

# ДИСЦИПЛИНА «ГИДРОГАЗОДИНАМИКА»

ЛЕКЦИЯ **3**. ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ. ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ. РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ. КЛАССИФИКАЦИЯ ТРУБОПРОВОДОВ.

**20.03.01 «ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»**

**ПРЕПОДАВАТЕЛЬ: СТАРШИЙ ПРЕПОДАВАТЕЛЬ**

**МОСТОВЕНКО ЛЮБОВЬ ВЛАДИМИРОВНА**

# ПЕРЕЧЕНЬ ЛЕКЦИЙ

**Лекция 1.** Введение. Общие сведения о жидкости. Жидкость как физическое тело. Основные физические свойства жидкостей. Неньютоновские жидкости. Основы гидростатики. Силы, действующие в жидкости. Свойства гидростатического давления. Основное уравнение гидростатики.

**Лекция 2.** Дифференциальное уравнение равновесия жидкости. Сообщающиеся сосуды. Сила давления жидкости на плоскую поверхность, погружённую в жидкость. Сила давления на криволинейную поверхность, погружённую в жидкость. Равновесие твёрдого тела в жидкости. Уравнение неразрывности жидкости. Система дифференциальных уравнений Навье – Стокса. Гидравлические сопротивления.

**Лекция 3.** Потери напора на местных гидравлических сопротивлениях. Потери напора по длине. Режимы движения жидкости. Истечение жидкости из отверстий и насадков. Классификация трубопроводов.

# ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

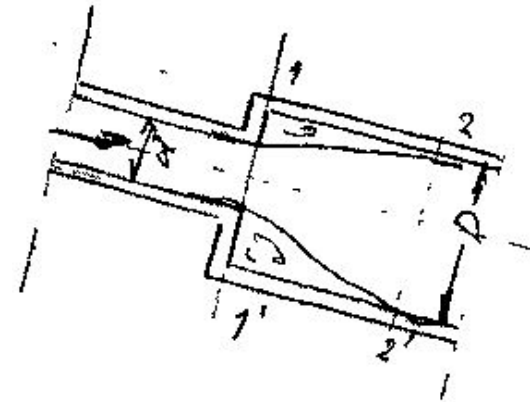
## Внезапное расширение русла.

$$v_1 S_1 = v_2 S_2. \quad 1$$

$$S_1 = \frac{\pi d^2}{4}, \quad S_2 = \frac{\pi D^2}{4}. \quad 2$$

$$\Delta h_{\text{сп}} = \frac{v_1^2}{2g} \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)^2 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g}. \quad 3$$

$$\xi_{\text{сп}} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2. \quad 4$$



Таким образом, можно сказать, что потеря напора при внезапном расширении потока равна скоростному напору, соответствующему потерянной скорости.

$$\Delta h_{\text{сп}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

5



# ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

## Плавное расширение русла (диффузор).

$$\Delta h_{\text{диф}} = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{оп}}. \quad 1$$

$$\xi_{\text{диф}} = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \left( 1 - \frac{1}{\left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2} \right) + k_o \left( 1 - \frac{1}{\frac{S_2}{S_1}} \right) \quad 2$$

$$k_o = 3,2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad 3$$

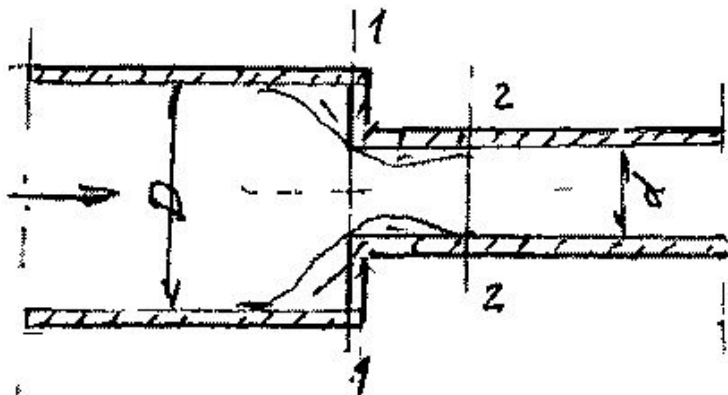


- поправочный коэффициент, зависящий от условий расширения потока в диффузоре.



# ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

## Внезапное сужение канала.



Коэффициент потерь напора при гидравлическом сопротивлении внезапного сужения потока можно определить по эмпирической зависимости, предложенной И.Е. Идельчиком:

$$\xi_{\text{сж}} = 0,5 \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right)$$

$\frac{S_2}{S_1}$	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80
$\xi_{\text{сж}}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10



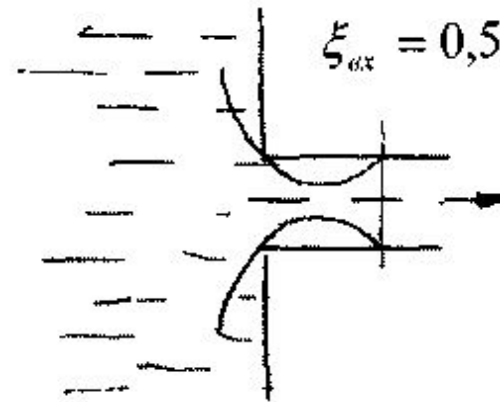
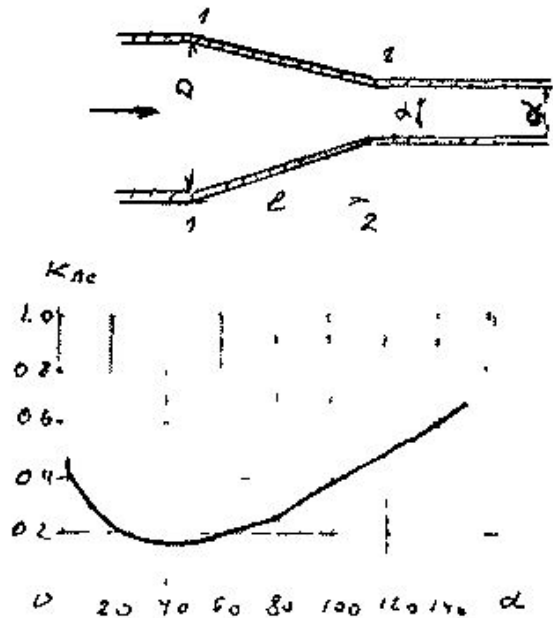


# ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

## Плавное сужение канала (конфузор)

$$\xi_{\text{конф}} = \frac{\lambda}{8 \sin \alpha} \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right)$$

## Нормальный вход в трубу.



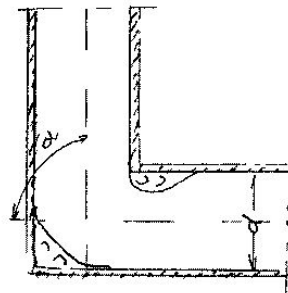
# ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ



Выход из трубы в покоящуюся жидкость.



Внезапный поворот канала.

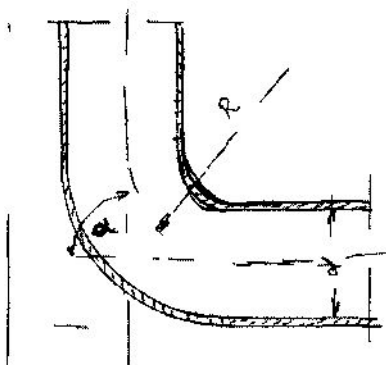


$$\xi_{\text{вых}} = 1$$

$$\xi_{\text{оп}} = 0,95 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2,05 \sin^4 \frac{\alpha}{2}$$

$\alpha^\circ$	30	40	50	60	70	80	90
$\xi_{\text{оп}}$	0,20	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	1,10

Плавный поворот канала



$r/R$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\xi_{\text{нп}}$	0,131	0,138	0,158	0,206	0,294	0,440	0,661	0,977	1,408	1,978

$$\xi_{\text{нп}} = \left( 0,70 + 0,35 \frac{\alpha}{90} \right) \xi_{90^\circ} \quad 2$$

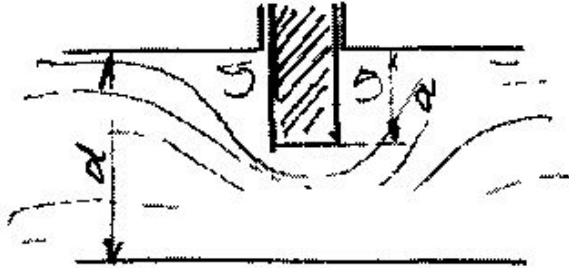
$$\xi_{\text{нп}} = 0,9 \sin \alpha \xi_{90^\circ} \quad 3$$

$$\xi_{\text{нп}} = 0,51 + 0,19 \frac{d}{R}$$

При  $\alpha \leq 70^\circ$  :

# ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

## Задвижки.



$a/d$	Полное открытие	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
$\xi$ ,	0,12	0,26	0,81	2,06	5,52	17,0	97,8

## Краны.

$\alpha$	5	10	20	30	40	50	60	70
$\xi_{кр}$	0,05	0,29	1,56	5,47	17,3	52,6	206	486

## Обратные клапаны и фильтры.



# ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ



$$f(l_1, l_2, l_3, \Delta, v, \Delta p, \gamma, \rho, \mu, \sigma, K) = 0, \quad 1$$

$$[i] = [l]^x [v]^y [\rho]^z \quad 2$$

$$\frac{[l]^x [v]^y [\rho]^z}{[i]} = L^0 M^0 T^0, \quad 3$$

$$[l]^x [v]^y [\rho]^z [i]^{-1} = L^0 M^0 T^0 \quad 4$$

Параметр  $\Delta$ .

$$L^x \left(\frac{L}{T}\right)^y \left(\frac{M}{L^3}\right)^z (L)^{-1} = L^0 M^0 T^0 \quad 5$$

$$x + y - 3z - 1 = 0, \quad 6$$

$$z = 0,$$

$$-y = 0.$$

$$x = 1, y = 0, z = 0.$$

$$\Pi_\Delta = \frac{l}{\Delta} \text{ или } \frac{\Delta}{l} \quad 8$$

Параметр  $\gamma$ .

$$L^x \left(\frac{L}{T}\right)^y \left(\frac{M}{L^3}\right)^z \left(\frac{M}{L^2 T^2}\right)^{-1} = L^0 M^0 T^0, \quad 9$$

$$x + y - 3z + 2 = 0, \quad 10$$

$$z - 1 = 0$$

$$-y + 2 = 0$$

$$x = -1, y = 2, z = 1 \quad 11$$

$$\Pi_\gamma = \frac{\rho v^2}{\gamma} = \frac{v^2}{gl} \quad 12$$

число Фруда Fr.

Параметр  $\mu$ .

$$L^x \left(\frac{L}{T}\right)^y \left(\frac{M}{L^3}\right)^z \left(\frac{M}{LT}\right)^{-1} = L^0 M^0 T^0 \quad 13$$

$$x + y - 3z + 1 = 0,$$

$$z - 1 = 0$$

$$-y + 1 = 0$$

$$x = 1, y = 1, z = 1. \quad 14$$

$$\Pi_\mu = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\nu} \quad 15$$

число Рейнольдса, Re

# ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ



$$1 \quad \Pi_{\Delta p} = \frac{\rho v^2}{\Delta p} \quad \text{или} \quad \text{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho v^2} \quad 2$$

$$\Pi_{\sigma} = \frac{v^2 l}{\sigma} \quad 3$$

$$\Pi_{\kappa} = \frac{v^2}{\frac{\kappa}{\rho}} \quad 4$$

$$f\left(\frac{l_1}{l}, \frac{l_2}{l}, \frac{l_3}{l}, \frac{\Delta}{l}, \text{Eu}, \text{Fr}, \text{Re}, \text{We}, \text{Ca}\right) = 0 \quad 5$$

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} = f\left(\frac{l_1}{l}, \frac{\Delta}{l}, \text{Fr}, \text{Re}\right) \quad 6$$

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} = f\left(\frac{l}{4R_c}, \frac{\Delta}{4R_c}, \text{Fr}, \text{Re}\right) = f\left(\frac{\Delta}{4R_c}, \text{Fr}, \text{Re}\right) \frac{l}{4R_c} \quad 7$$

$$\frac{\Delta p}{\rho} = g \frac{\Delta p}{\gamma} = gh_{mp} \quad 8$$

$$h_{mp} = 2f\left(\frac{\Delta}{4R_c}, \text{Fr}, \text{Re}\right) \frac{l}{4R_c} \frac{v^2}{2g} \quad 9$$

$$2f\left(\frac{\Delta}{4R_c}, \text{Fr}, \text{Re}\right) = \lambda$$

коэффициент сопротивления трения по длине или коэффициентом Дарси

# ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ



Коэффициент потерь напора по длине будет равен:

$$\xi_{01} = \lambda \frac{l}{d} \quad 1$$

Запишем формулу Дарси-Вейсбаха в виде:

$$v = \sqrt{\frac{8gR_c h_{01}}{\lambda L}} \quad 2$$

$$3 \quad i = \frac{h_{01}}{L}$$

Гидравлический уклон

$$4 \quad c = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$$

коэффициент Шези

$$5 \quad v = C \sqrt{R i}$$

$$\sqrt{gR i} = u \quad 6$$

Тогда коэффициент трения (коэффициент Дарси):

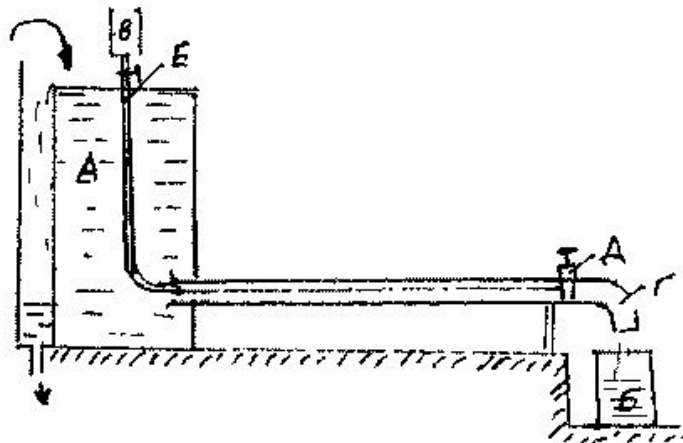
$$7 \quad \lambda = 8 \left( \frac{u_*}{v} \right)^2$$

$$8 \quad v = C \sqrt{R i}$$

$$9 \quad \sqrt{gR i} = u$$

$$10 \quad \lambda = 8 \left( \frac{u_*}{v} \right)^2$$

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

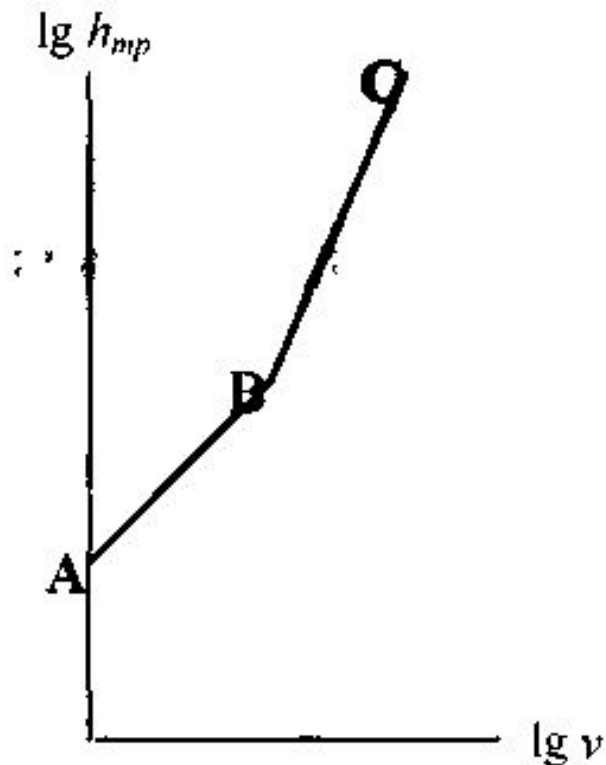


$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad \text{число Рейнольдса}$$

Число Рейнольдса оказалось безразмерной величиной, представлявшей собой отношение сил инерции к силам вязкостного трения. Была установлена и критическая величина числа Рейнольдса, при котором происходила смена режима движения жидкости  $Re_{кр}$ , она оказалась равной 2320.

# РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ

Режим движения жидкости, при котором наблюдалось плавное, слоистое движение жидкости был назван **ламинарным (слоистым)** режимом движения жидкости. Режим движения жидкости сопровождавшийся хаотическим движением частиц жидкости в потоке был назван **турбулентным**



$$\lg h_{mp} = \lg b + k \lg v$$

$$h_{mp} = bv^k$$

$$k = \operatorname{tg} 45^\circ = 1$$



# ЛАМИНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ

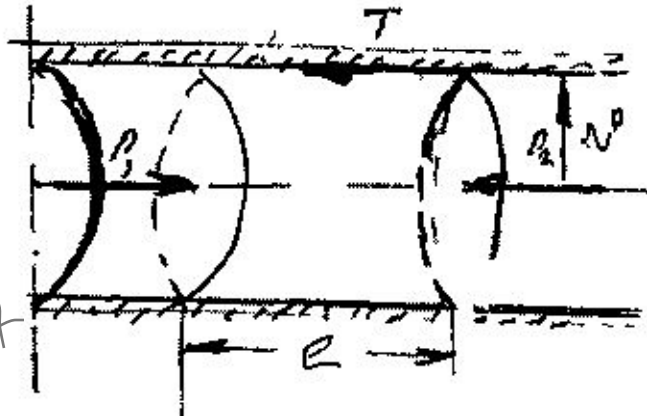
## Касательные напряжения.

$$P_1 - P_2 - T = 0 \quad \checkmark$$

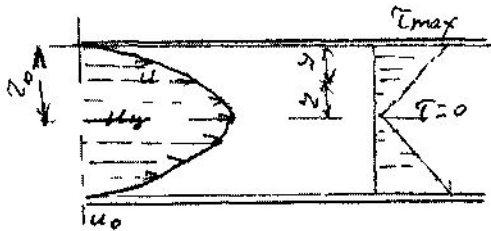
$$2 P_1 \cdot \pi r_0^2 - P_2 \cdot \pi r_0^2 - \tau_0 \cdot 2\pi r_0 l = 0,$$

$$\tau_0 = \frac{P_1 - P_2}{l} \cdot \frac{r_0}{2} \quad \} \quad \tau = \frac{P_1 - P_2}{l} \cdot \frac{r}{2} \quad 4$$

$$\tau = \tau_0 \cdot \frac{r}{r_0} \quad 5$$



## Распределение скоростей в ламинарном потоке.



$$\tau = -\mu \frac{du}{dr} \quad 6$$

$$\frac{P_1 - P_2}{l} \cdot \frac{r}{2} = -\mu \frac{du}{dr} \quad 7$$

$$\rho g \cdot \frac{r}{2} = -\mu \frac{du}{dr} \quad 8$$

$$u_{\max} = \rho g \frac{i}{4\mu} r_0^2 \quad 11$$

$$\int_0^u du = -\rho g \frac{i}{2\mu} \int_{r_0}^r r dr \quad 9$$

$$u = \rho g \frac{i}{4\mu} (r_0^2 - r^2) \quad 10$$

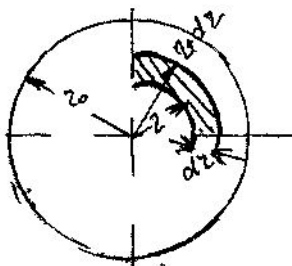


# ЛАМИНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ



## Средняя скорость движения жидкости в ламинарном потоке.

$$dQ = u dS = u \cdot 2\pi r \cdot dr \quad \left\{ \quad Q = \int_0^{r_0} u \cdot 2\pi r \cdot dr = \int_0^{r_0} \rho g \frac{i}{4\mu} (r_0^2 - r^2) \cdot 2\pi r \cdot dr \quad 2 \right.$$



$$Q = \rho g \frac{i \cdot 2\pi}{4\mu} \int_0^{r_0} (r_0^2 - r^2) \cdot r dr = \rho g \frac{\pi \cdot i}{8\mu} r_0^4 \quad 3$$

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{\rho g d^2}{32\mu} i \quad 5 \quad \text{или} \quad v = 0,5 u_{\max} \quad 4$$

## Потери напора в ламинарном потоке жидкости.

$$6 \quad i = \frac{32\rho v}{gd^2} = \frac{8w}{gdR_e} \quad gR_e l = \frac{8w}{d} = u_*^2 \quad 7$$

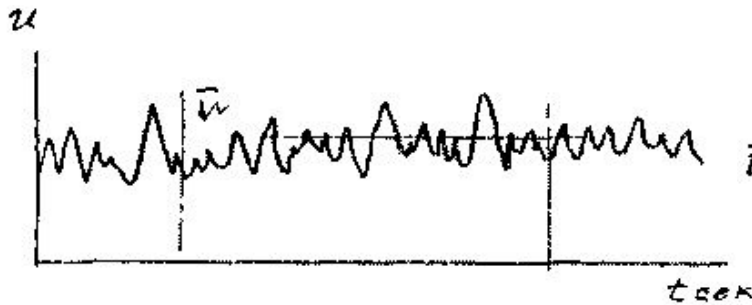
$$8 \quad \lambda = 8 \left( \frac{u_*}{v} \right)^2 = \frac{64v}{vd} = \frac{64}{Re} \quad h_{or} = \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad 9$$

формула Пуазейля  $h_{or} = \frac{32 \cdot v \cdot l \cdot v}{gd^2} \quad 10$

# ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ

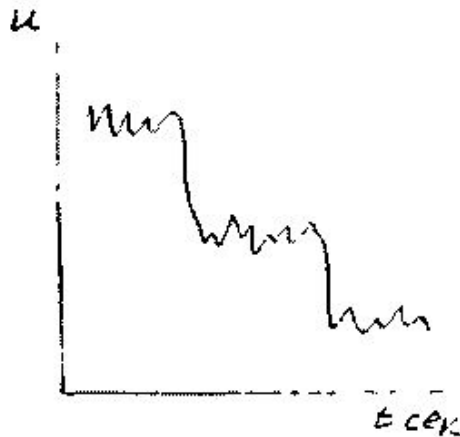


## Структура турбулентного потока.



$$\bar{u} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt$$

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





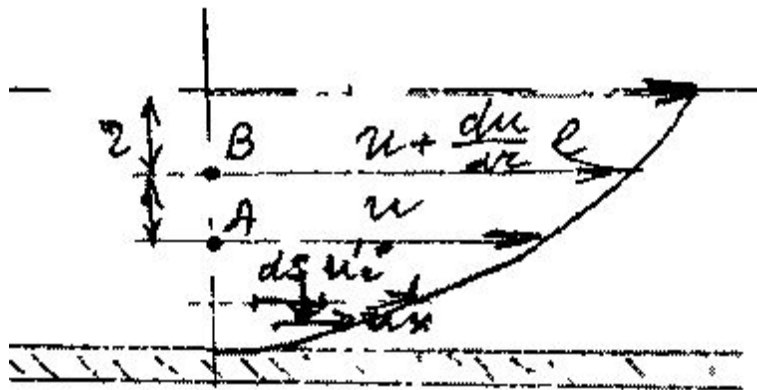
# ГИДРАВЛИЧЕСКИ ГЛАДКИЕ И ШЕРОХОВАТЫЕ ТРУБЫ



$$\frac{\delta}{d} = \frac{32,5}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \quad 1$$

## Касательные напряжения в турбулентном потоке.

$$u'_r, (u' = u'_r + u'_x), \quad 2 \quad dQ_r = u'_r \cdot dS \quad 3 \quad dM_r = \rho dQ_r \cdot dt \quad 4$$



$$dM_r \cdot u'_x = \rho dQ_r \cdot dt \cdot u'_x = \rho \cdot u'_r u'_x dS \cdot dt \quad 5$$

$$-dT \cdot dt = \rho \cdot u'_r u'_x dS \cdot dt \quad 6$$

$$\tau \cdot dS \cdot dt = -\rho \cdot u'_r u'_x dS \cdot dt, \quad 7$$

$$\tau = -\rho u'_r u'_x \quad 8$$

$$\bar{\tau} = -\rho \overline{u'_r u'_x} \quad 9$$

$$u + \frac{du}{dr} l \quad 10$$

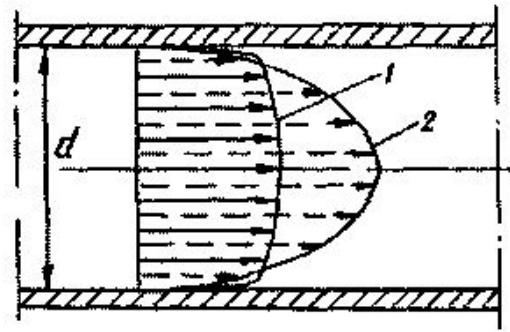
$$\bar{\tau} = -\rho \overline{u'_r u'_x} = \rho l^2 \left( \frac{d\bar{u}}{dr} \right)^2 \quad 11$$

$$\bar{\tau} = \rho l^2 \frac{d\bar{u}}{dr} \frac{d\bar{u}}{dr} = C_1 \frac{d\bar{u}}{dr} \quad 12$$

$$\bar{\tau} = -\mu \frac{d\bar{u}_s}{dr} + \rho l^2 \left( \frac{d\bar{u}_x}{dr} \right)^2 \quad 13$$



# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ПО СЕЧЕНИЮ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА.



$$du = \frac{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}}{\chi \cdot r} dr, \quad \uparrow \quad u = \frac{1}{\chi} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln r + C. \quad 2$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{u_* r}{\nu} + const \quad \} \quad \varphi = \frac{1}{\chi} \ln[\chi(\eta - \alpha) + 1] + \alpha. \quad 4$$

Потери напора на трение в турбулентном потоке жидкости.

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad 5$$

$$\lambda = \frac{1}{(1,81 \lg Re - 1,5)^2} \quad 6$$

$$\lambda = \left( \frac{0,55}{\lg \frac{Re}{8}} \right)^2 \quad 7 \quad \lambda = f\left(\frac{\Delta}{d}\right) \quad 8$$

формула Блазиуса

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{3,7d}{\Delta} = -2 \lg 0,27 \frac{\Delta}{d}, \quad 9$$

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

$$\lambda = f\left(Re, \frac{\Delta}{d}\right). \quad 12$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + 0,27 \frac{\Delta}{d} \right) \quad 13$$

$$\text{или: } \lambda = \left( 1,14 + 2 \lg \frac{d}{\Delta} \right)^{-2} \quad 10$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ \left( \frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \frac{\Delta}{d} \right] \quad 14$$



# ГРАФИК НИКУРАДЗЕ

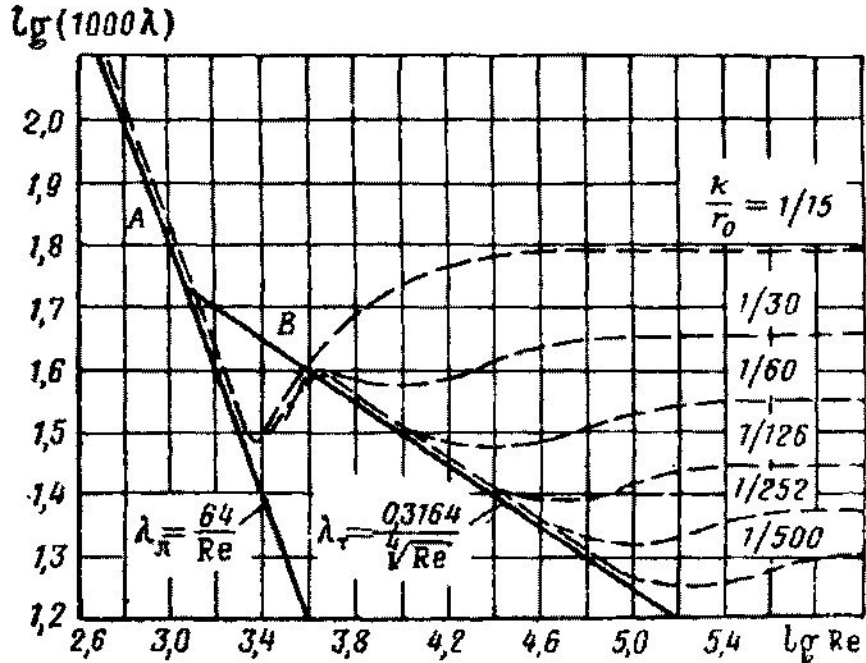


График И.И. Никурадзе

I ламинарное течение жидкости  
(прямая А),  $\lg Re = 2,6 - 3,1$

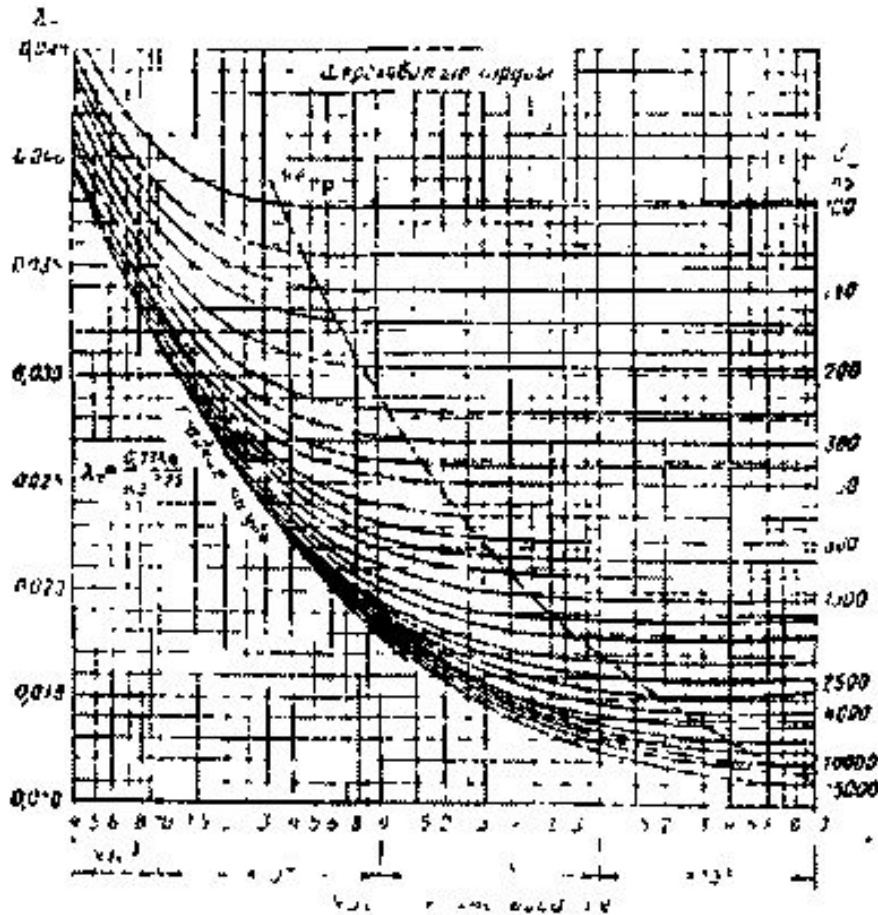
II турбулентное течение жидкости в  
гидравлически гладких трубах (прямая  
В),  $\lg Re = 3,1 - 3,5$

III переходная область течения  
жидкости,  $\lg Re = 3,5 - 5,0$

IV квадратичная область течения  
жидкости,  $\lg Re > 4,6 - 5,0$ .

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

# КАВИТАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ



Процесс образования пузырьков пара в жидкости носит название **паровой кавитации**, образование пузырьков газа вызывает **газовую кавитацию**.

$$K = \frac{P_0 - P_{нас}}{\rho \frac{v_0^2}{2g}}$$

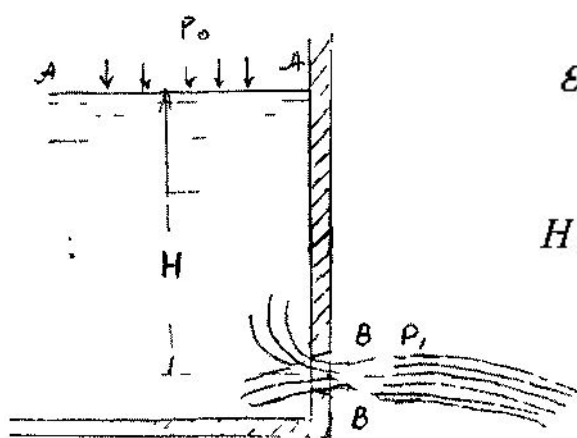


# ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ



## Отверстие в тонкой стенке

Истечение жидкости из отверстия в тонкой стенке при установившемся движении (жидкости).



$$\varepsilon = \frac{S_{сж}}{S}, \quad 1 \quad H + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = 0 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + h_{mp} \quad 2$$

$$H = \frac{\alpha v^2}{2g} + h_{mp}, \quad 3 \quad H = \frac{\alpha v^2}{2g} + \sum \xi \frac{v^2}{2g} = \frac{v^2}{2g} (\alpha + \sum \xi) \quad 4$$

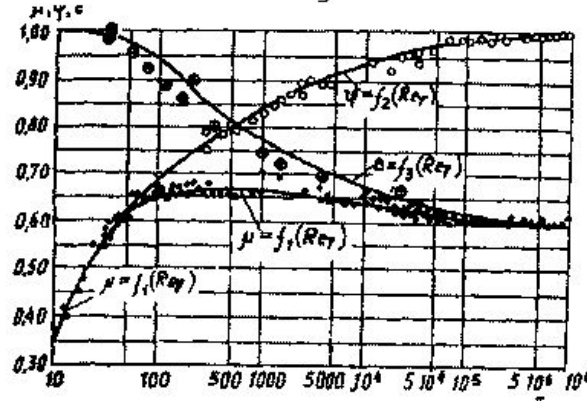
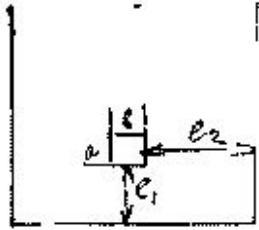
$$5 \quad \sum \xi = \xi_{mc} \quad v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{mc}}} \sqrt{2gH} \quad 6$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{mc}}}, \quad \text{тогда:} \quad 7$$

$$8 \quad Q = S_{сж} v = \varepsilon S \cdot v = \mu S \sqrt{2gH}, \quad 9 \quad v = \varphi \sqrt{2gH}.$$

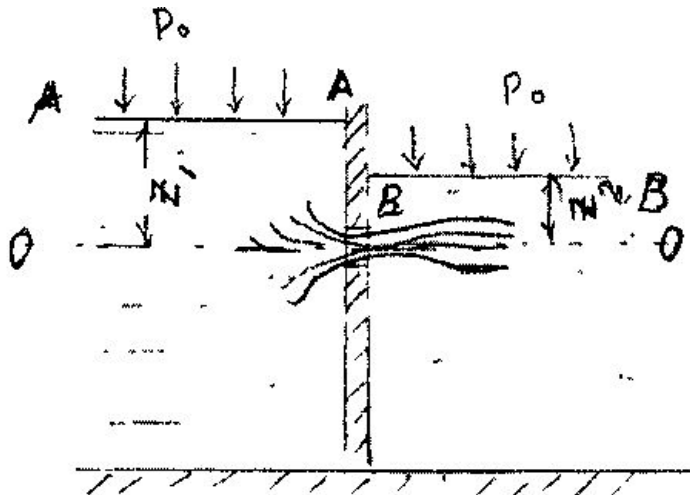


# ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ



$$\mu = \frac{Q_{\text{факт}}}{s\sqrt{2gH}} \quad 1$$

## Истечение жидкости через затопленное отверстие.



$$z_1 = z_2 + \sum h_{mp} \quad 2$$

$$z = z_1 - z_2 = \sum \xi_{mp} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad 3$$

$$h_1 = \xi_{mc} \frac{v^2}{2g}, \quad h_2 = \frac{\alpha_1 v^2}{2g} \quad 5$$

$$Q = \varepsilon \cdot \varphi \cdot s \sqrt{2gz}$$

$$Q = \mu \cdot s \sqrt{2gz}$$

$$z = \sum \xi_{mp} \cdot \frac{v^2}{2g} = (\alpha_1 + \xi_{mc}) \frac{v^2}{2g} \quad \left( v = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1 + \xi_{mc}}} \sqrt{2gz} \right) \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1 + \xi_{mc}}} \quad 6$$

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ **25-28**

