



## **ЛЕКЦИЯ №7**

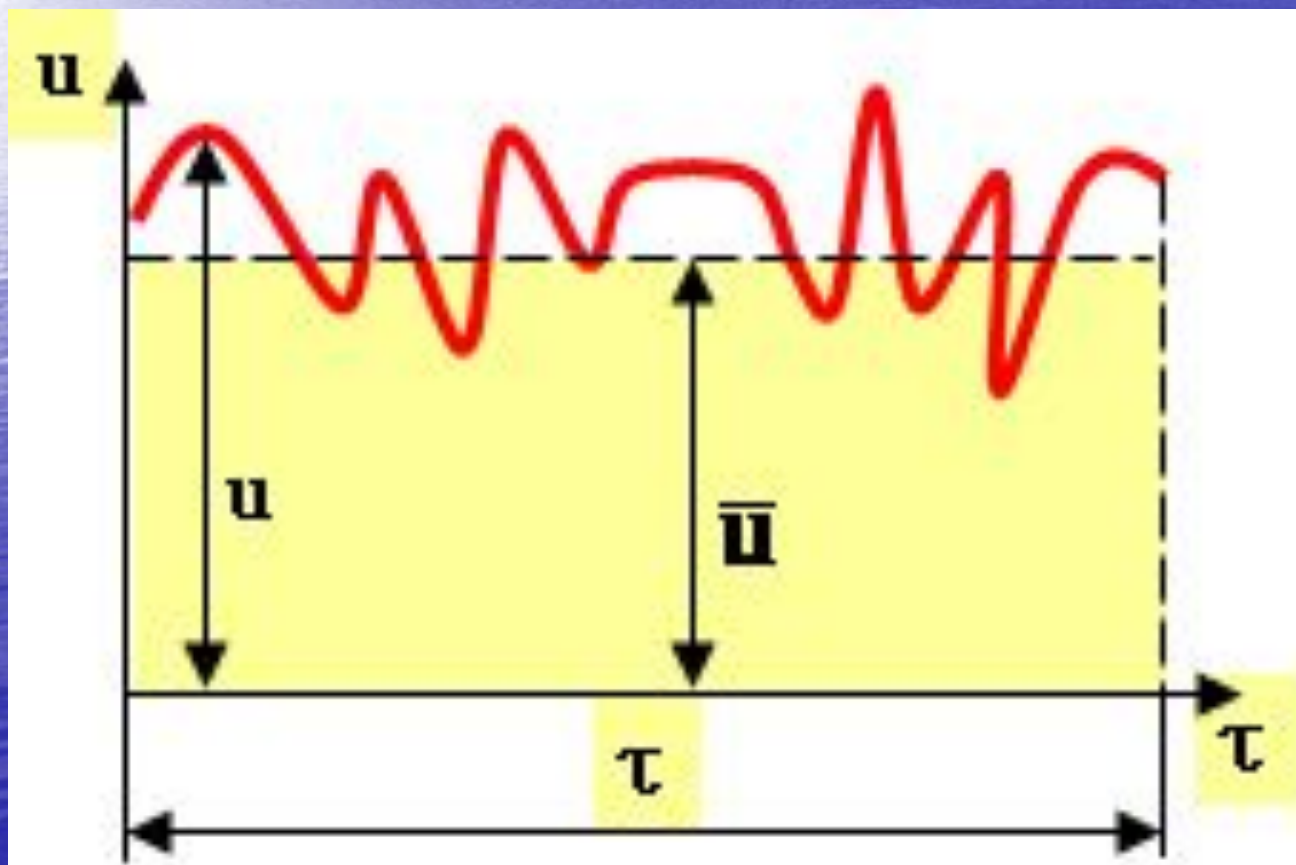
# **РАВНОМЕРНОЕ ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ**

# ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Особенности турбулентного движения. Распределение осредненных скоростей по сечению.
2. Потери напора в трубах. Понятие о шероховатости стенок. Графики Никурадзе и Мурина. Гидравлически гладкие и шероховатые трубы.
3. Формулы для определения гидравлического коэффициента Дарси и области их применения.

# ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

Пульсация скорости в турбулентном  
потоке

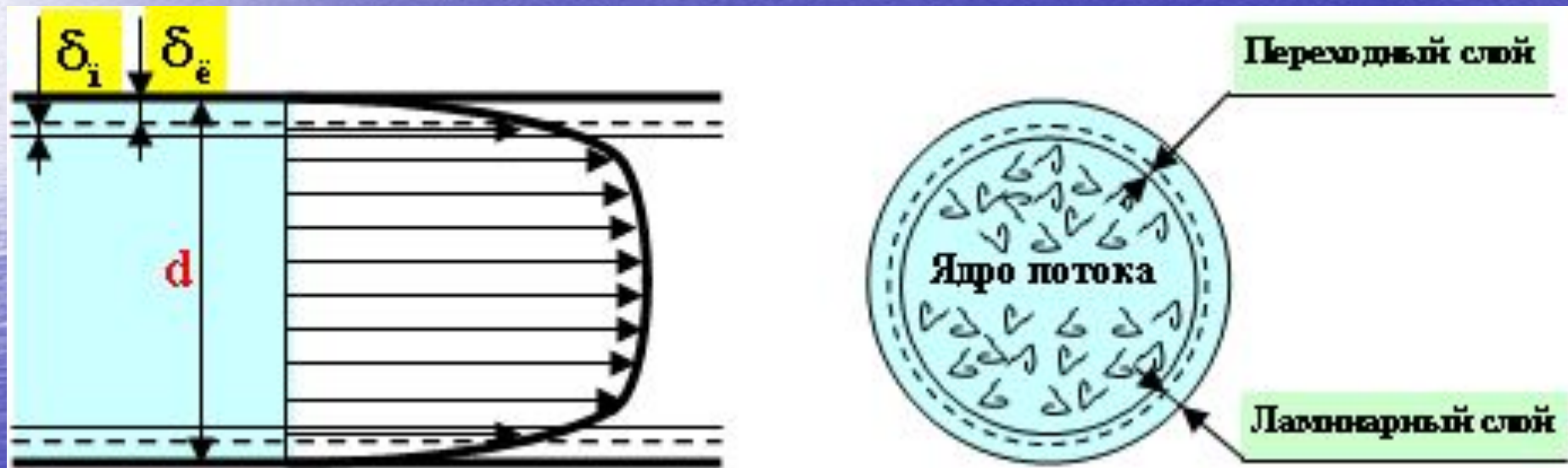


$$\bar{u} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u d\tau$$

$$u = \bar{u} + u'$$

# ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

Структура турбулентного  
потока



$$\delta_{\text{л}} \approx 30 \frac{d}{\text{Re} \sqrt{\lambda}}$$

# ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

Основные параметры турбулентного потока

$$\theta = \mu (du/dy) + \rho \cdot l^2 (d\bar{u}/dy)^2$$

$$\theta_{\text{л}} = \mu (du/dy)$$

Касательные напряжения в ламинарном потоке

$$\theta_{\text{т}} = \rho \cdot l^2 (d\bar{u}/dy)^2$$

Касательные напряжения в турбулентном потоке

$$\theta_{\text{т}} = \eta (d\bar{u}/dy)$$

$$\eta = \rho \cdot l^2 (d\bar{u}/dy)$$

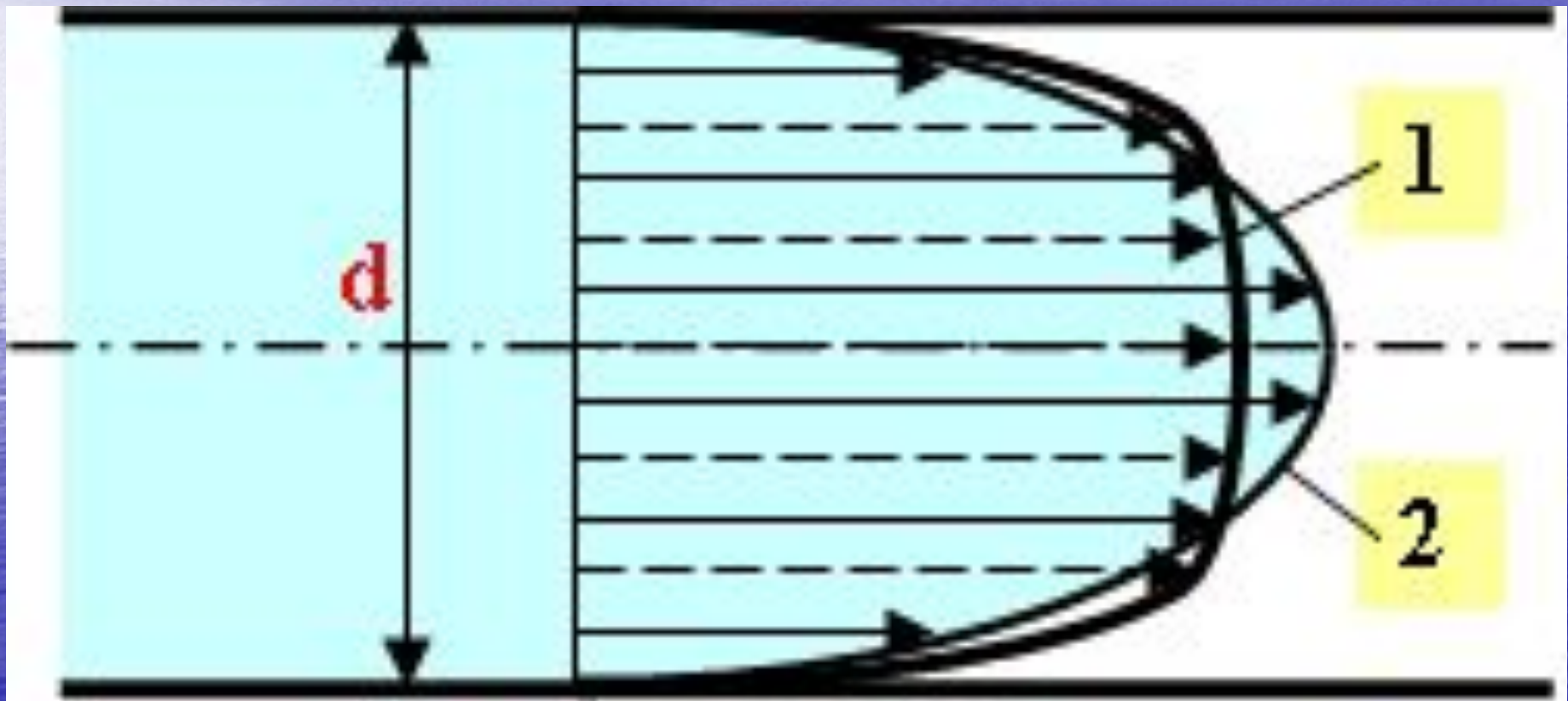
Коэффициент турбулентной (виртуальной) вязкости

$$\frac{u}{u_{\text{д}}} = 5,5 + 5,75 \lg \frac{u_{\text{д}} y}{\nu}$$

Логарифмическая формула распределения скоростей при турбулентном режиме течения жидкости

# ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

Распределение скоростей по сечению круглой трубы

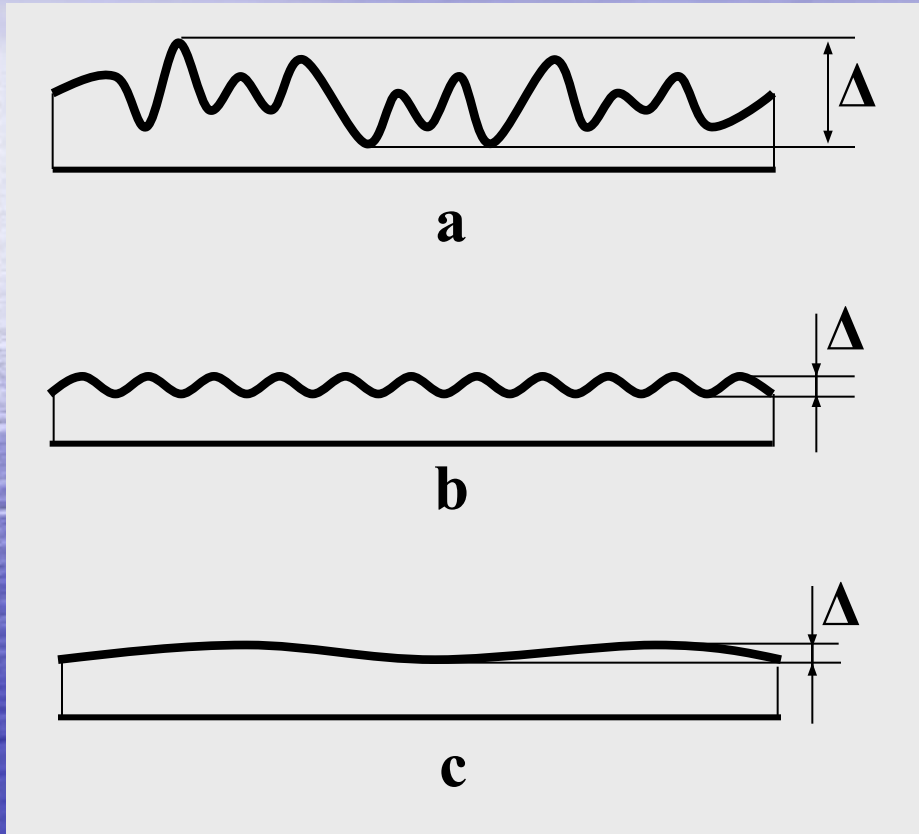


Турбулентный поток – 1

Ламинарный поток – 2

# ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

## Понятие о гидравлической шероховатости



$\Delta$

Абсолютная шероховатость

$$\Delta_3 = \varphi \Delta$$

Эквивалентная шероховатость

$\Delta/d$

Относительная шероховатость

$d/\Delta$

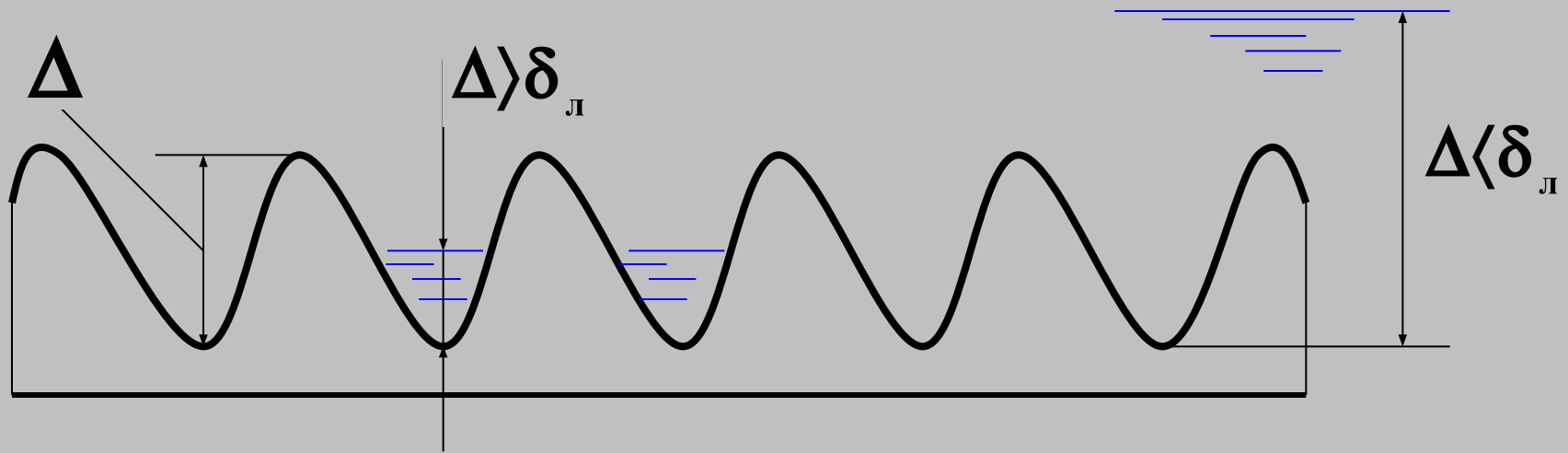
Относительная гладкость

$$\lambda = f(d, w, \rho, \mu, \Delta)$$

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{\Delta}{d}\right)$$

Виды шероховатости: а – неравномерная;  
b – равномерная; c – волнистая

# ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ



$\Delta \langle \delta_{\text{л}} \rangle$

Гидравлически гладкая труба

$\Delta \rangle \delta_{\text{л}}$

Гидравлически шероховатая труба



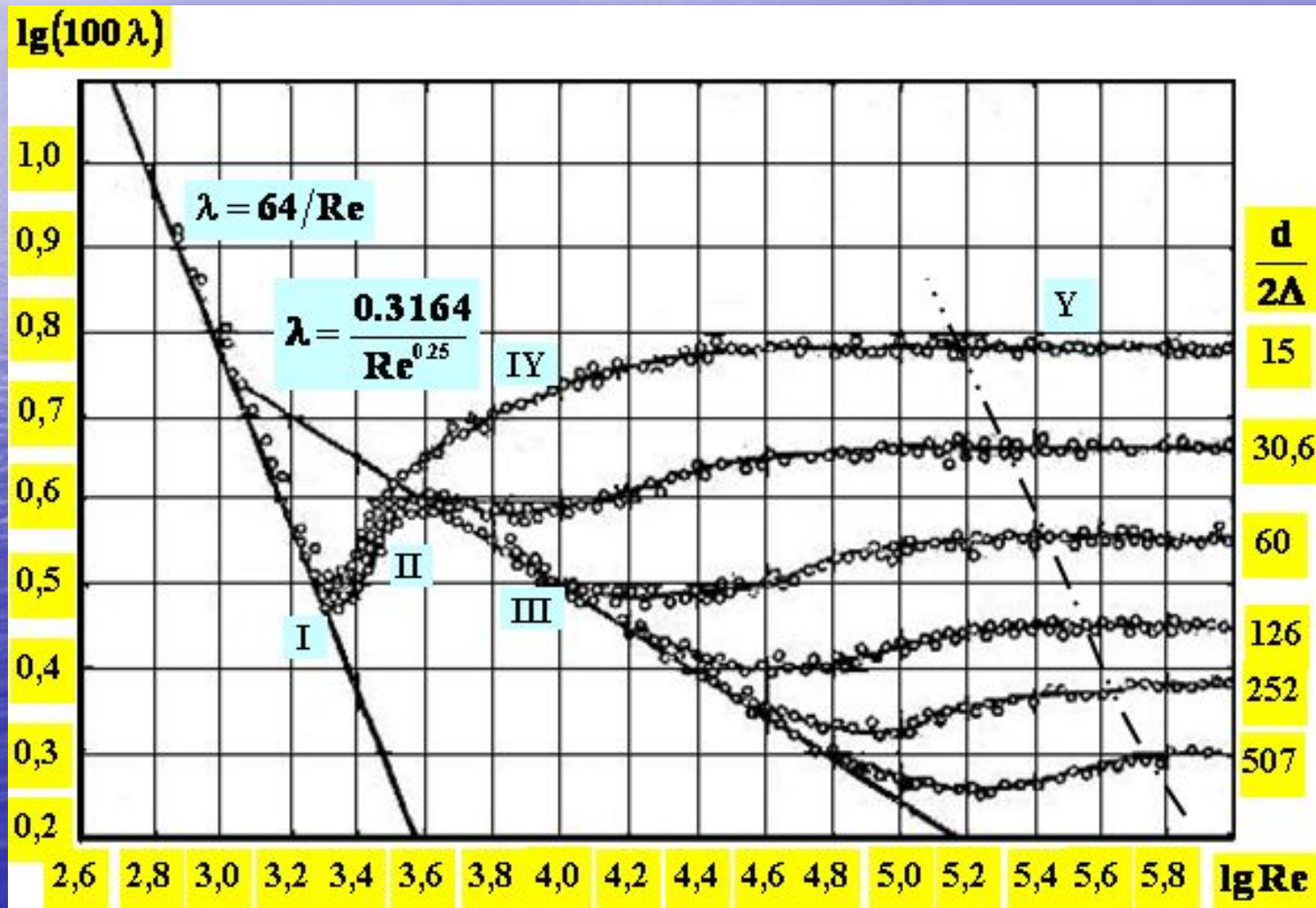
# ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

Функциональные зависимости для определения коэффициента гидравлического сопротивления

I зона	$\lambda = 64/\text{Re}$	Ламинарный режим движения жидкости
II зона	$\lambda = f(1/\text{Re}^{0,25\div 1})$	Переходная зона от ламинарного движения жидкости к турбулентному движению с гидравлически гладкими трубами
III зона	$\lambda = f(1/\text{Re}^{0,25})$	Турбулентный режим, зона гидравлически гладких труб
IV зона	$\lambda = f(1/\text{Re}^{0,25}, \Delta/d)$	Турбулентный режим, переходная зона $\Delta \approx \delta_{\text{л}}$
V зона	$\lambda = f(1/\text{Re}^{0,25})$	Турбулентный режим, зона гидравлически шероховатых труб

# ТУРБУЛЕТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

График Никурадзе



# ТУРБУЛЕТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

I зона

Ламинарный режим  
движения жидкости

$$0 < Re < 2000$$

$$\lambda = 64 / Re$$

# ТУРБУЛЕТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

II зона

Переход от ламинарного движения жидкости к турбулентному движению с гидравлически гладкими трубами

$$2000 < Re < 4000$$

$$\lambda = 2,7 / Re^{0,53}$$

# ТУРБУЛЕТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

III зона      Турбулентный режим,  
гидравлически гладкие трубы

$$4000 < \text{Re} < (10 \div 20) \frac{d}{\Delta}$$

$$\lambda = 0,3164 / \text{Re}^{0,25}$$

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg \text{Re} - 1,52)^2}$$

# ТУРБУЛЕТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

**IV зона**

Турбулентный режим, переход от гидравлически гладких труб к гидравлически шероховатым трубам

$$(10 \div 20) \frac{d}{\Delta} \langle \text{Re} \rangle \langle (500 \div 560) \frac{d}{\Delta} \rangle$$

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$$

# ТУРБУЛЕТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

Υ зона

Турбулентный режим, гидравлически шероховатые трубы

$$Re > (500 \div 560) \frac{d}{\Delta}$$

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$$

# ТУРБУЛЕТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

Потери напора на трение в трубах при турбулентном режиме. Формула Шези

$$h_1 = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g} \Rightarrow d = 4R \Rightarrow h_1 = \lambda \frac{l}{4R} \frac{w^2}{2g}$$

$$w = \sqrt{\frac{8g}{\lambda} R \frac{h_1}{l}}$$

$$c = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$$

$$I = \sqrt{\frac{h_1}{l}}$$

$$w = c \sqrt{RI}$$

$$c = \frac{1}{n} R^y$$

$$0,1 < R < 1 \Rightarrow y \approx 1,5 \sqrt{n}$$

$$1 < R < 3 \Rightarrow y \approx 1,3 \sqrt{n}$$