

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 $w = 0,5w_{\max}$);

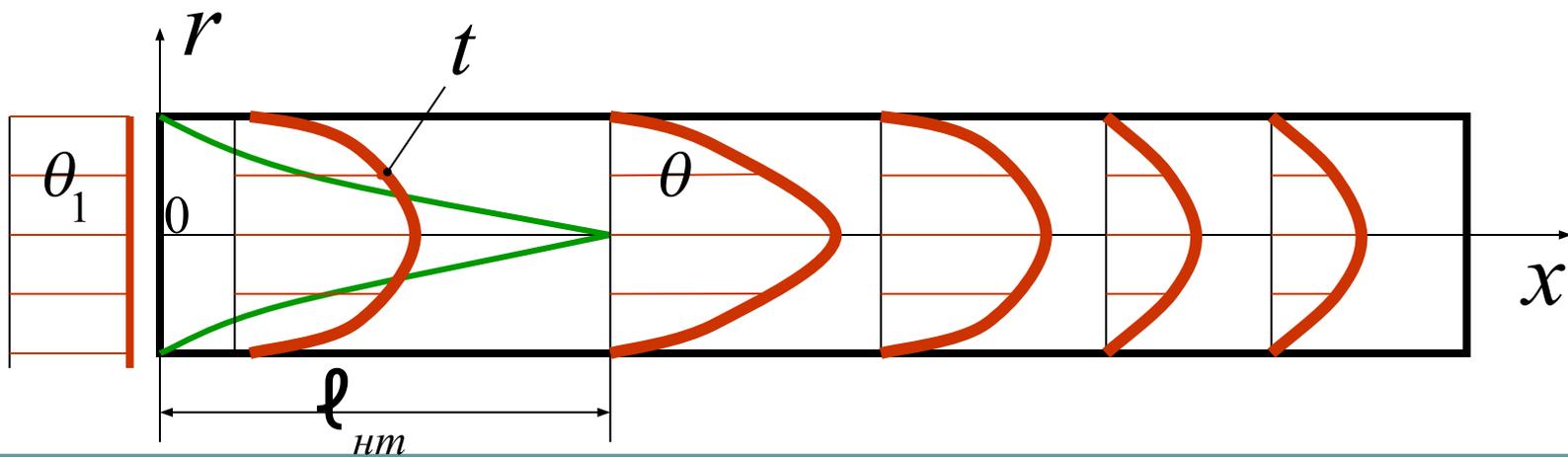
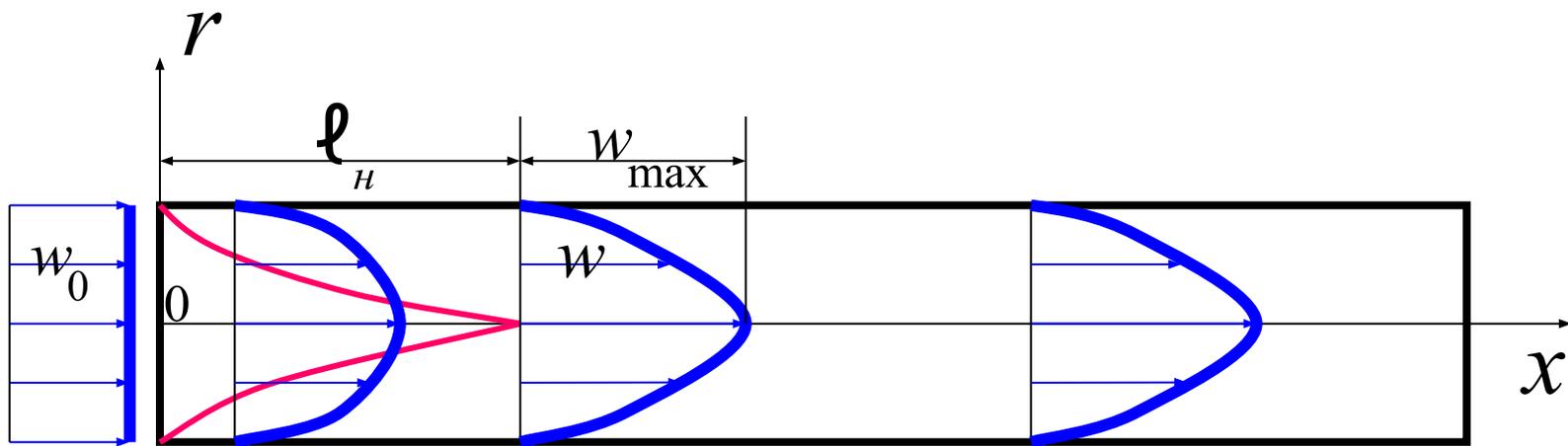
d - диаметр трубы, м.

Для каналов произвольной формы **характерным линейным размером** является эквивалентный диаметр $d_{\text{э}} = 4f/\Pi$, где f - поперечное сечение канала, м^2 ; Π - 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 $Re_{ж,d}^{0,33}; Gr_{ж,d}^{0,1}$ 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; ε_l - поправка на длину трубы (для длинных труб $(l/d) \geq 50 \rightarrow \varepsilon_l = 1$, см. следующий слайд).

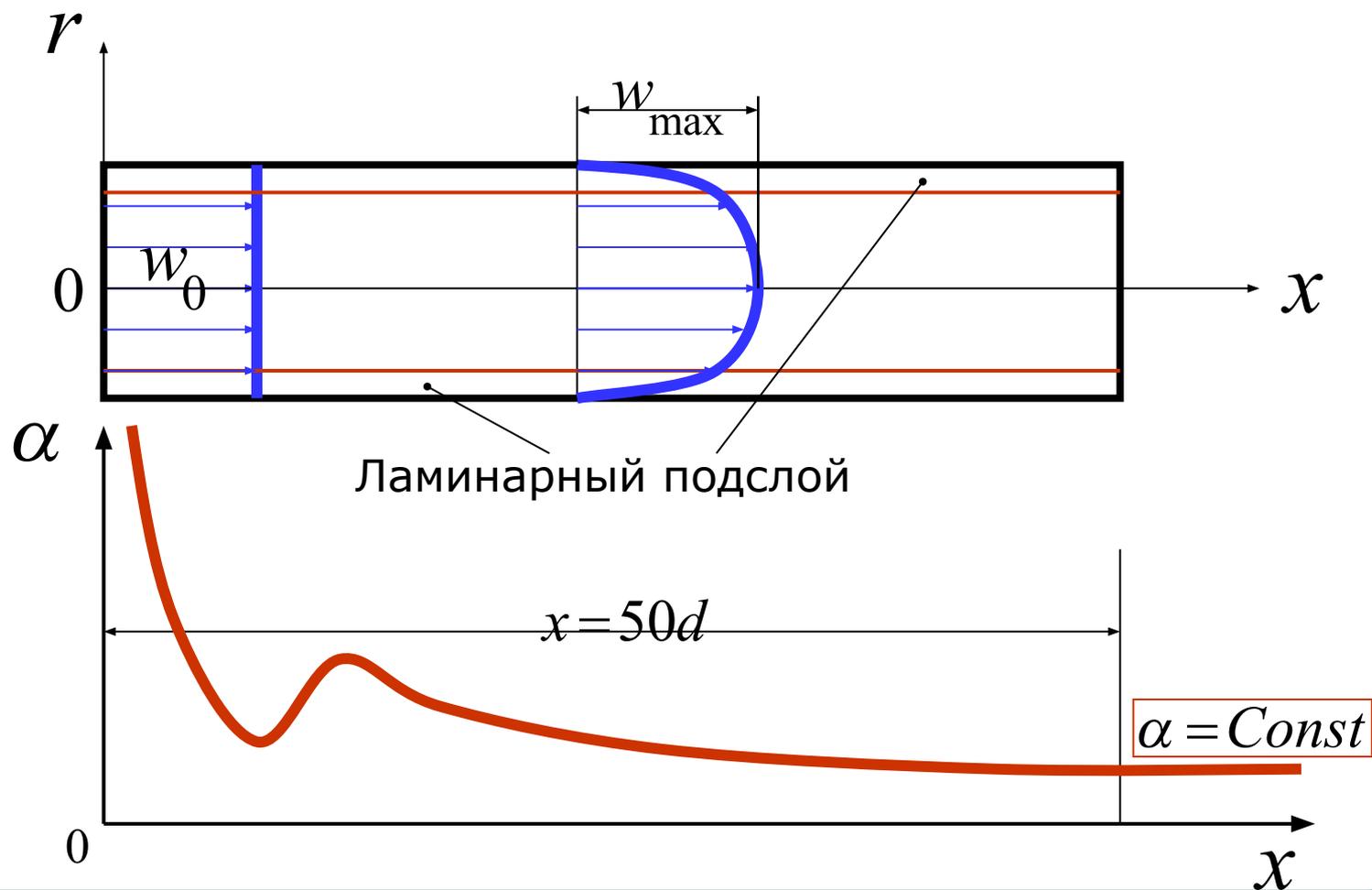
Уравнение подобия конвективной теплоотдачи для переходного режима ($Re_{ж,d} = 2300 \dots 10^4$):
при вынужденном движении жидкости

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

Поправка ε_ℓ для ламинарного режима

$\frac{\ell}{d}$	1	2	5	10	15
ε_ℓ	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18
$\frac{\ell}{d}$	20	30	40	50	-
ε_ℓ	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 ε_{ℓ} - 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)

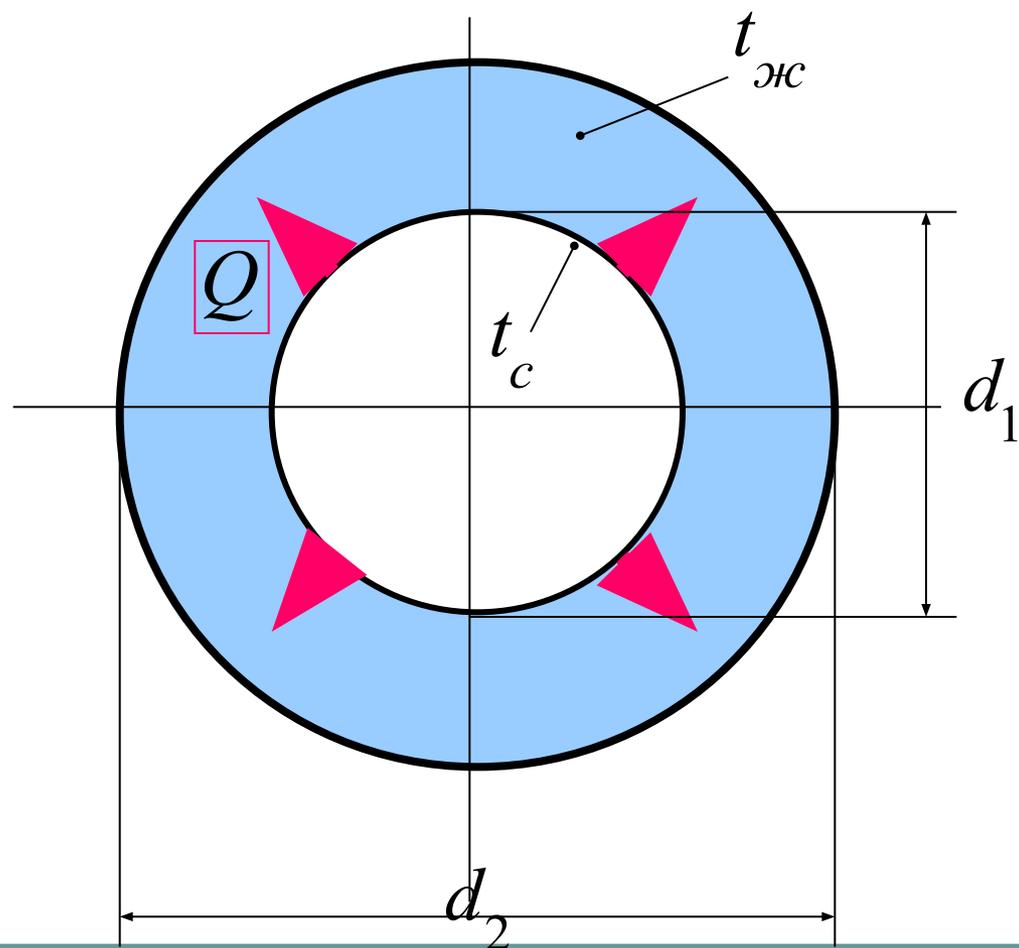
Поправка ε_ρ для турбулентного режима

$Re_{ж,d}$	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 ε_ℓ для турбулентного режима

$Re_{ж,d}$	ℓ/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:

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

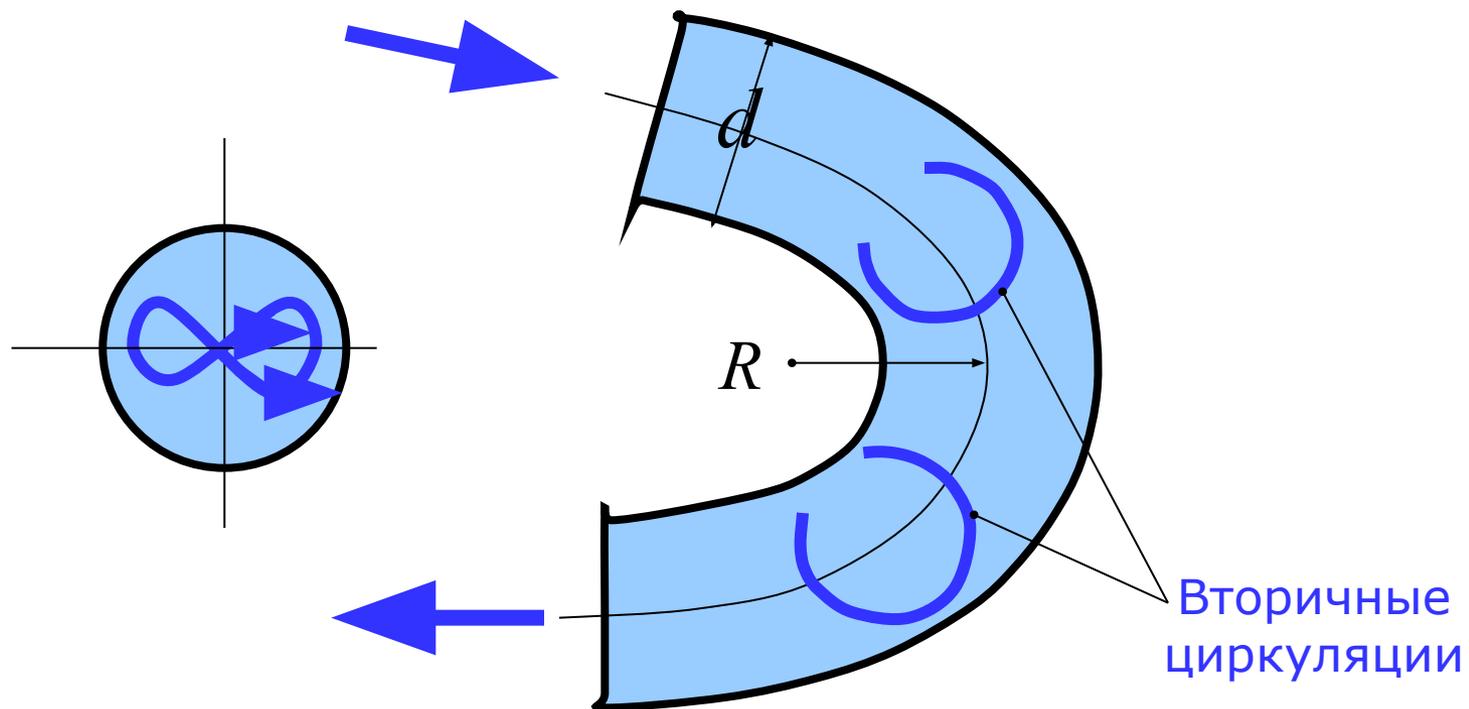
где d_1, d_2 - соответственно наружный диаметр внутренней трубы и внутренний диаметр наружной трубы, м;

$d_3 = d_2 - d_1$ - 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 $d/R \geq 8 \cdot 10^4$: $Re'_{кр1} \approx \frac{16,4}{\sqrt{d/R}}$.

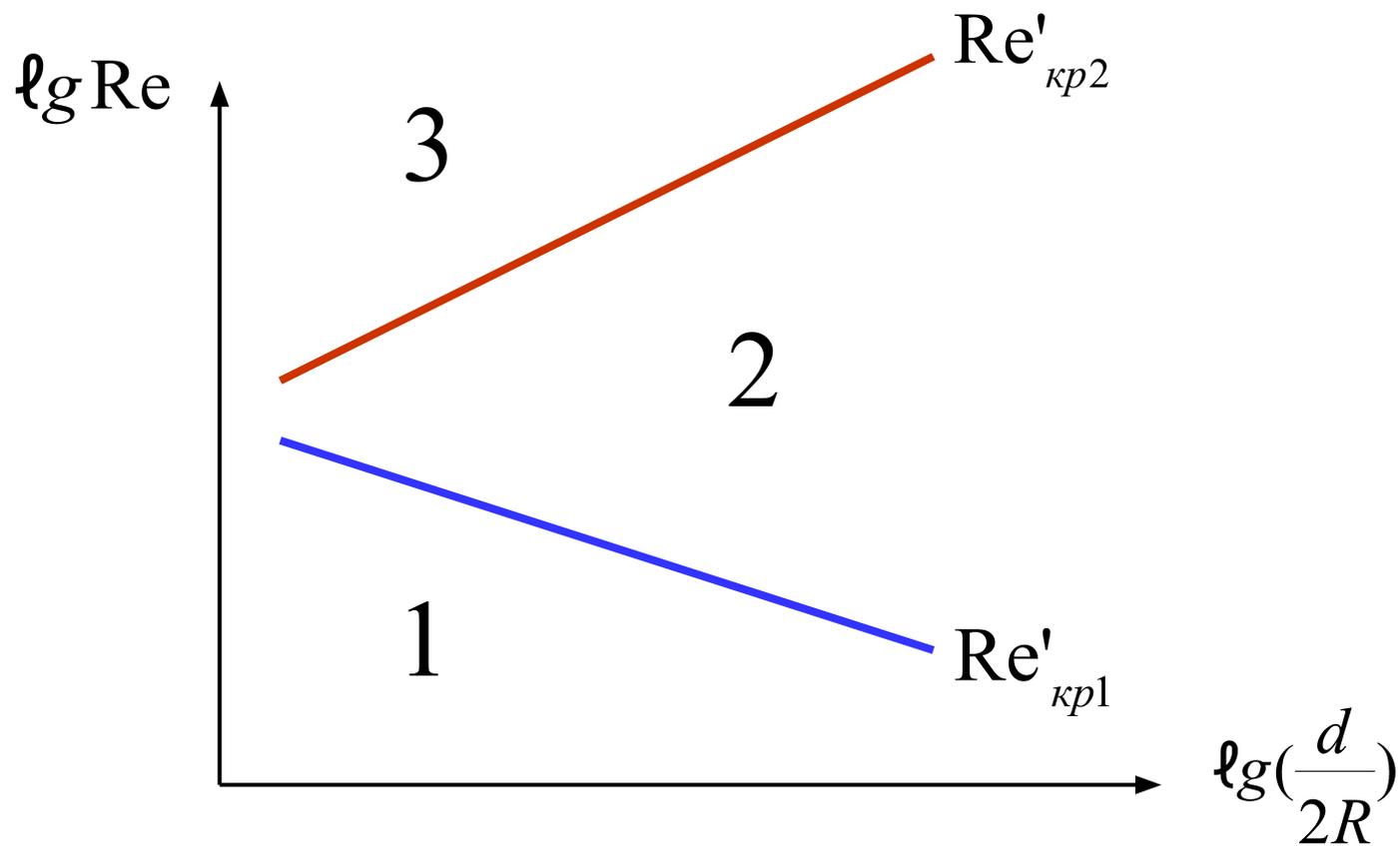
Переход к турбулентному режиму течения жидкости в изогнутых трубах также происходит раньше, чем в прямых:

$Re'_{кр2} < (Re_{кр2} = 10^4)$.

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