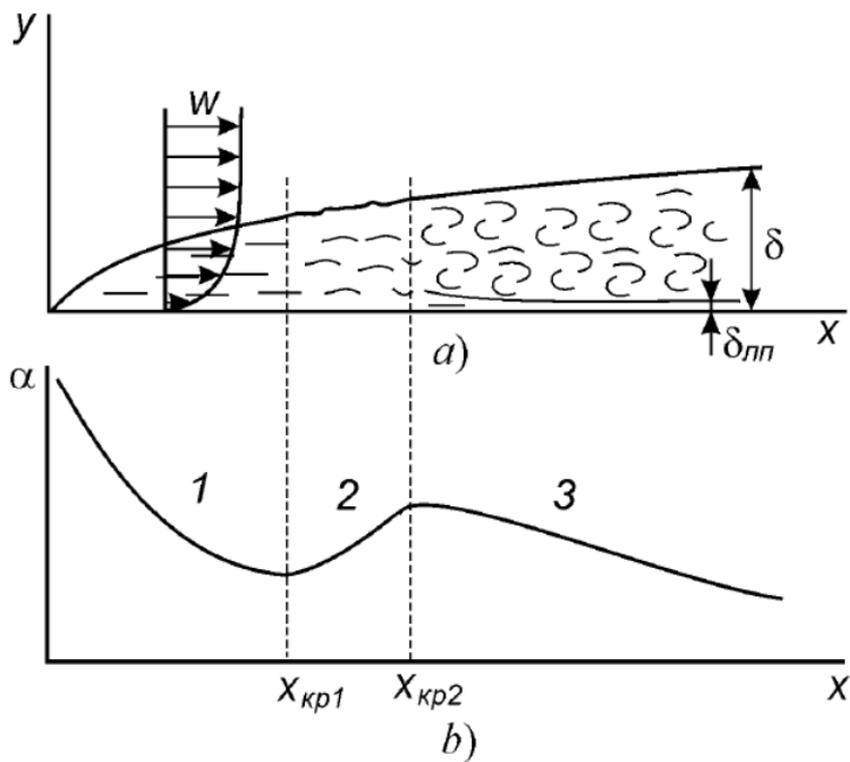
$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (1)$$

В некоторых случаях при малых скоростях и больших температурных напорах на вынужденное течение жидкости могут накладываться токи естественной конвекции, и тогда

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Ge}, \text{Pr}) \quad (2)$$

Рассмотрим участок плоской поверхности, имеющий температуру t_c и омываемый потоком жидкости с температурой $t_{жс}$ и скоростью w .

Вблизи поверхности формируется гидродинамический пограничный слой δ с ламинарным, переходным и турбулентным режимами течения





Режим течения в гидродинамическом пограничном слое определяется числом $Re_{жсх} = wx/\nu$.

При $Re_{жсх} < 10^4$ – режим течения ламинарный;

при $10^4 < Re_{жсх} < 4 \cdot 10^6$ – переходный режим течения;

при $Re_{жсх} > 4 \cdot 10^6$ – режим течения турбулентный.

Для переходного режима из-за неустойчивости течения, характеризующегося частой сменой во времени ламинарного и турбулентного режимов, отсутствует методика расчета коэффициентов теплоотдачи. Поэтому считают, что при $Re_{жсх} \leq 5 \cdot 10^5$ режим течения ламинарный; а при $Re_{жсх} > 5 \cdot 10^5$ режим течения турбулентный.



Для расчета локальных коэффициентов теплоотдачи используют следующие уравнения:

при ламинарном режиме течения жидкости в пограничном слое

$$Nu_{жсх} = 0,33 \cdot Re_{жсх}^{0,5} \cdot Pr_{жс}^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (3)$$

при турбулентном режиме течения жидкости

$$Nu_{жсх} = 0,0296 \cdot Re_{жсх}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (4)$$

Теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие уравнения для расчета средних коэффициентов теплоотдачи для участка плоской поверхности длиной l



при ламинарном режиме течения жидкости в пограничном слое

$$\overline{\text{Nu}}_{\text{жсл}} = 0,66 \cdot \text{Re}_{\text{жсл}}^{0,5} \cdot \text{Pr}_{\text{жс}}^{0,33} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_{\text{жс}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} \quad (5)$$

при турбулентном режиме течения жидкости

$$\overline{\text{Nu}}_{\text{жсл}} = 0,037 \cdot \text{Re}_{\text{жсл}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{жс}}^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_{\text{жс}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} \quad (6)$$

Форма поверхности (плоская, цилиндрическая, шаровая или иная) при продольном омывании ее вынужденным потоком жидкости не влияет на коэффициент теплоотдачи.



Рассмотрим свободное гравитационное течение в большом объеме вблизи поверхности пластины и цилиндра.

Пусть вертикальная пластина с неизменной температурой поверхности, равной t_c , находится в жидкости или газе. Жидкость вдали от пластины неподвижна (вынужденное течение отсутствует), температура жидкости вдали от пластины постоянна и равна $t_{жс} < t_c$.

При этом у пластины появляется подъемное движение нагретого слоя жидкости. Вдали от пластины скорость равна нулю.

Слой нагреваемой движущейся жидкости δ является одновременно гидродинамическим и тепловым пограничным слоем, в пределах этого слоя изменяется скорость течения от нуля до максимума и температура от t_c до $t_{жс}$.



Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в трубах и каналах зависит от режима течения, который определяется числом

$Re_{жcd} = \frac{w \cdot d}{\nu}$. При $Re_{жcd} < 2300$ – ламинарный режим течения; при $2300 < Re_{жcd} < 10^4$ – переходный режим течения; при $Re_{жcd} > 10^4$ – турбулентный режим течения.

При ламинарном течении в любом сечении стабилизированного потока жидкости закон распределения скоростей параболический. При этом средняя скорость жидкости равна половине максимальной, которая приходится на ось потока. При турбулентном режиме основное изменение скорости происходит в вязком подслое, в ядре потока скорость жидкости по всему сечению практически одинакова.



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

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

где $\text{Re} = \text{Re} \cdot \text{Pr} = \frac{w \cdot d}{a}$ – число Пекле; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; d, l – внутренний диаметр и длина трубы; ε_l – поправка на начальный гидродинамический участок. При $\left(\frac{1}{\text{Re} d} \right) < 0.1$ поправочный коэффициент рассчитывается по уравнению

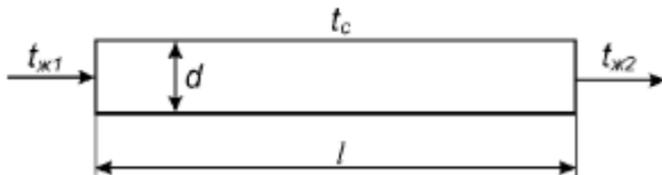
$$\varepsilon_l = \frac{0.1 \left(\frac{1}{\text{Re} d} \right)^{-1/7}}{1 + 2.5 \frac{1}{\text{Re} d}}$$



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.



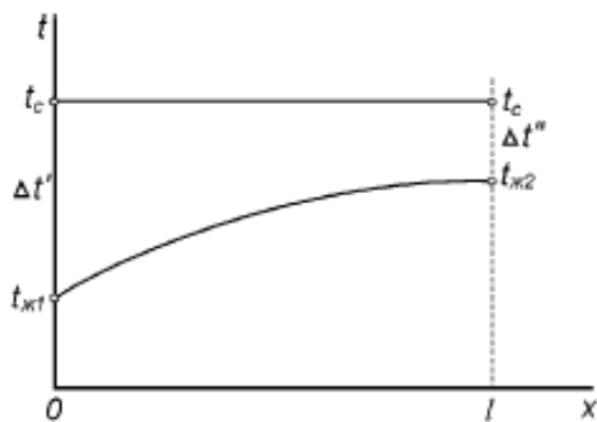


При $\frac{\Delta t'}{\Delta t''} \geq 2$ средний температурный напор определяется как
средний логарифмический

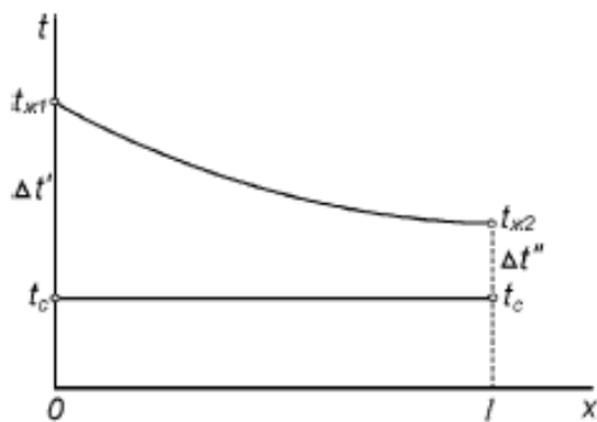
$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}},$$

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



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

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

При $(Gr_{жcd} \cdot Pr_{жс}) \geq 8 \cdot 10^5$ и $Re_{жcd} < 2300$ сказывается влияние естественной конвекции и для расчета среднего коэффициента теплоотдачи рекомендуется уравнение

$$\overline{Nu}_{жcd} = 0,15 \cdot Re_{жcd}^{0,33} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot Gr_{жcd}^{0,1} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \quad (8)$$



Определяющей температурой является средняя температура жидкости в трубе. Коэффициент ε_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
ε_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 ε_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

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

$$d_{\text{ЭКВ}} = d_2 - d_1$$