

# Тепломассообмен 13

Вынужденная конвекция  
в трубах и каналах

# Вынужденная конвекция в трубах и каналах (ламинарный режим)

При числах Рейнольдса  $(Re = \frac{wd}{\nu}) < 2300$  - режим течения жидкостей в трубах ламинарный.

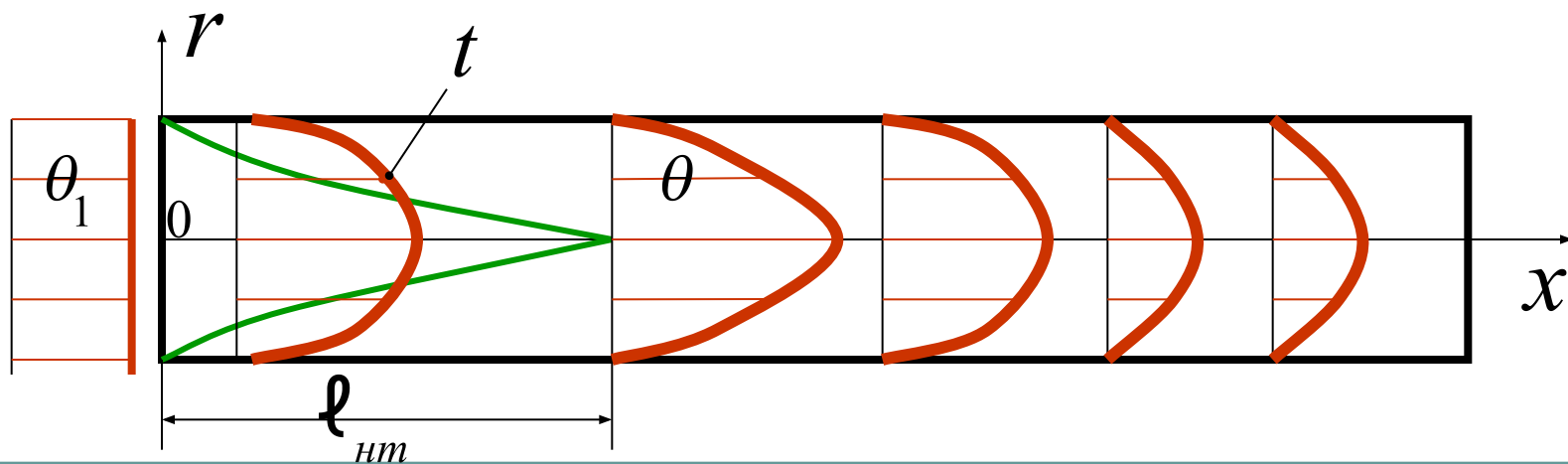
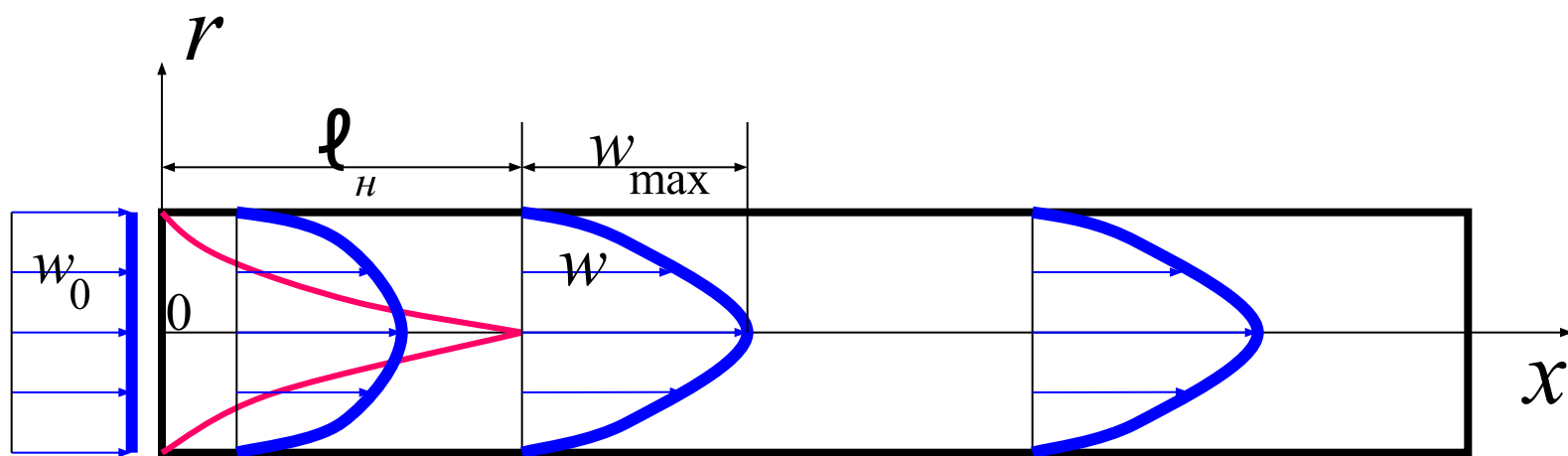
Здесь  $w$  - средняя по сечению трубы скорость жидкости, м/с (при ламинарном режиме  $w = 0,5w_{\max}$ );  
 $d$  - диаметр трубы, м.

Для каналов произвольной формы **характерным линейным размером** является эквивалентный диаметр  $d_{\text{э}} = 4f/\Pi$ ,  
где  $f$  - поперечное сечение канала,  $\text{м}^2$ ;  $\Pi$  - периметр канала, м.

Для труб  $d_{\text{э}} = \frac{4\pi d^2 / 4}{\pi d}$  **Уравнение подобия Михеева**  
для среднего коэффициента теплоотдачи при ламинарном режиме течения жидкости:

$$Nu_{\text{ж},d} = 0,15 Re_{\text{ж},d}^{0,33} Pr_{\text{ж}}^{0,33} Gr_{\text{ж},d}^{0,1} \left( \frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_{\varphi}.$$

# Гидродинамическая и тепловая стабилизация потока жидкости в трубе



# Уравнение подобия для конвективной теплоотдачи при переходном режиме

В уравнении (1) члены  $Re_{ж,d}^{0,33} \cdot Gr_{ж,d}^{0,1}$  учитывают вклад в теплоотдачу соответственно вынужденной и свободной конвекции;  $Pr_{ж}^{0,33}$  - влияние физических свойств жидкости;  $(Pr_{ж} / Pr_c)^{0,25}$  - направление теплового потока (от жидкости к стенке или в обратном направлении), при этом числа Прандтля жидкости берутся соответственно при температурах жидкости и стенки;  $\varepsilon_l$  - поправка на длину трубы (для длинных труб  $(l/d) \geq 50 \rightarrow \varepsilon_l = 1$ , см. следующий слайд).

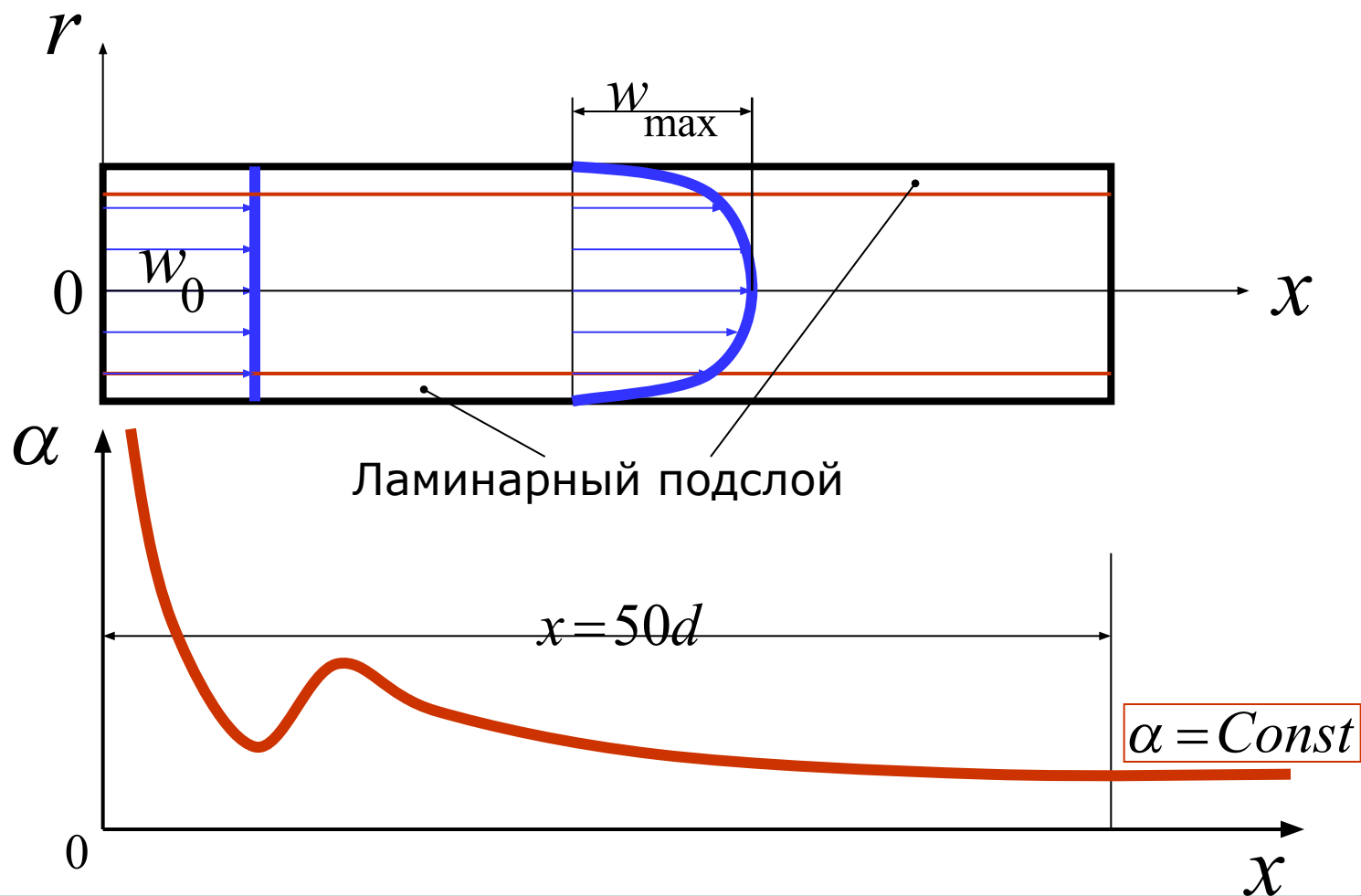
Уравнение подобия конвективной теплоотдачи для переходного режима ( $Re_{ж,d} = 2300 \dots 10^4$ ):  
при вынужденном движении жидкости

$$Nu_{ж,d} = 0,008 Re_{ж,d}^{0,9} Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_l.$$

# Поправка $\varepsilon_\ell$ для ламинарного режима

$\frac{\ell}{d}$	1	2	5	10	15
$\varepsilon_\ell$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18
$\frac{\ell}{d}$	20	30	40	50	-
$\varepsilon_\ell$	1,13	1,05	1,02	1	-

# Турбулентное движение в трубах



# Уравнения подобия для конвективной теплоотдачи при турбулентном режиме

Для турбулентного режима течения жидкости в трубах и каналах при  $Re_{ж,d} > 10^4$ . В этом случае средняя скорость жидкости  $w = (0,8 \dots 0,9) w_{max}$ , коэффициент теплоотдачи становится постоянным при относительной длине трубы  $x \geq 50d$  (см. предыдущий слайд). **Уравнение подобия конвективной теплоотдачи для любой жидкости при турбулентном режиме:**

$$Nu_{ж,d} = 0,021 Re_{ж,d}^{(3)0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_{\ell},$$

где  $\varepsilon_{\ell}$  - поправка на длину трубы (см. следующий слайд).

Для воздуха

$$Pr_{ж} \approx 0,7 \approx Const; \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \approx 1; 0,021 Pr_{ж}^{0,43} = 0,018,$$

тогда для воздуха:

$$Nu_{ж,d} = 0,018 Re_{ж,d}^{0,8} \varepsilon_{\ell}.$$

(4)

Поправка  $\varepsilon_\rho$   
для турбулентного режима

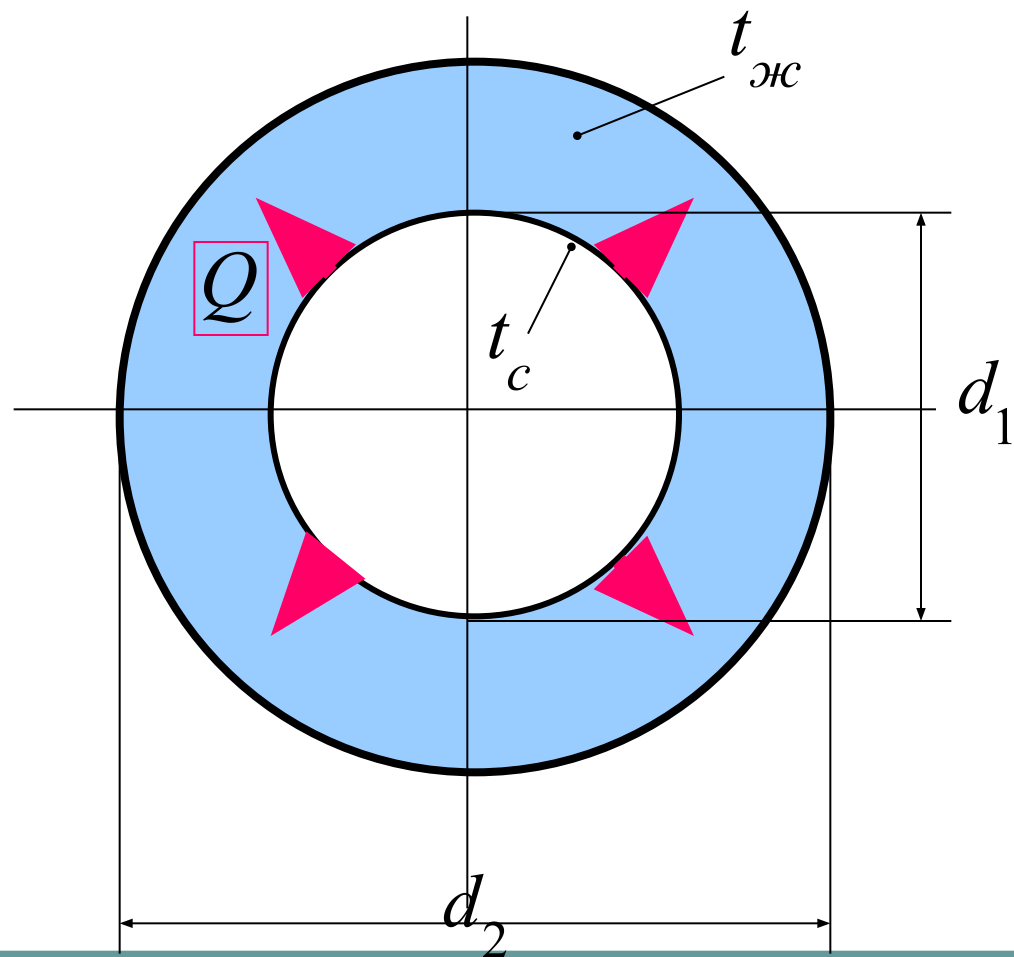
$Re_{ж,d}$	$l/d$			
	1	2	5	10
10000	1,65	1,50	1,34	1,23
20000	1,51	1,40	1,27	1,18
50000	1,34	1,27	1,18	1,13
100000	1,28	1,22	1,15	1,10
1000000	1,14	1,11	1,08	1,05



# Поправка $\varepsilon_\ell$ для турбулентного режима

$Re_{ж,d}$	$\ell/d$			
	15	20	30	40
10000	1,17	1,13	1,07	1,03
20000	1,13	1,10	1,05	1,02
50000	1,10	1,08	1,04	1,02
100000	1,08	1,06	1,03	1,02
1000000	1,04	1,03	1,02	1,01

# Теплоотдача к жидкости в кольцевом канале



# Теплоотдача в кольцевых каналах

Для теплоотдачи от внутренней стенки к жидкости, движущейся в кольцевом канале, Исаченко В.П. предложил ввести поправку в уравнение подобия (14) для турбулентного режима:

$$Nu_{ж, d_3} = 0,017 Re_{ж, d_3}^{0,8} Pr_{ж}^{0,4} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{0,18},$$

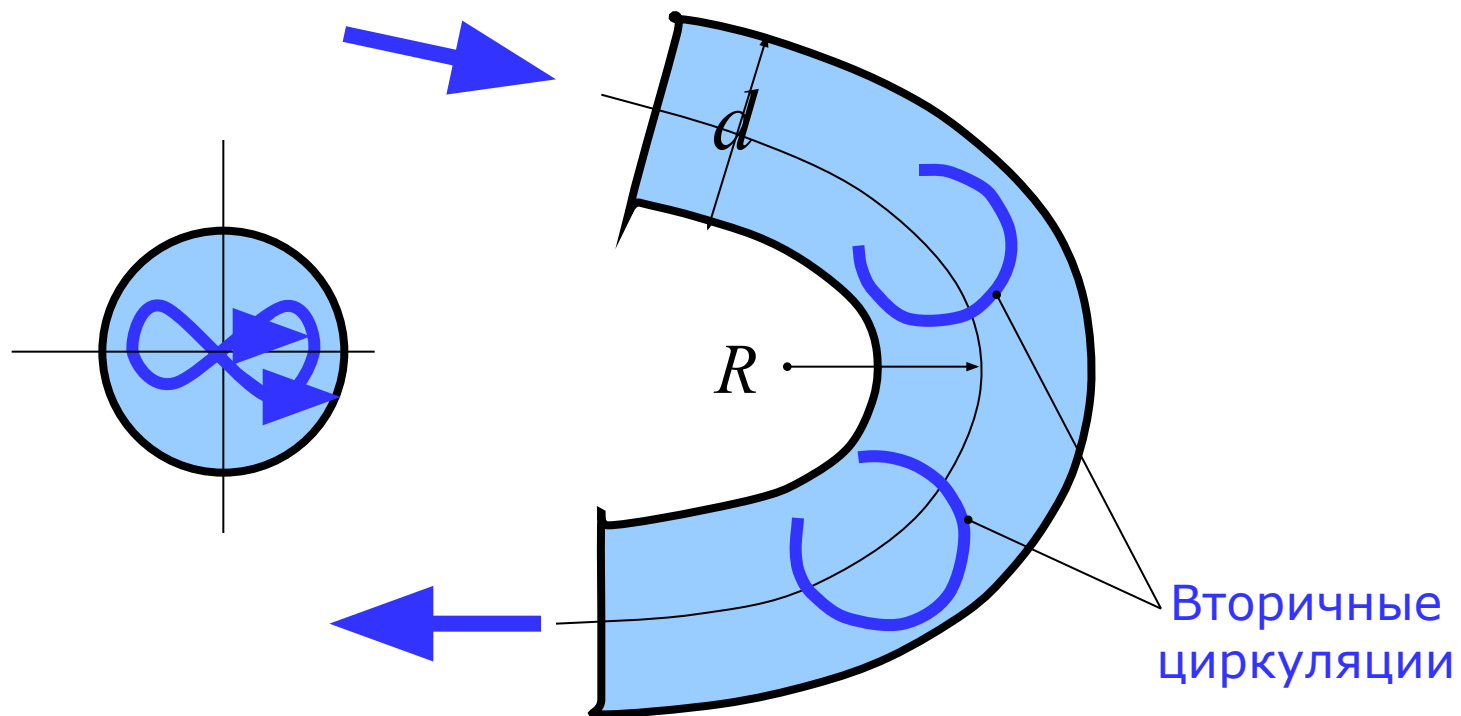
где  $d_1, d_2$  - соответственно наружный диаметр внутренней трубы и внутренний диаметр наружной трубы, м;

$d_3 = d_2 - d_1$  - эквивалентный диаметр кольцевого канала, м.

Уравнение подобия (5) справедливо для отношений диаметров

$$\frac{d_2}{d_1} = 1,2 \dots 14.$$

# Теплоотдача в изогнутых трубах



# Критические значения чисел Рейнольдса для изогнутых труб

$d$  – внутренний радиус изогнутой трубы;  $R$  – радиус изгиба трубы. Если для прямой трубы критическое число Рейнольдса, соответствующее переходу от ламинарного режима к переходному

$Re_{кр1} = 2300$ , то для изогнутой трубы из-за вторичных циркуляций переход происходит при  $Re'_{кр1} < Re_{кр1}$ .

По Фастовскому при  $d/R \geq 8 \cdot 10^4$ :  $Re'_{кр1} \approx \frac{16,4}{\sqrt{d/R}}$ .

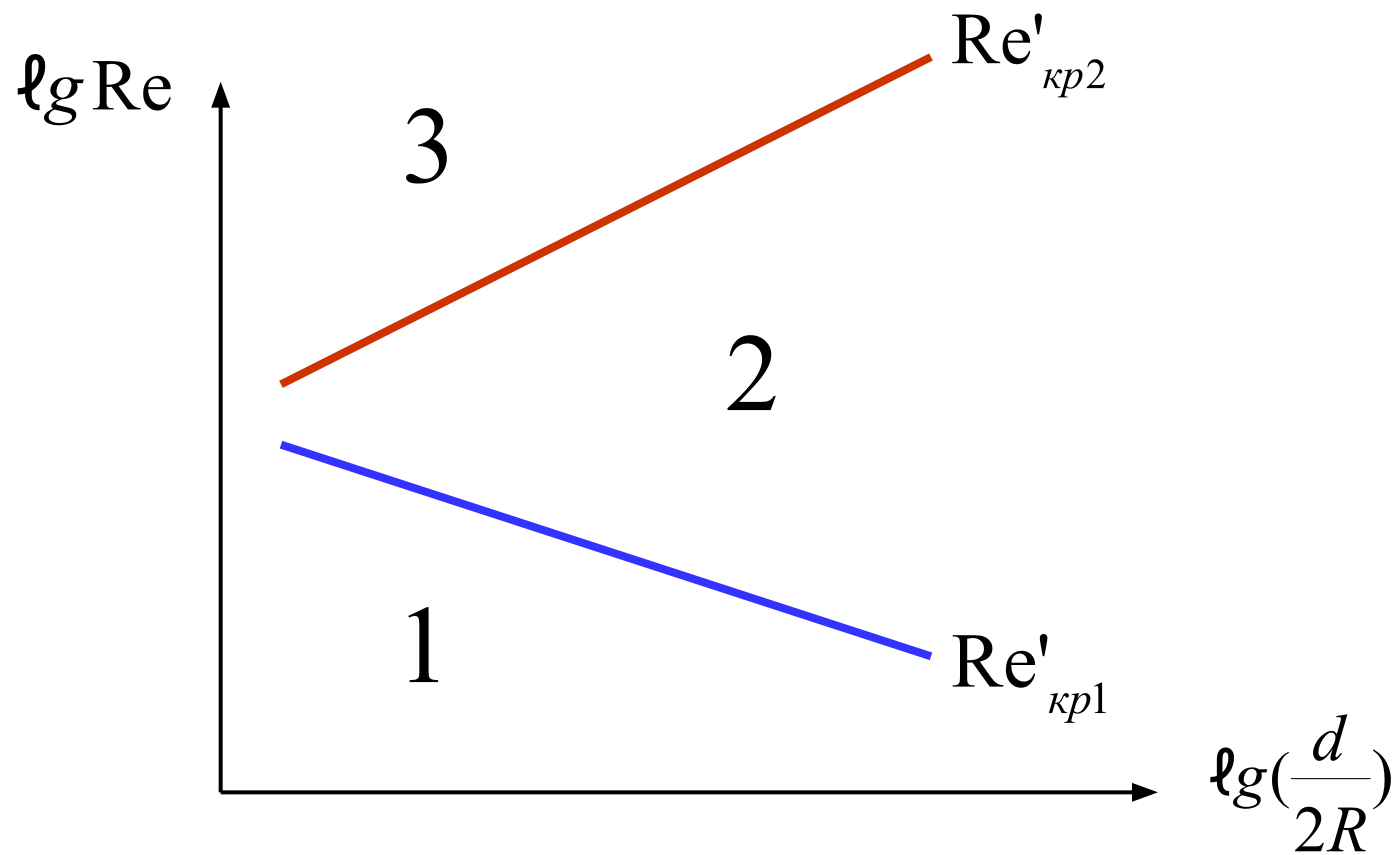
Переход к турбулентному режиму течения жидкости в изогнутых трубах также происходит раньше, чем в прямых:

$Re'_{кр2} < (Re_{кр2} = 10^4)$ .

А именно, при

$$Re'_{кр2} = 18500 \left( \frac{d}{2R} \right)^{0,28}.$$

# Режимы движения жидкости в изогнутых трубах



# Поправка на изгиб труб

Обозначения на предыдущем слайде:

- **зона 1** – ламинарное движение без вторичных циркуляций [расчет по уравнению подобия Михеева (1) для ламинарного режима в прямой трубе];
- **зона 2** – ламинарное движение с вторичными циркуляциями [расчет по уравнению (3) для турбулентного режима в прямой трубе];
- **зона 3** – турбулентное движение с вторичными циркуляциями [результаты расчета по уравнению подобия (3) умножаются на поправочный коэффициент  $\varepsilon_{изг}$ . В змеевиках влияние изгиба на интенсификацию теплоотдачи

распространяется на весь змеевик:  $\varepsilon_{изг} = 1 + 1,88 \frac{d}{R}$ .

# Теплоотдача в шероховатых трубах

Если высота бугорков шероховатости  $\delta$  больше толщины ламинарного подслоя, то есть бугорки перекрываются им и не влияют на режим движения и теплоотдачу. Если же бугорки возвышаются над ламинарным подслоем, то коэффициент теплоотдачи может быть в 2-3 раза выше по сравнению с теми же условиями для гладкой поверхности. Но если бугорки слишком высокие, то за ними могут быть застойные зоны и эффективность бугорков снижается.

По Гомелаури оптимальное отношение шага бугорков к их высоте должно быть  $(s/\delta)_{opt} \approx 13$ , тогда уравнение подобия для турбулентного

режима:

$$Nu_{ж, d_{э}} = 0,022 Re_{ж, d_{э}}^{0,8} Pr_{ж}^{0,47} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \epsilon_{ш},$$



# Поправка на шероховатость трубы

где  $\varepsilon_{ш}$  поправка на шероховатость:

при  $\left(\frac{s}{\delta}\right) > \left(\frac{s}{\delta}\right)_{opt}$  :  $\varepsilon_{ш} = \exp\left[0,85 \frac{\left(\frac{s}{\delta}\right)_{opt}}{\left(\frac{s}{\delta}\right)}\right]$ ;

При  $\left(\frac{s}{\delta}\right) < \left(\frac{s}{\delta}\right)_{opt}$  :  $\varepsilon_{ш} = \exp\left[0,85 \frac{\left(\frac{s}{\delta}\right)}{\left(\frac{s}{\delta}\right)_{opt}}\right]$ .