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

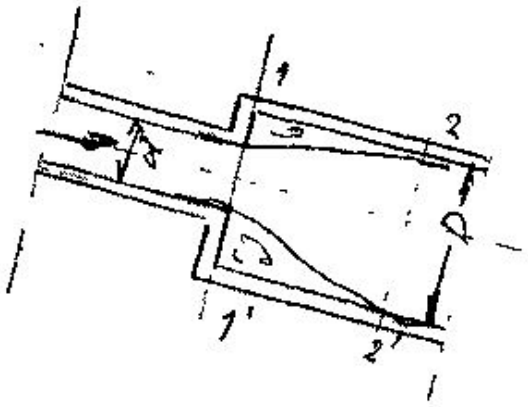
Лекция 1. Введение. Общие сведения о жидкости. Жидкость как физическое тело. Основные физические свойства жидкостей. Неньютоновские жидкости. Основы гидростатики. Силы, действующие в жидкости. Свойства гидростатического давления. Основное уравнение гидростатики.

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.



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

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

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

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

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

$$\Delta h_{вр} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad 5$$

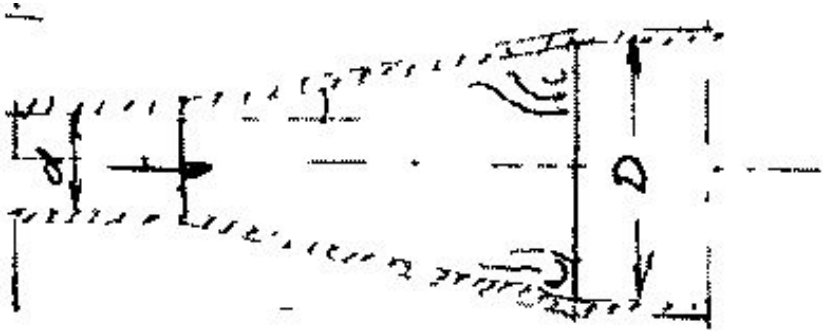
ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

Плавное расширение русла (диффузор).

$$\Delta h_{диф} = \Delta h_{тр} + \Delta h_{вр} \quad (1)$$

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

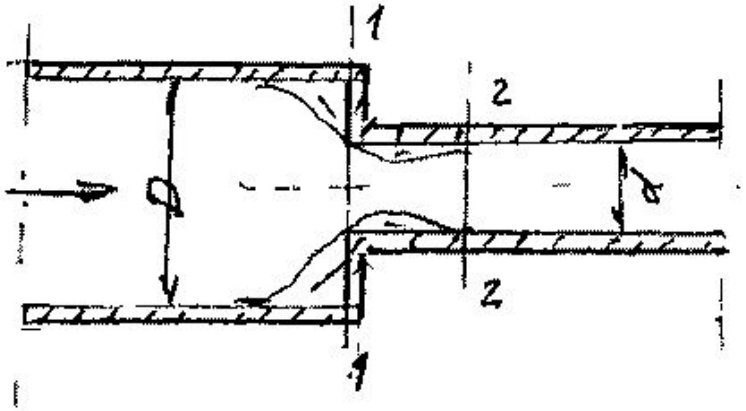
$$k_o = 3{,}2tg\frac{\alpha}{2}\sqrt{tg\frac{\alpha}{2}} \quad (3)$$



- 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:

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

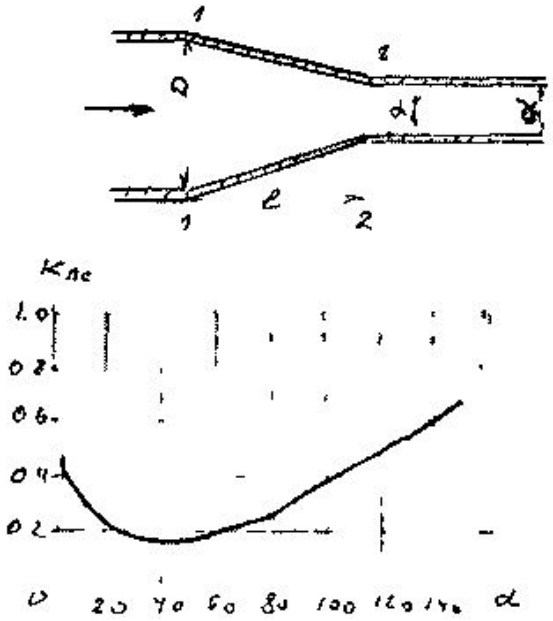
$\frac{S_2}{S_1}$	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80
$\xi_{вс}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10

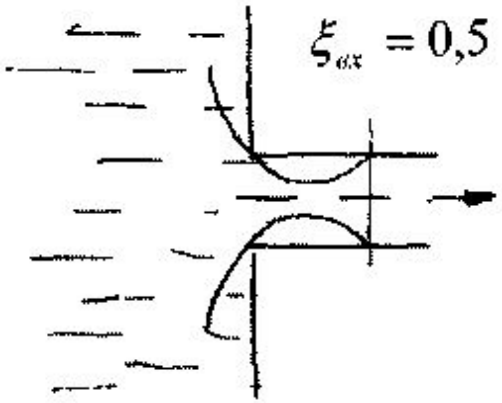
ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

Плавное сужение канала (конфузор)

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

Нормальный вход в трубу.



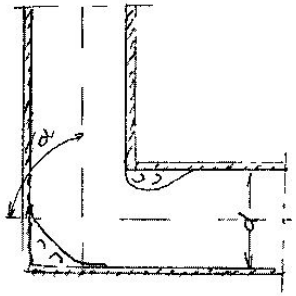


ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

Выход из трубы в покоящуюся жидкость.

$$\xi_{вых} = 1$$

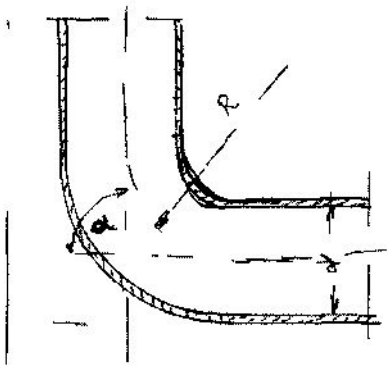
Внезапный поворот канала.



$$\xi_{вн} = 0{,}95\sin^2\frac{\alpha}{2} + 2{,}05\sin^4\frac{\alpha}{2}. \quad (1)$$

$\alpha°$	30	40	50	60	70	80	90
$\xi_{вн}$	0,20	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	1,10

Плавный поворот канала



При $\alpha \le 70°$:

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

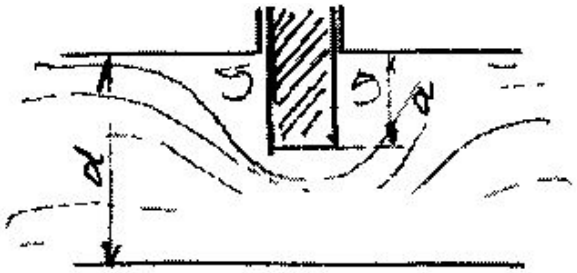
$$\xi_{пл} = \left(0{,}70 + 0{,}35\frac{\alpha}{90}\right)\xi_{90°} \quad (2)$$

$$\xi_{пл} = 0{,}9\sin\alpha\,\xi_{90°} \quad (3)$$

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

ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

Задвижки.



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

Краны.

α	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

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

$$[\mathrm{i}]=[l]^x[v]^y[\rho]^z$$ 2

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

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

Параметр *Δ*.

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

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

$$z=0,$$

$$-y=0.$$ 7

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

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

Параметр *y*.

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

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

$$z-1=0$$

$$-y+2=0$$ 11

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

$$\Pi_y=\frac{\rho v^2}{\gamma l}=\frac{v^2}{gl}$$ 12

число Фруда Fr.

Параметр *μ*.

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

$$x+y-3z+1=0,$$ 14

$$z-1=0$$

$$-y+1=0$$

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

$$\Pi_\mu=\frac{\rho vl}{\mu}=\frac{vl}{\nu}$$ 15

число Рейнольдса, Re

ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

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

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

$$\Pi_K = \frac{v^2}{\frac{K}{\rho}}$$ 4

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

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

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

$$\frac{\Delta p}{\rho} = g\frac{\Delta p}{\gamma} = g h_{mp}.$$ 8

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

10

$$2f\left(\frac{\Delta}{4R_г}, \mathrm{Fr}, \mathrm{Re}\right) = \lambda.$$

коэффициент сопротивления трения по длине или коэффициентом Дарси

ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

Коэффициент потерь напора по длине будет равен:

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

Запишем формулу Дарси-Вейсбаха в виде:

$$v = \sqrt{\frac{8gR_г}{\lambda}\frac{h_{дл}}{L}}. \quad 2$$

3 $i = \frac{h_{дл}}{L}$ Гидравлический уклон

4 $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ коэффициент Шези

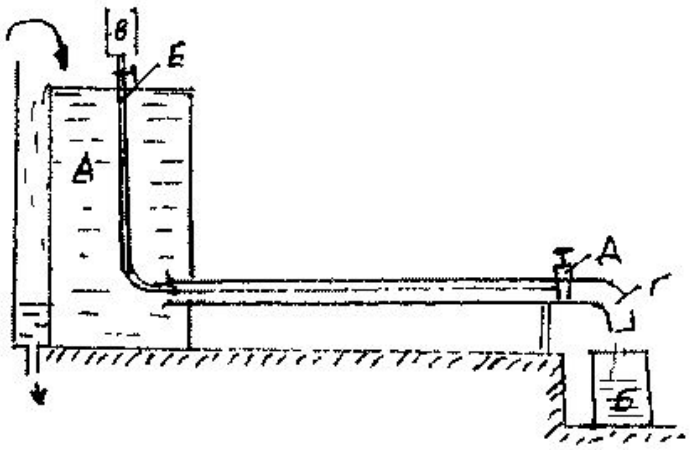
5 $v = C\sqrt{R\,i}$. $\sqrt{gR\,i} = u_*$ 6

Тогда коэффициент трения (коэффициент Дарси):

7 $\lambda = 8\left(\frac{u_*}{v}\right)^2$ 8 $v = C\sqrt{R\,i}$. 9 $\sqrt{gR\,i} = u_*$

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

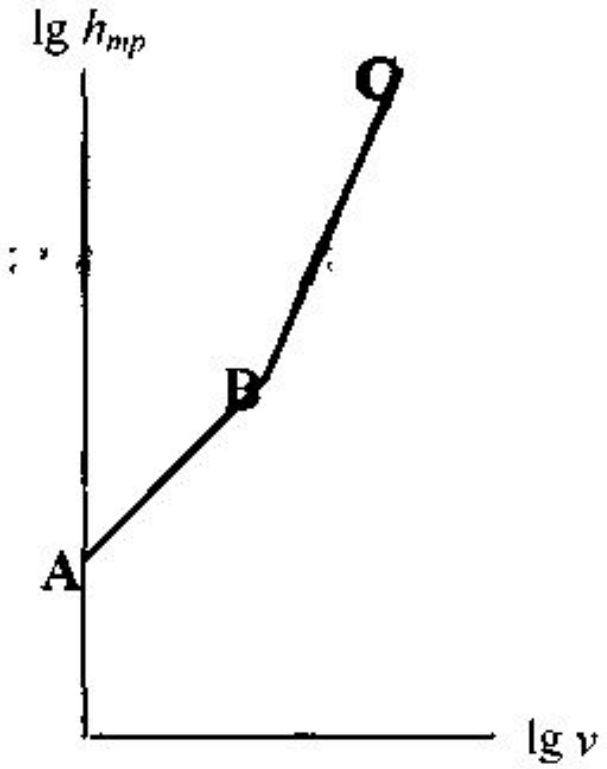


$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu},$$ число Рейнольдса

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_{Kp}, 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**



$$\lg h_{тр} = \lg b + k \lg v \quad (1)$$

$$h_{тр} = b v^{k}. \quad (2)$$

$k = \operatorname{tg}45° = 1$ (3)

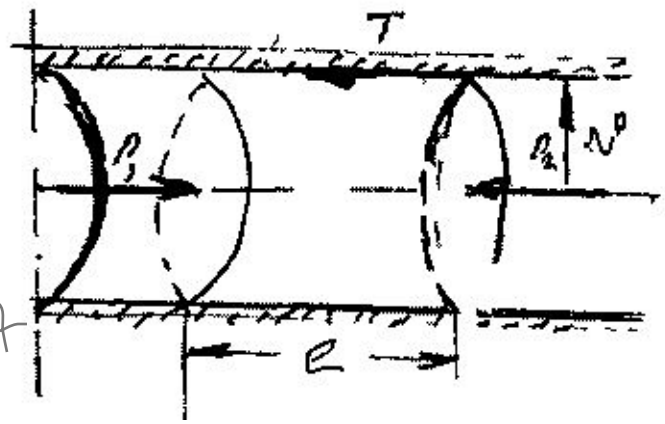
ЛАМИНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ

Касательные напряжения.

$$P_1 - P_2 - T = 0 \quad 1$$

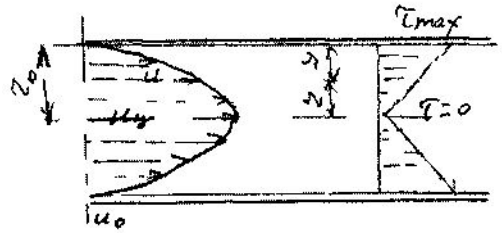
$$p_1 \cdot \pi r_0^2 - p_2 \cdot \pi r_0^2 - \tau_0 \cdot 2\pi r_0 l = 0, \quad 2$$

$$\tau_0 = \frac{p_1 - p_2}{l} \cdot \frac{r_0}{2} \quad 3 \qquad \tau = \frac{p_1 - p_2}{l} \cdot \frac{r}{2} \quad 4$$



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

Распределение скоростей в ламинарном потоке.



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

$$\frac{p_1 - p_2}{l} \frac{r}{2} = -\mu \frac{du}{dr} \quad 7$$

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

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

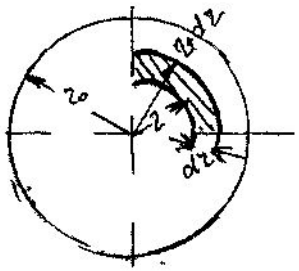
$$u = \rho g \frac{i}{4\mu} \left(r_0^2 - r^2\right) \quad 10$$

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

ЛАМИНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ

Средняя скорость движения жидкости в ламинарном потоке.

$$dQ = udS = u \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (1)$$



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

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

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

Потери напора в ламинарном потоке жидкости.

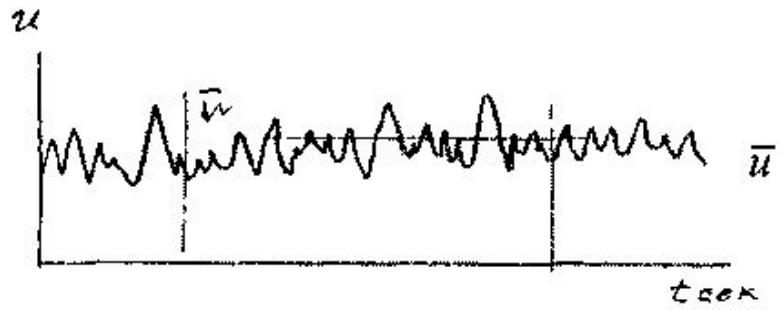
$$i = \frac{32\rho\nu}{gd^2} = \frac{8w}{gdR_e}. \quad (6) \qquad gR_e i = \frac{8w}{d} = u_*^2 \quad (7)$$

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

формула Пуазейля $h_{дл} = \dfrac{32 \cdot \nu \cdot l \cdot v}{gd^2}$ (10)

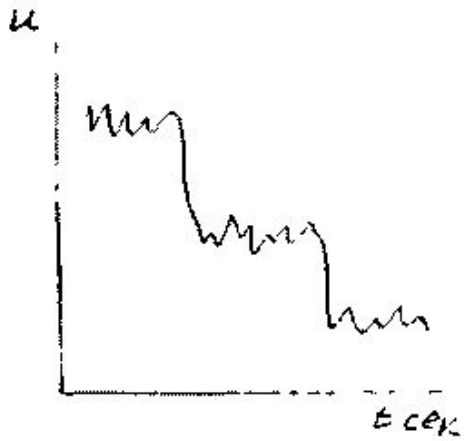
ТУРБУЛЕНТНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ

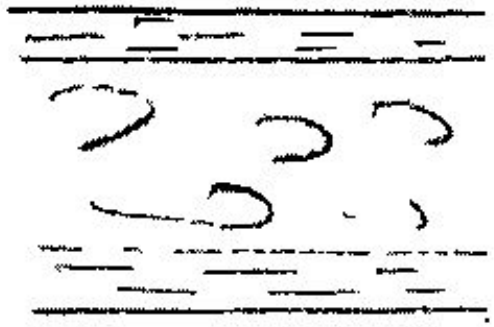
Структура турбулентного потока.



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

$$u' = u - \bar{u} \quad 2$$



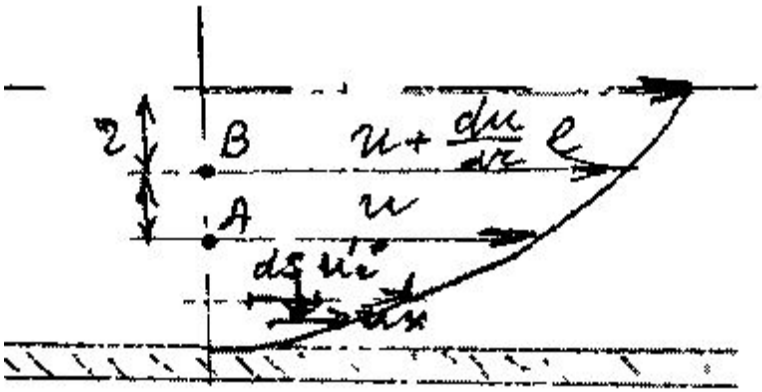


ГИДРАВЛИЧЕСКИ ГЛАДКИЕ И ШЕРОХОВАТЫЕ ТРУБЫ

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

Касательные напряжения в турбулентном потоке.

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



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

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

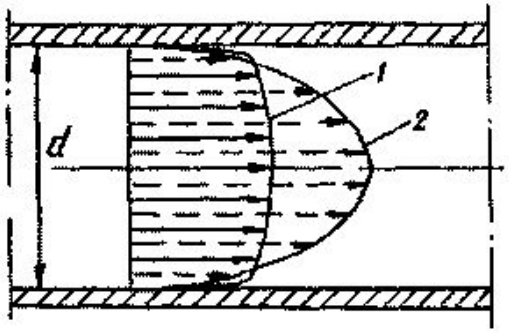
$$\tau \cdot dS \cdot dt = -\rho \cdot u'_r u'_x dS \cdot dt \; , \; 7$$

$$\tau = -\rho u'_r u'_x \cdot \; 8$$

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

10 $u + \frac{du}{dr} l \; .$ 11 $\bar{\tau} = -\rho \; \overline{u'_r u'_x} = \rho l^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dr}\right)^2 \cdot$ 12 $\bar{\tau} = \rho l^2 \frac{d\bar{u}}{dr}\frac{d\bar{u}}{dr} = C_\tau \frac{d\bar{u}}{dr} \cdot$ 13 $\bar{\tau} = -\mu \frac{d\bar{u}_x}{dr} + \rho l^2 \left(\frac{d\bar{u}_x}{dr}\right)^2$

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ПО СЕЧЕНИЮ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА.



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

$$\frac{\vec{u}}{u_*} = \frac{1}{\chi} \ln \frac{u_* r}{\nu} + const \quad (3) \qquad \varphi = \frac{1}{\chi} \ln[\chi(\eta - \alpha) + 1] + \alpha. \quad (4)$$

Потери напора на трение в турбулентном потоке жидкости.

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}. \quad (5) \qquad \lambda = \frac{1}{(1{,}81 \lg \mathrm{Re} - 1{,}5)^2} \quad (6) \qquad \lambda = \left(\frac{0{,}55}{\lg \frac{\mathrm{Re}}{8}}\right)^2. \quad (7) \qquad \lambda = f\left(\frac{\Delta}{d}\right) \quad (8)$$

формула Блазиуса

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

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

$$\lambda = 0{,}11 \left(\frac{\Delta_э}{d}\right)^{0{,}25} \quad (11) \qquad \lambda = f\left(\mathrm{Re}, \frac{\Delta}{d}\right). \quad (12)$$

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

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

ГРАФИК НИКУРАДЗЕ

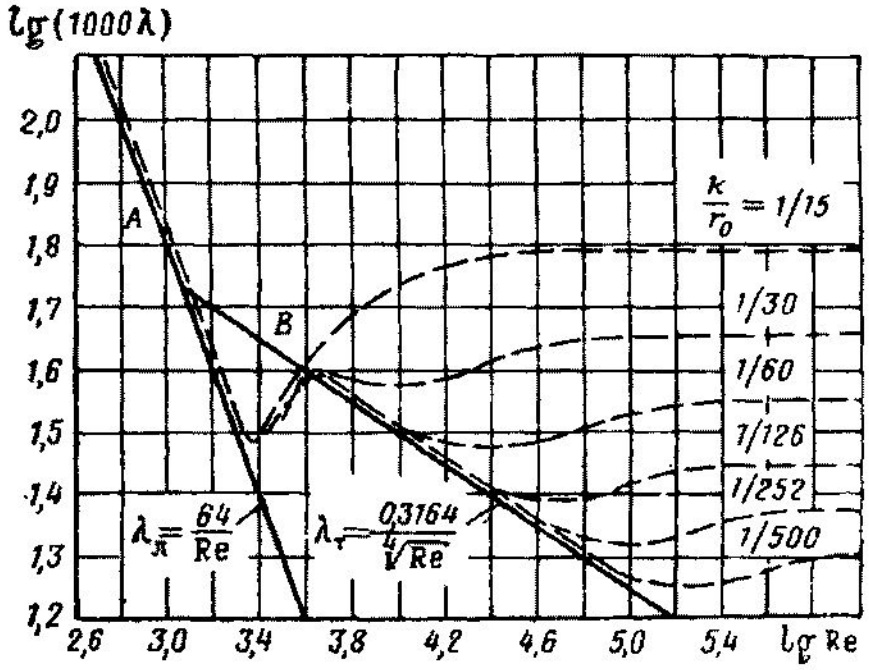


График И.И. Никурадзе

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

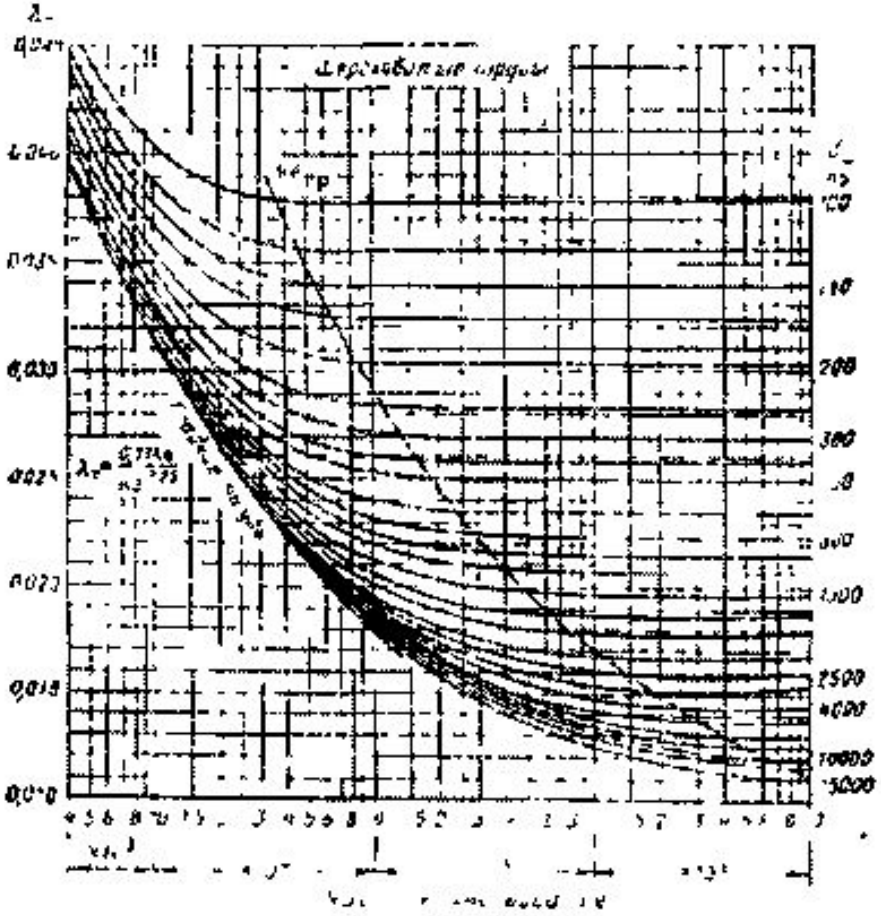
II турбулентное течение жидкости в гидравлически гладких трубах (прямая В), $\lg Re = 3,1 – 3,5$

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

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

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

КАВИТАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ



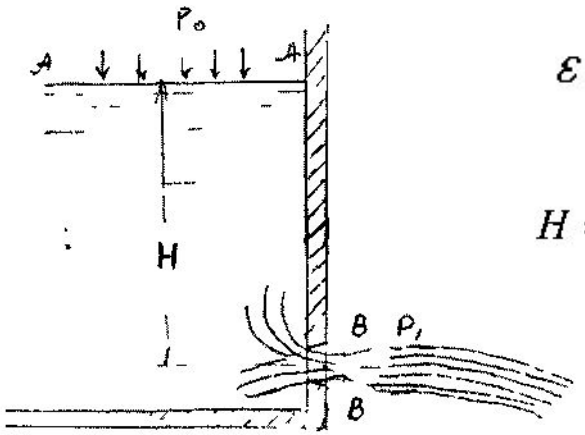
Процесс образования пузырьков пара в жидкости носит название **паровой кавитации,** образование пузырьков газа вызывает **газовую кавитацию.**

$$K = \frac{p_0 - p_{нас}}{\rho \frac{v_0^2}{2g}}.$$

ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ

Отверстие в тонкой стенке

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



$$\varepsilon = \frac{S_{сж}}{S}, \quad (1)$$

$$H + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = 0 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} + h_{тр}. \quad (2)$$

$$H = \frac{\alpha v^2}{2g} + h_{тр}, \quad (3)$$

$$H = \frac{\alpha v^2}{2g} + \sum \xi \frac{v^2}{2g} = \frac{v^2}{2g}\left(\alpha + \sum \xi\right) \quad (4)$$

$$\sum \xi = \xi_{тс} \quad (5)$$

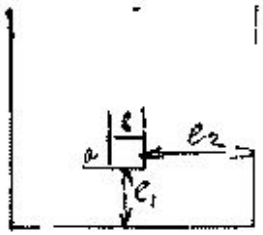
$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{тс}}}\sqrt{2gH} \quad (6)$$

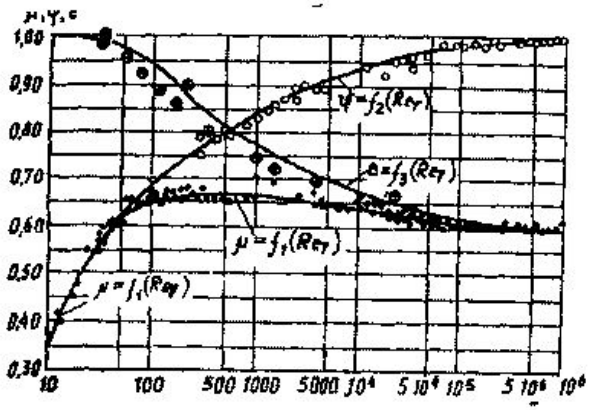
$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{тс}}}, \text{ тогда:} \quad (7)$$

$$v = \varphi\sqrt{2gH}. \quad (9)$$

$$Q = s_{сж} v = \varepsilon \; s \cdot v = \mu \; s\sqrt{2gH}, \quad (8)$$

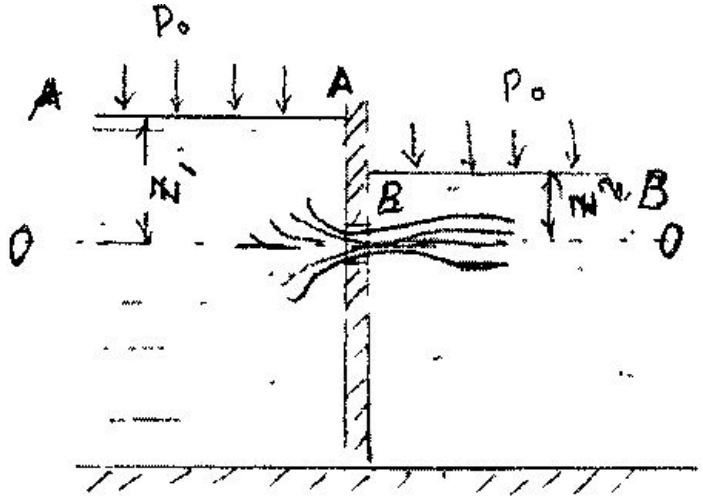
ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ





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

Истечение жидкости через затопленное отверстие.



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

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

$$h_1 = \xi_{mc} \frac{v^2}{2g}, \quad 4 \quad h_2 = \frac{\alpha_1 v^2}{2g} \quad 5$$

$$z = \sum \xi_{mp} \cdot \frac{v^2}{2g} = (\alpha_1 + \xi_{mc}) \frac{v^2}{2g} \quad 6$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1 + \xi_{mc}}} \sqrt{2gz}$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1 + \xi_{mc}}}$$

$$Q = \varepsilon \cdot \varphi \cdot s\sqrt{2gz} \quad 5$$

$$Q = \mu \cdot s\sqrt{2gz}. \quad 7$$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ **25-28**