# Лекции по гидродинамике

## Часть 2

Автор: Раинкина Лариса Николаевна
к. т. н., доцент

В производственных процессах нефтегазопромыслового дела используются и перемещаются разнообразные жидкости: нефти, нефтепродукты, химические реагенты, вода, глинистые растворы по различным системам

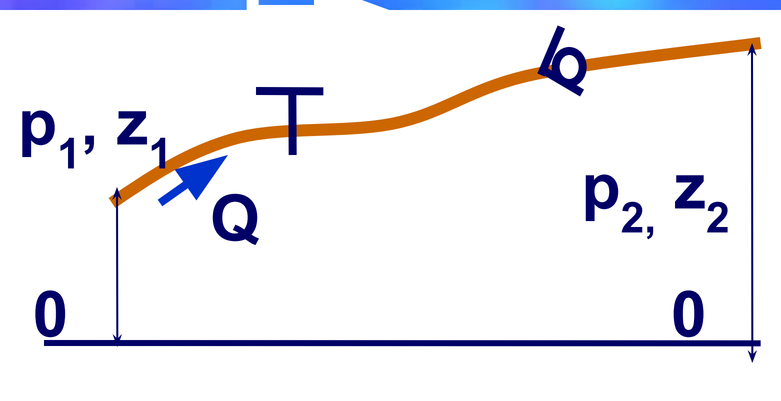
**ЗАКОНЫ ГИДРОДИНАМИКИ - ОСНОВА РАСЧЕТОВ В НЕФТЕГАЗОВОМ ДЕЛЕ!**

# Виды трубопроводов

Трубопроводы

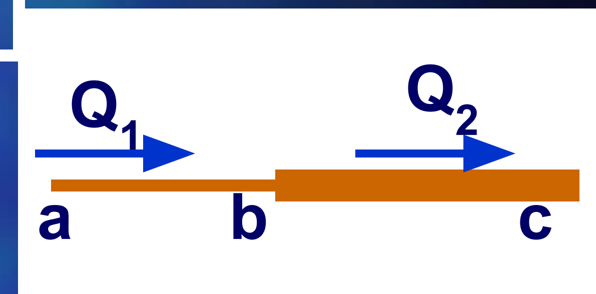
Простые

Сложные



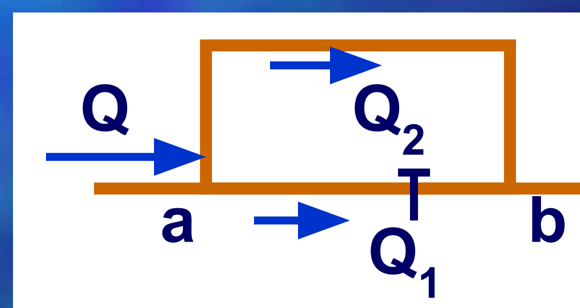

Простой трубопровод не имеет ответвлений

Последовательное соединение



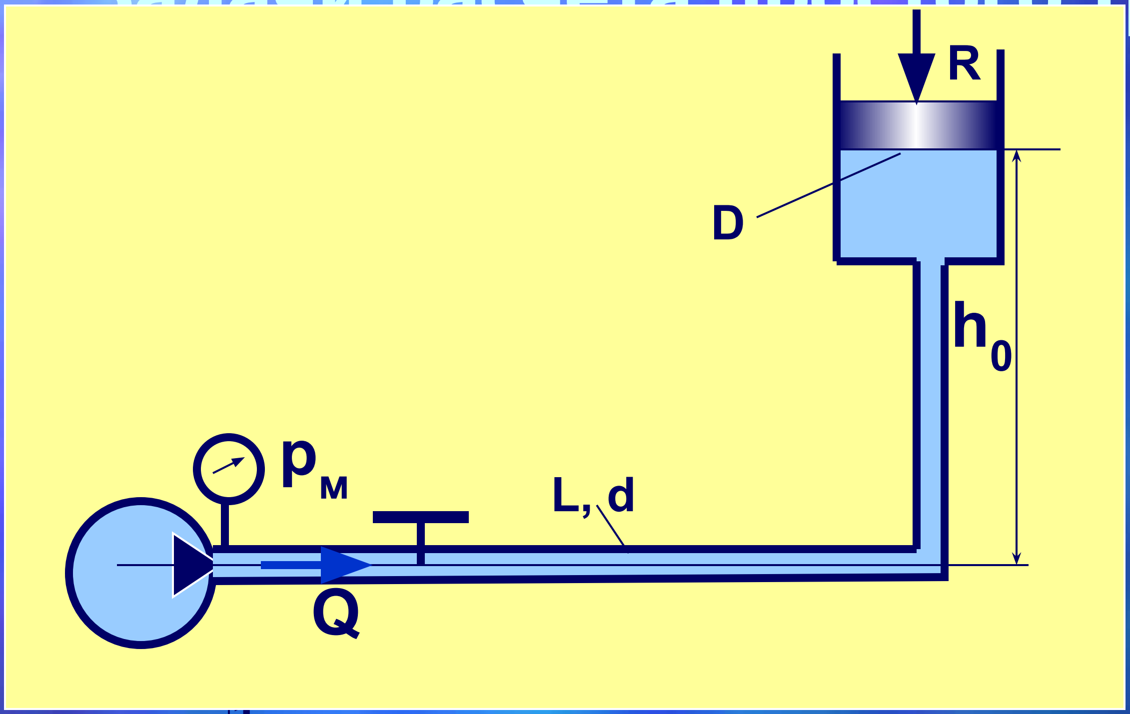

$Q = Q_1 = Q_2$;
$p_a - p_c = (p_a - p_b) + (p_b - p_c)$

Параллельное соединение




$Q = Q_1 + Q_2$; $(p_a - p_b)_1 = (p_a - p_b)_2$

# Задачи расчета простого трубопровода




**Параметры задачи:**

L, d, D, $h_0$, $p_м$-пок-ние манометра, R- сила, Q - расход, $z_{кр}$-коэф. сопр.крана, $\Delta_э$ -шерох. тр-да, $\rho$−плотность, n - кин.коэф.вязкости жидкости

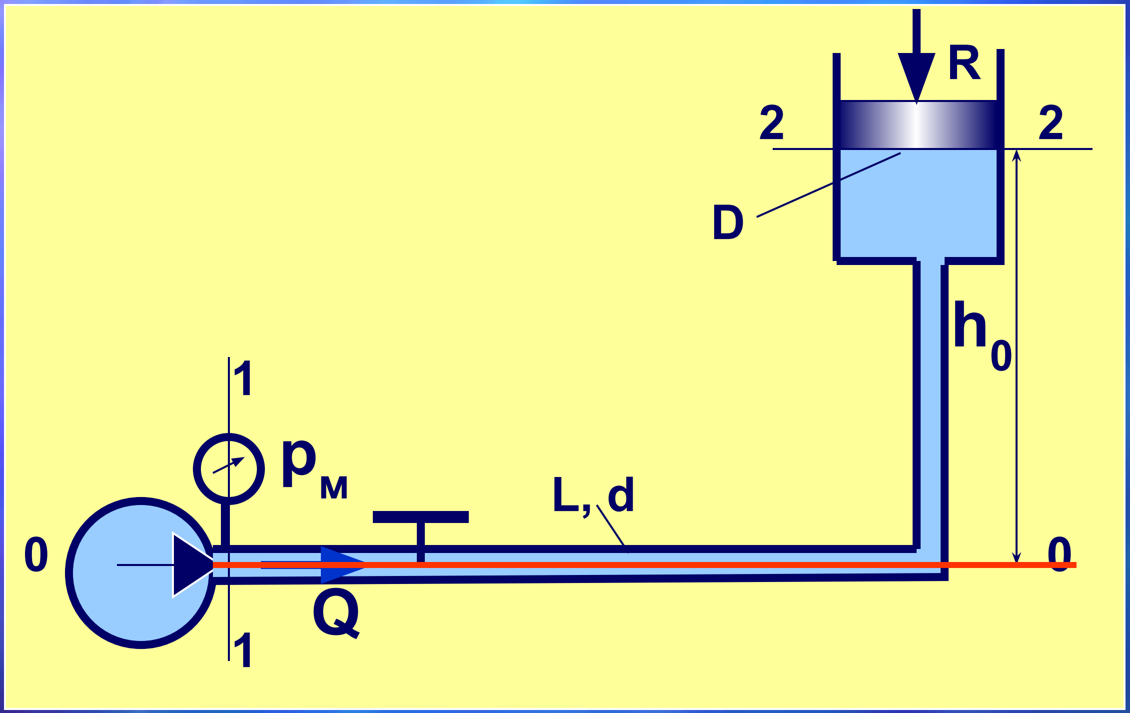
**Задачи расчета**

1. Определить или $p_м$, или R, или $h_0$ – величину, характеризующую потенциальную энергию жидкости

2. Определить Q-расход жидкости

3. Определить d - диаметр трубопровода

# Расчет простого трубопровода. Методика применения уравнения Бернулли




1. Выбираем два сечения потока: 1-1 и 2-2, а также горизонтальную плоскость отсчета 0-0 и записываем в общем виде уравнение Бернулли

$$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2 v_2^2/2g + h_{1-2}$$

? Выбор сечений

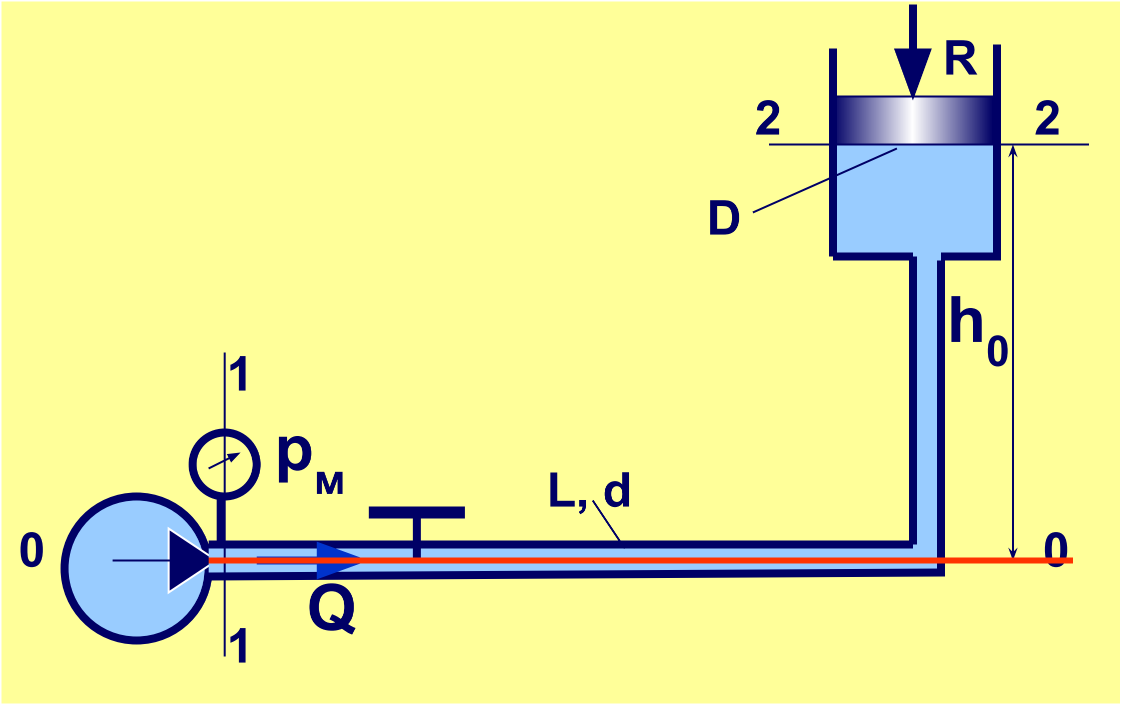
? Выбор плоскости сравнения

# Правила выбора сечений и плоскости сравнения

- ✔*Сечения выбираются* **всегда перпендикулярно направлению движения** жидкости и должны располагаться на **прямолинейных участках** потока
- ✔*Одно из* расчетных сечений необходимо брать там, **где нужно определить** давление *p*, высоту *z* или скорость $\vartheta$ , **второе**, где **величины** *p*, *z*, и $\vartheta$ **известны**
- ✔*Нумеровать* расчетные сечения следует так, чтобы **жидкость двигалась от** сечения *1-1* к сечению *2-2*
- ✔*Плоскость сравнения 0-0* –любая горизонтальная плоскость. Для удобства её проводят **через центр тяжести одного из сечений**

# Определение слагаемых уравнения Бернулли $Z_1$ и $Z_2$

$$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2 v_2^2/2g + h_{1-2}$$




$$Z_1 = 0$$

$$Z_2 = h_0$$

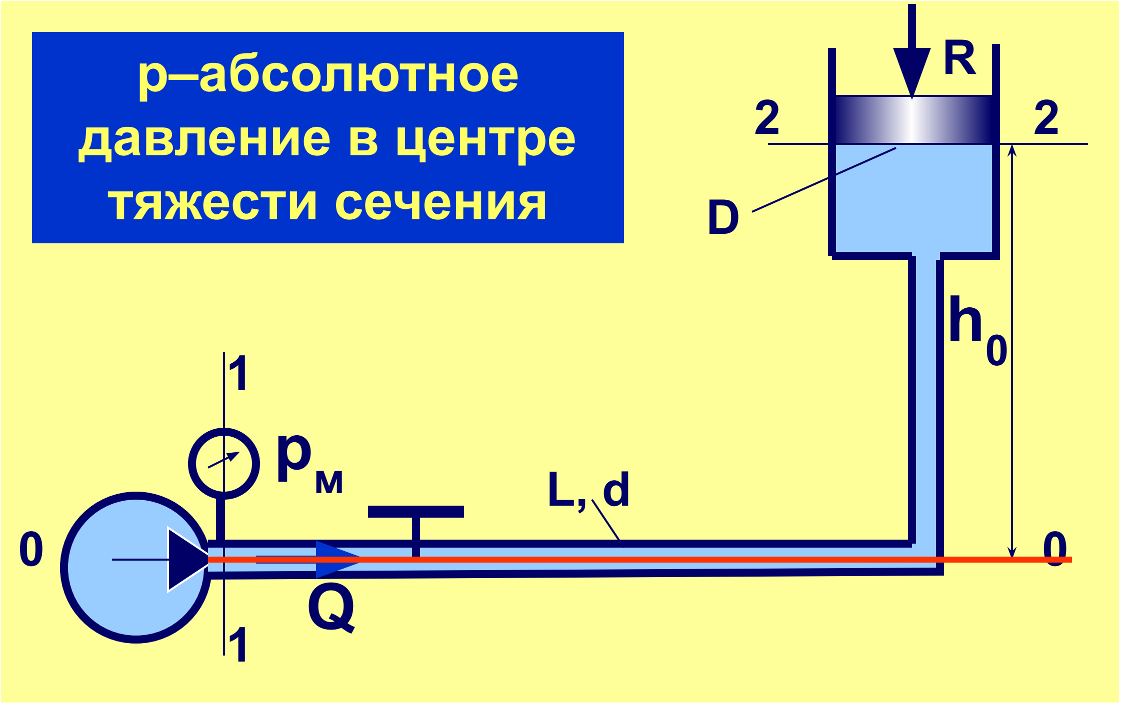
Z–вертикальное расстояние от пл. 0-0 до центра тяжести сечения

Если сечение расположено выше 0-0 - $\boxed{+Z}$, если ниже 0-0 $\boxed{-Z}$

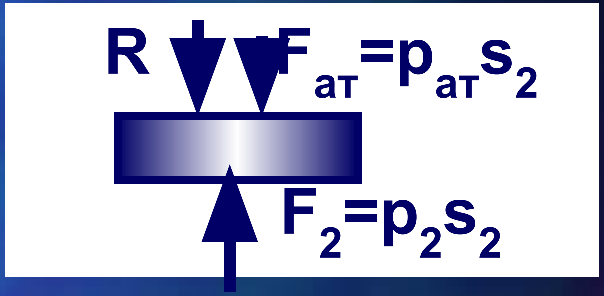
# Определение слагаемых уравнения Бернулли $p_1$ и $p_2$

$$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2 v_2^2/2g + h_{1\text{-}2}$$

**р–абсолютное давление в центре тяжести сечения**




Поршень равномерно движется вверх




$$p_1 = p_м + p_{ат}$$

$$p_2 = p_{ат} + R/s_2$$

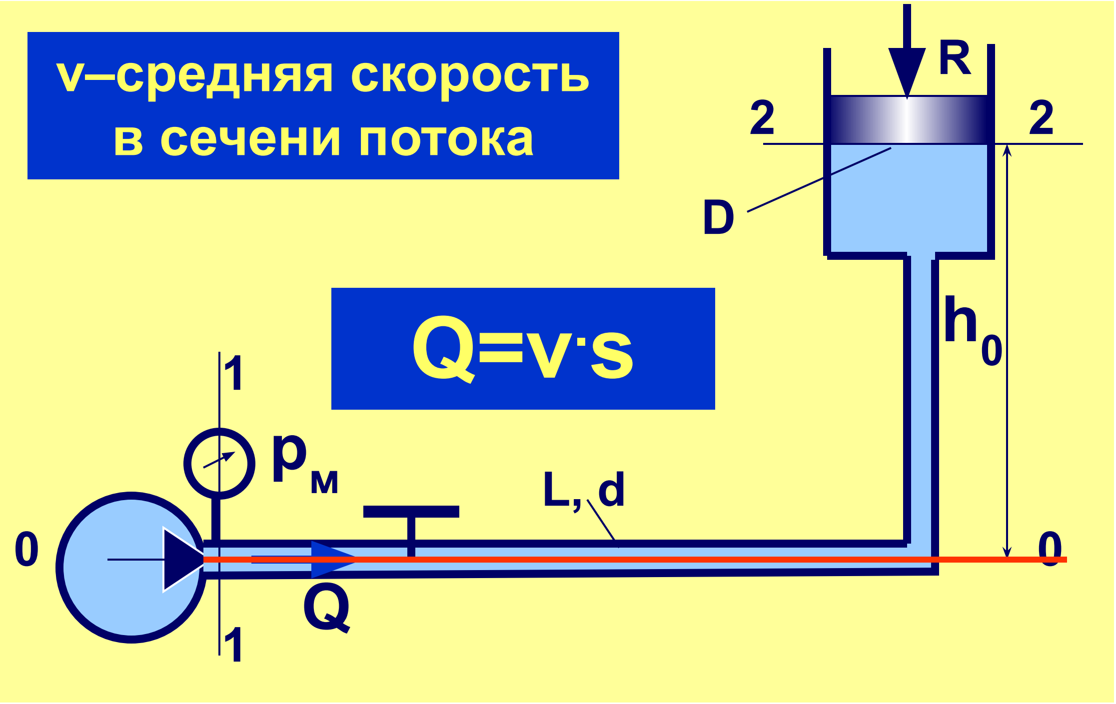
Если известно показание мановакуумметра, то $p=p_{ат}+p_м$ или $p=p_{ат}-p_v$

Давление $p_2$ определяется из уравнения равновесия поршня: $R+p_{ат}s_2-p_2s_2=0$

# Определение слагаемых уравнения Бернулли $v_1$ и $v_2$

$$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2 v_2^2/2g + h_{1\text{-}2}$$

v–средняя скорость в сечени потока




$Q = v \cdot s$

Расход жидкости один и тот же во всех сечениях потока

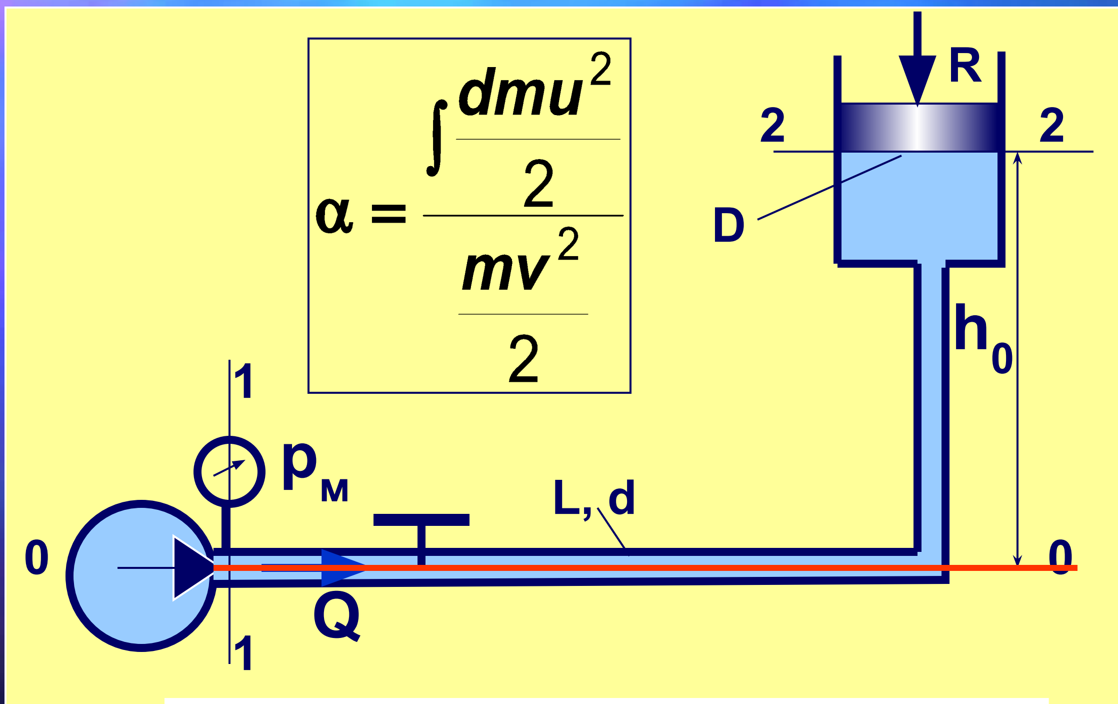
$v_1 = Q/s_1;$
$v_2 = Q/s_2$

Средняя скорость определяется через расход жидкости

Если $s_2 >> s_1$, то $v_2 << v_1$

# Определение слагаемых уравнения Бернулли $\alpha_1$ и $\alpha_2$

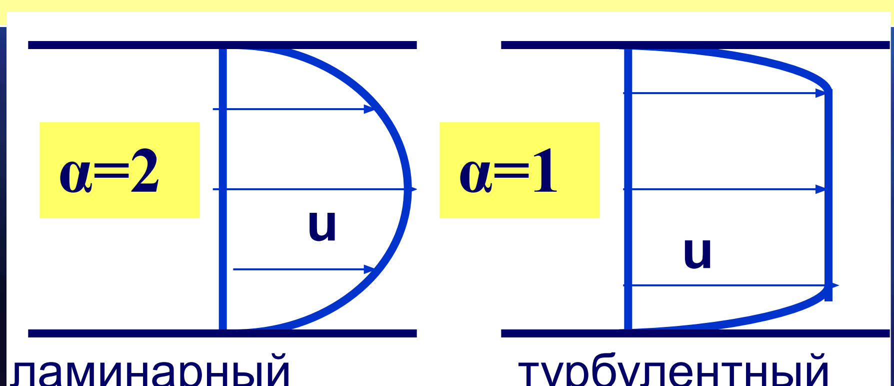
$$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2 v_2^2/2g + h_{1\text{-}2}$$




$$\alpha = \frac{\int \frac{dmu^2}{2}}{\frac{mv^2}{2}}$$

Для определения величины $\alpha$ нужно знать режим движения жидкости в сечении

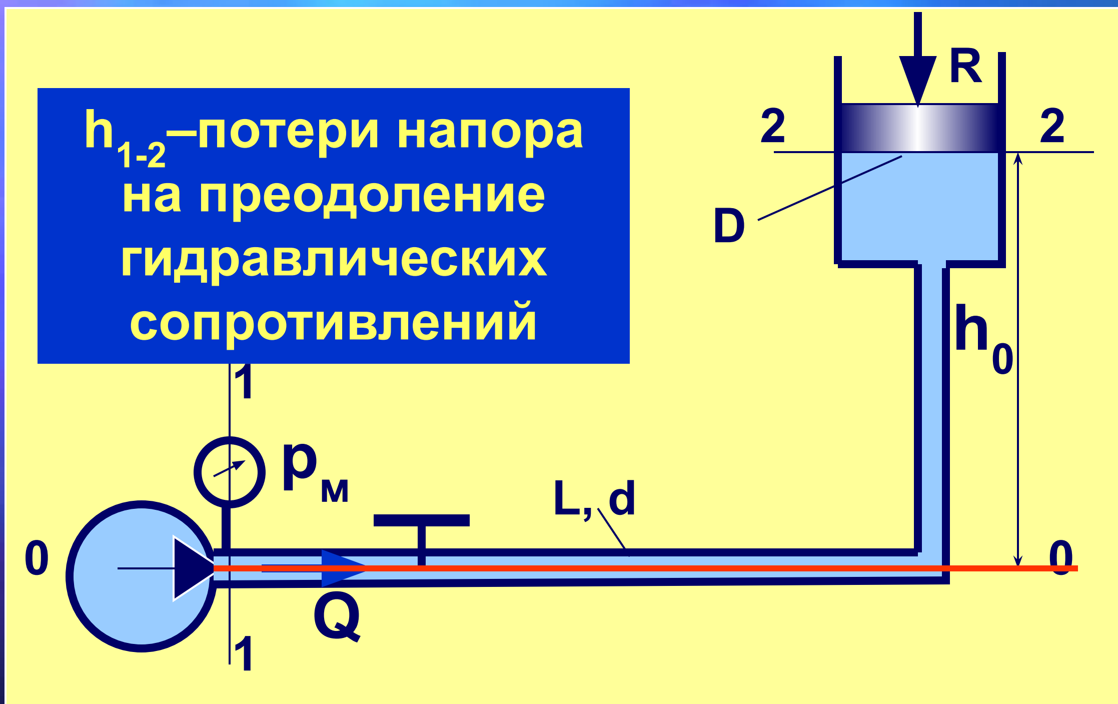
$\alpha$–коэффициент Кориолиса, корректив кинетической энергии




Если Re < 2300, то $\alpha$ =2,
Если Re > 2300, то $\alpha$ =1

# Определение слагаемых уравнения Бернулли $h_{1-2}$

$$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2 v_2^2/2g + h_{1-2}$$




Потери удельной энергии (напора) при движении жидкости от сеч. 1-1 к сеч. 2-2:

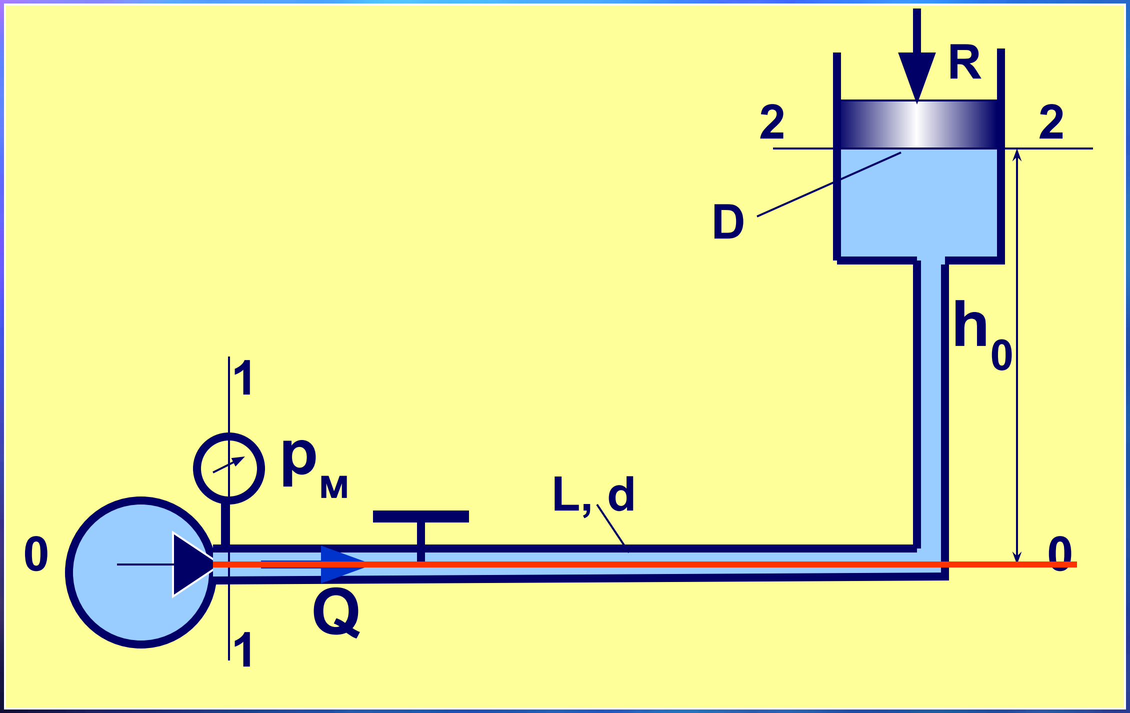
$$h_{1-2} = h_{дл} + \sum h_м$$

$$h_{1-2} = h_{дл} + \underbrace{h_{кр} + h_{пов} + h_{вых}}_{\text{местные потери}}$$

$$h_{1-2} = \lambda \frac{l}{d}\frac{v^2}{2g} + (\xi_{кр} + \xi_{пов} + \xi_{вых})\frac{v^2}{2g} = (\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi)\frac{v^2}{2g} = (\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi)\frac{Q^2}{s_{тр}^2 \cdot 2g}$$

# Закон сохранения энергии для конкретной задачи

$$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2 v_2^2/2g + h_{1\text{-}2}$$




Подставляем значения слагаемых в уравнение Бернулли, приводим подобные, упрощаем и получаем закон сохранения энергии для данной задачи

$$0 + \frac{p_м + p_{ат}}{\rho g} + \frac{\alpha_1 Q^2}{s^2_{тр}\, 2g} = h_0 + \frac{R/s_ц + p_{ат}}{\rho g} + \frac{\alpha_2 Q^2}{s^2_ц\, 2g} + \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi\right) \frac{Q^2}{s_{тр}^2 \cdot 2g}$$

# Закон сохранения энергии для конкретной задачи (продолжение)

$$0+\frac{p_м+p_{ат}}{\rho g}+\frac{\alpha_1 Q^2}{s^2_{тр}\,2g}=h_0+\frac{R/s_ц+p_{ат}}{\rho g}+\frac{\alpha_2 Q^2}{s^2_ц\,2g}+(\lambda\frac{l}{d}+\sum\xi)\frac{Q^2}{s_{тр}^{\ 2}\cdot 2g}$$

$$\frac{p_м-R/s_ц}{\rho g}-h_0=(\alpha_2\frac{d^4}{D^4}+\lambda\frac{l}{d}+\sum\xi-\alpha_1)\frac{Q^2\cdot 8}{\pi^2 d^4\cdot g}$$

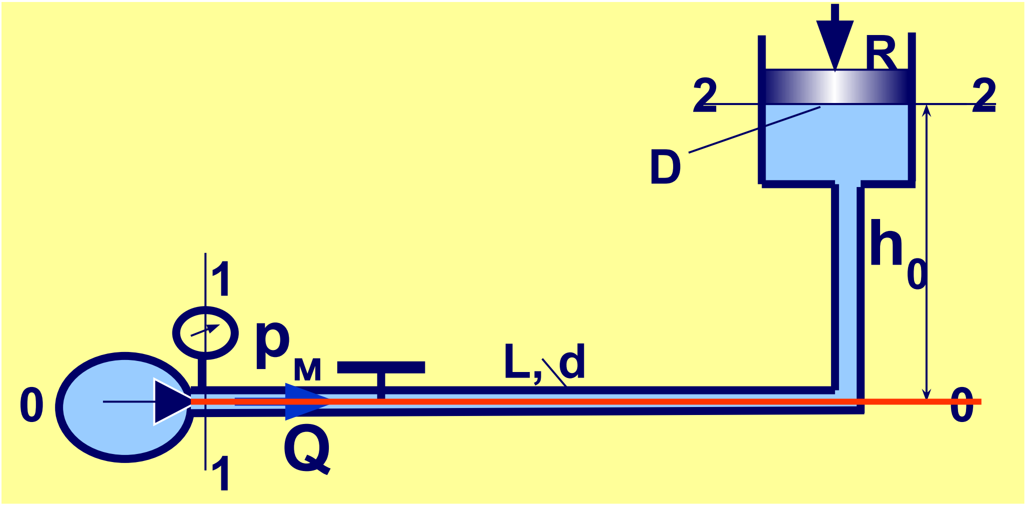
Закон сохранения энергии для нашей задачи

Далее это уравнение нужно решить относительно неизвестной величины

# Определение давления на выходе из насоса

**Дано:**

L, d, D, $h_0$, R- сила, Q - расход, $z_{кр}$-коэф. сопр. крана, $\Delta_э$-шерох. тр-да, ρ−плотность, n - кин.коэф. вязкости жидкости




**неизвестная величина**

$$\frac{p_м - R/s_ц}{\rho g} - h_0 = \left(\alpha_2 \frac{d^4}{D^4} + \lambda \frac{l}{d} + \sum \xi - \alpha_1\right) \frac{Q^2 \cdot 8}{\pi^2 d^4 \cdot g}$$

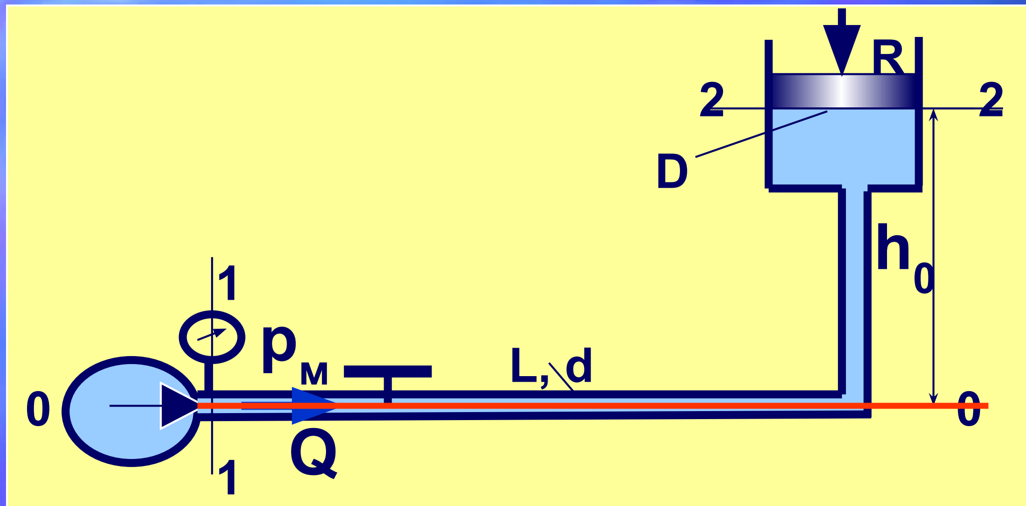
$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu} = \frac{Qd \cdot 4}{\pi d^2 \nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu};$$

$$\mathrm{Re} < 2300 \Rightarrow \lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}, \alpha = 2;$$

$$\mathrm{Re} > 2300 \Rightarrow \lambda = 0{,}11\left(\frac{68}{\mathrm{Re}} + \frac{\Delta_э}{d}\right)^{0{,}25}, \alpha = 1$$

$z_{пов}$, $z_{вых}$ определяютя по справочнику; a и l вычисляются. Остальные величины заданы по условию

# Определение расхода жидкости




Дано:

L, d, D, $h_0$, R
показание
коэф. сопр
шерох. тр-д
n - кин.коэ

неизвестн

Что делать?

$$\frac{p_м - R/s_ц}{\rho g} - h_0 = \left(\alpha_2 \frac{d^4}{D^4} + \lambda(Q)\frac{l}{d} + \sum\xi - \alpha_1\right)\frac{Q^2 \cdot 8}{\pi^2 d^4 \cdot g}$$

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{Qd \cdot 4}{\pi d^2 \nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu};$$

$$Re < 2300 \Rightarrow \lambda = \frac{64}{Re}, \alpha = 2;$$

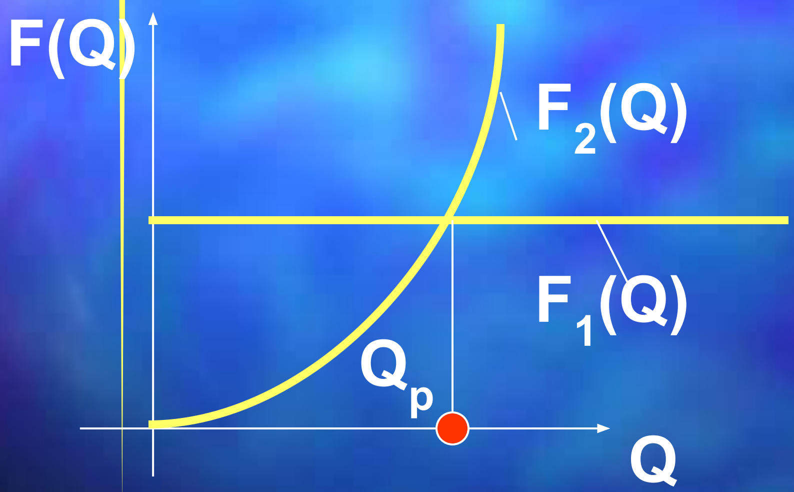
$$Re > 2300 \Rightarrow \lambda = 0{,}11\left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_э}{d}\right)^{0{,}25}, \alpha = 1$$

$z_{пов}$, $z_{вых}$ определяютя по справочнику; a и l ВЫЧИСЛИТЬ НЕЛЬЗЯ, так как не определяется число Re

# Графический способ определения Q

$$\underbrace{\frac{p_м - R/s_ц}{\rho g} - h_0}_{F_1(Q)} = \underbrace{\left(\alpha_2 \frac{d^4}{D^4} + \lambda(Q)\frac{l}{d} + \sum\xi - \alpha_1\right)\frac{Q^2 \cdot 8}{\pi^2 d^4 \cdot g}}_{F_2(Q)}$$

**Трансцендентное уравнение (от лат. transcendo-выхожу за пределы). Это уравнение не решается алгебраическими способами**



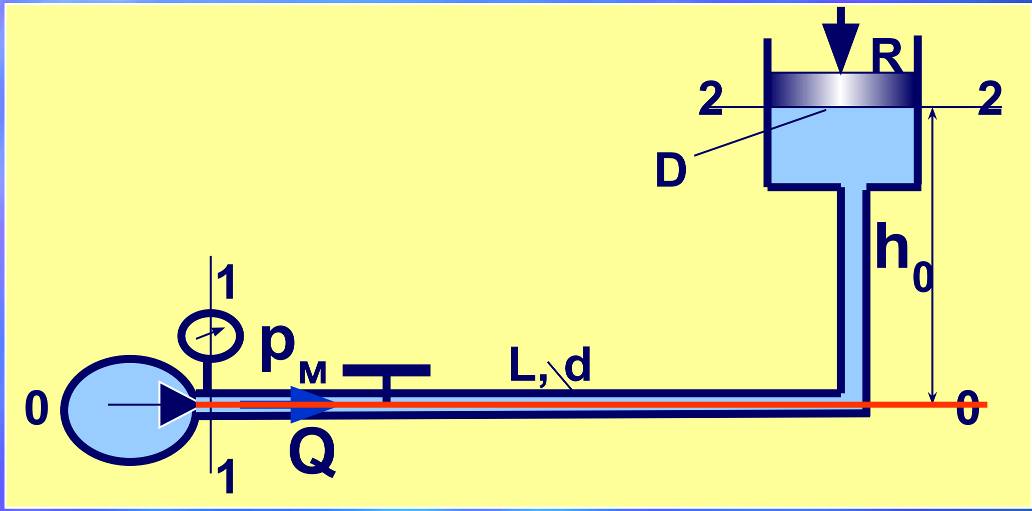

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{Qd \cdot 4}{\pi d^2 \nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu};$$

$$Re < 2300 \Rightarrow \lambda = \frac{64\pi d\nu}{4Q}, \ \alpha = 2;$$

$$Re > 2300 \Rightarrow \lambda = 0{,}11\left(\frac{68\pi d\nu}{4Q} + \frac{\Delta_э}{d}\right)^{0{,}25}, \ \alpha = 1$$

$$Q \Rightarrow Re \Rightarrow \lambda, \alpha \Rightarrow F_2(Q)$$

# Определение диаметра трубопровода




Дано: L, D, $h_0$, R- сила, Q - расход, $p_м$ – показание манометра, $z_{кр}$-коэф. сопр. крана, $\Delta_э$-шерох. тр-да, ρ−плотность, n - кин.коэф. вязкости жидкости

неизвестная величина

$$\frac{p_м - R/s_ц}{\rho g} - h_0 = \left(\alpha_2 \frac{d^4}{D^4} + \lambda(d)\frac{l}{d} + \sum \xi - \alpha_1\right)\frac{Q^2 \cdot 8}{\pi^2 d^4 \cdot g}$$

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{Qd \cdot 4}{\pi d^2 \nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu};$$

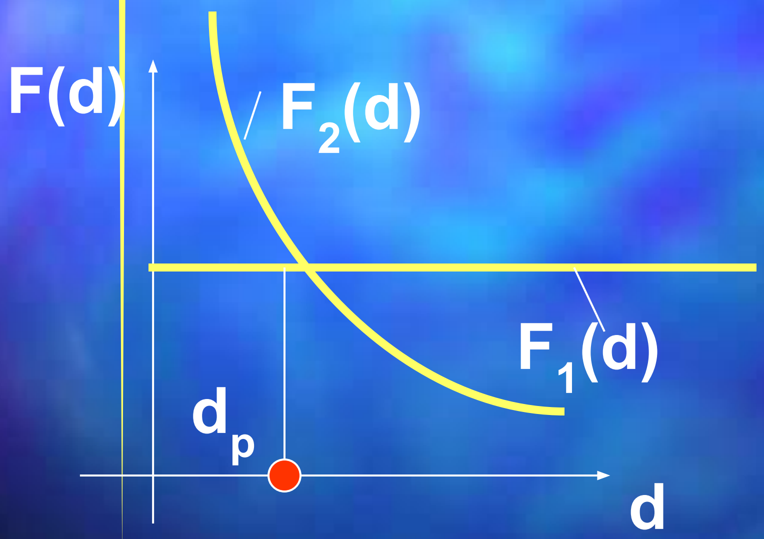
$$Re < 2300 \Rightarrow \lambda = \frac{64}{Re}, \alpha = 2;$$

$$Re > 2300 \Rightarrow \lambda = 0{,}11\left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_э}{d}\right)^{0{,}25}, \alpha = 1$$

$z_{пов}$, $z_{вых}$ определяютя по справочнику; a и l ВЫЧИСЛИТЬ НЕЛЬЗЯ, так как не определяется число Re

# Графический способ определения d

$$\underbrace{\frac{p_м - R/s_ц}{\rho g} - h_0}_{F_1(d)} = \underbrace{(\alpha_2 \frac{d^4}{D^4} + \lambda(d)\frac{l}{d} + \sum\xi - \alpha_1)\frac{Q^2 \cdot 8}{\pi^2 d^4 \cdot g}}_{F_2(d)}$$




$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{Qd \cdot 4}{\pi d^2 \nu} = \frac{4Q}{\pi d\nu};$$

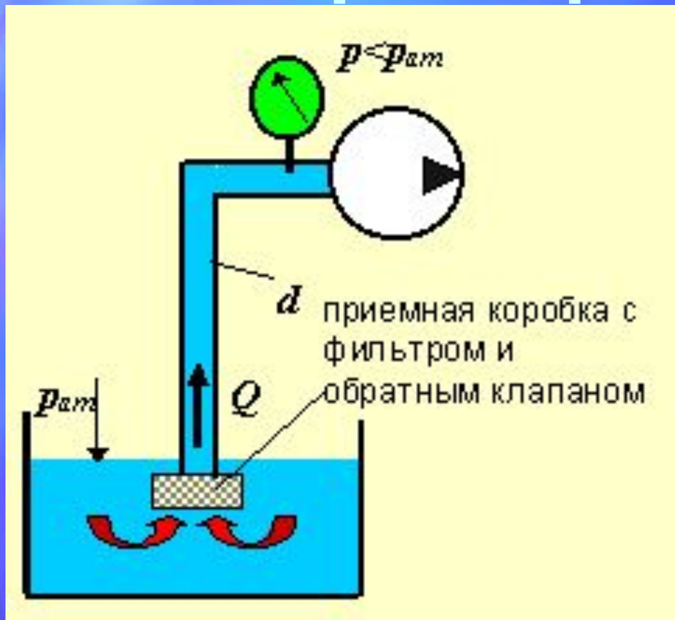
$$Re < 2300 \Rightarrow \lambda = \frac{64\pi d\nu}{4Q}, \ \alpha = 2;$$

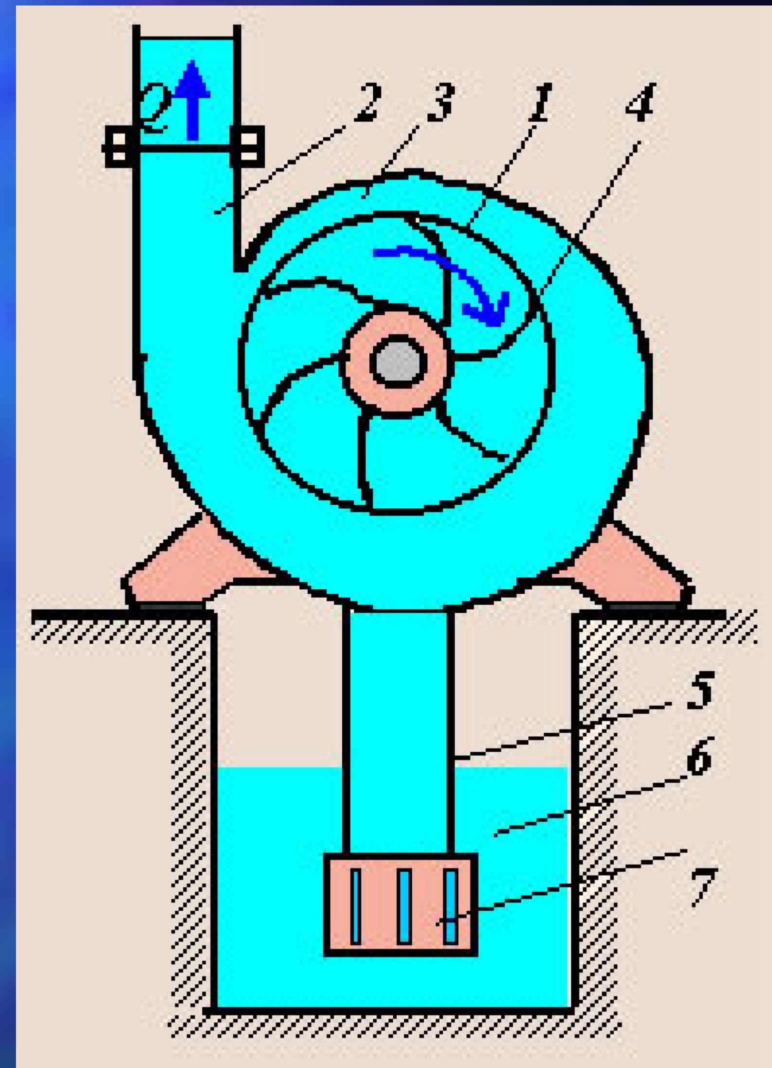
$$Re > 2300 \Rightarrow \lambda = 0{,}11(\frac{68\pi d\nu}{4Q} + \frac{\Delta_э}{d})^{0{,}25}, \ \alpha =$$

$$d \Rightarrow Re \Rightarrow \lambda, \alpha \Rightarrow F_2(d)$$

**Трансцендентное уравнение относительно диаметра d**

# Кавитация и центробежный насос. Схема




1-рабочее колесо; 2-отвод;

3- спиральная камера;

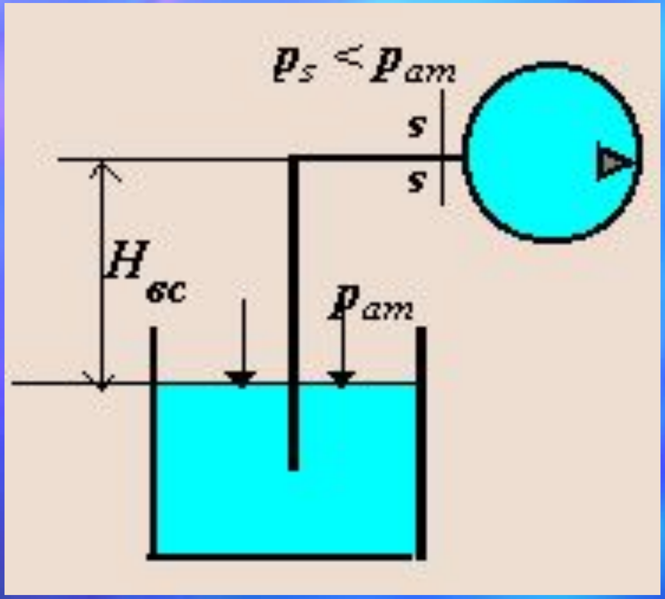
4- криволинейные лопатки;

5- всасывающий трубопровод;

6- резервуар; 7-приёмная коробка

# Кавитация

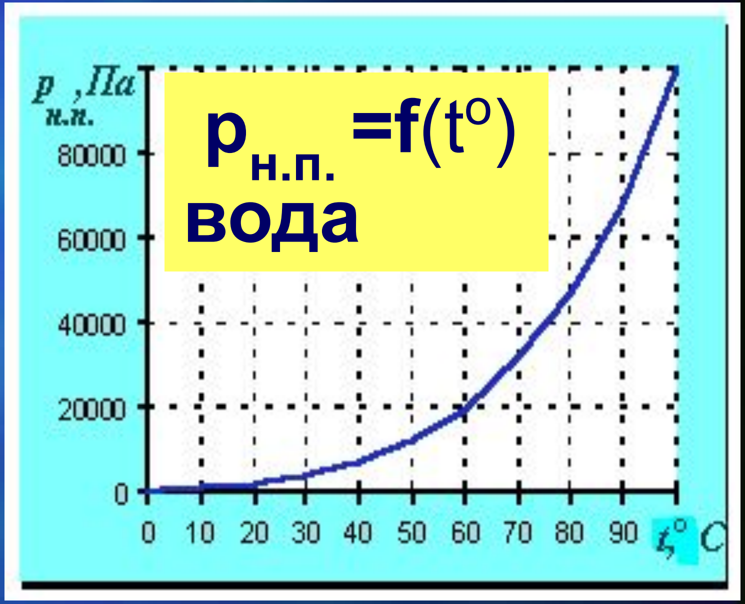
$t=20°,\ p_{н.п.}=2300$Па




$p_s < p_{ат}$

$H_{вс}\Uparrow\ p_s\Downarrow$

$p_s \le p_{н.п.} \Rightarrow$ кавитация



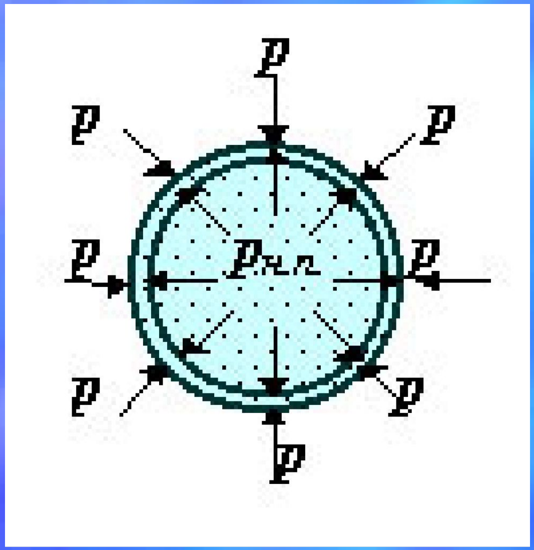

$p_{н.п.}=f(t^o)$ вода

**Кавитация** – явление кипения жидкости при нормальных температурах (10°, 20°, 30°,…), при давлениях меньших атмосферного и равных давлению насыщенного пара

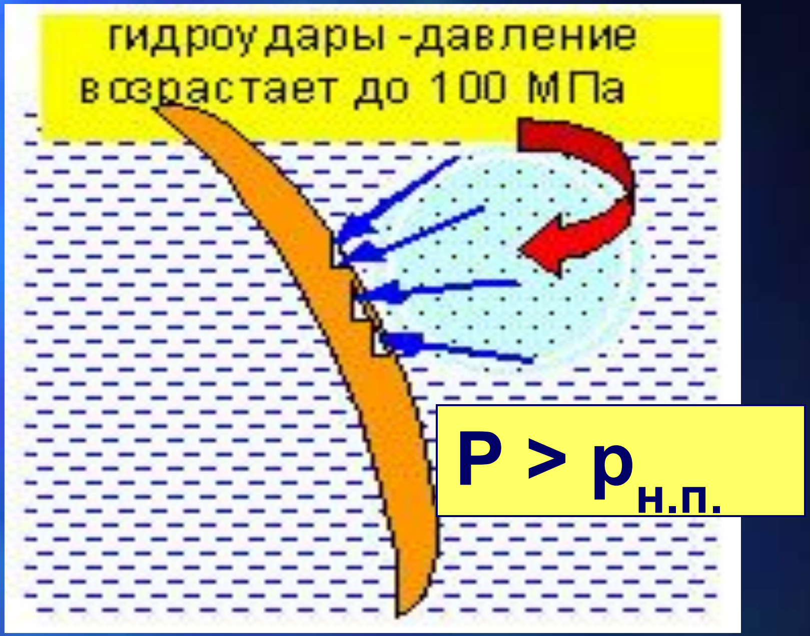
**В закрытых объёмах** кавитация сопровождается схлопыванием пузырьков в областях повышенного давления

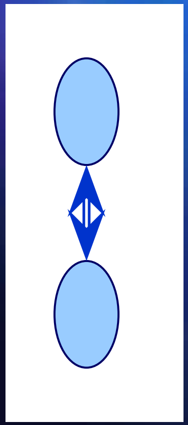
# Кавитация (продолжение)

Схлопывание пузырька на лопатке насоса

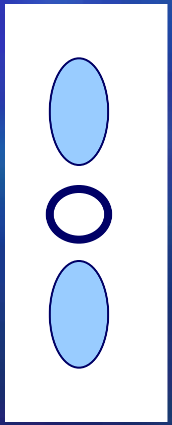



Образование пузырька – $p=p_{н.п.}$



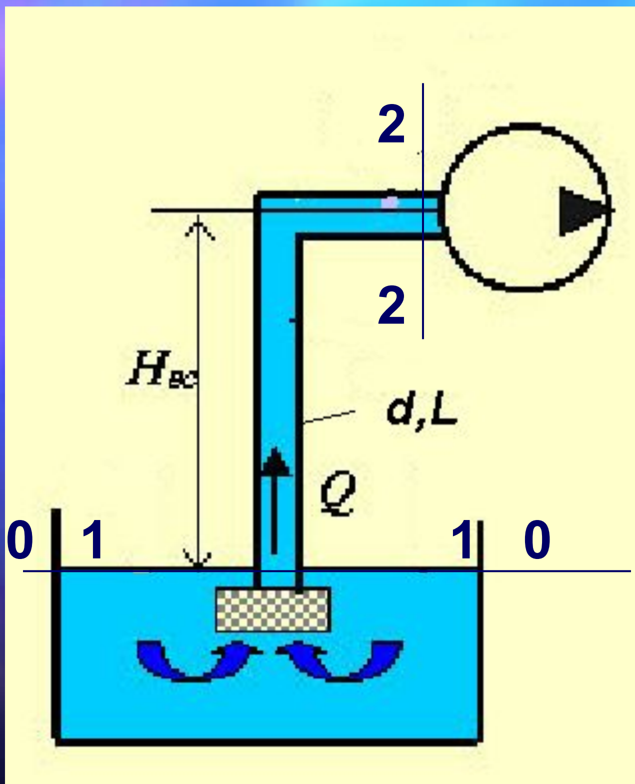
Есть связи между молекулами



Пузырек разрывает межмолекулярные связи и процесс всасывания в насос прекращается

# Кавитационный расчет всасывающей линии

$$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2 v_2^2/2g + h_{1\text{-}2}$$




$p_2 \geq p_{н.п.}$ ⇒ **условие отсутствия кавитации**

$z_1=0;$ $\quad p_1 = p_{ат};$ $\quad v_2 = Q/s_2 = 4Q/(\pi d^2)$

$z_2=H_{вс};$ $\quad p_2 = p_{н.п.};$

$v_1=0$ ($v_1 s_1 = v_2 s_2 = Q = const$; т.к. $s_1 >> s_2$, то $v_1 << v_2$

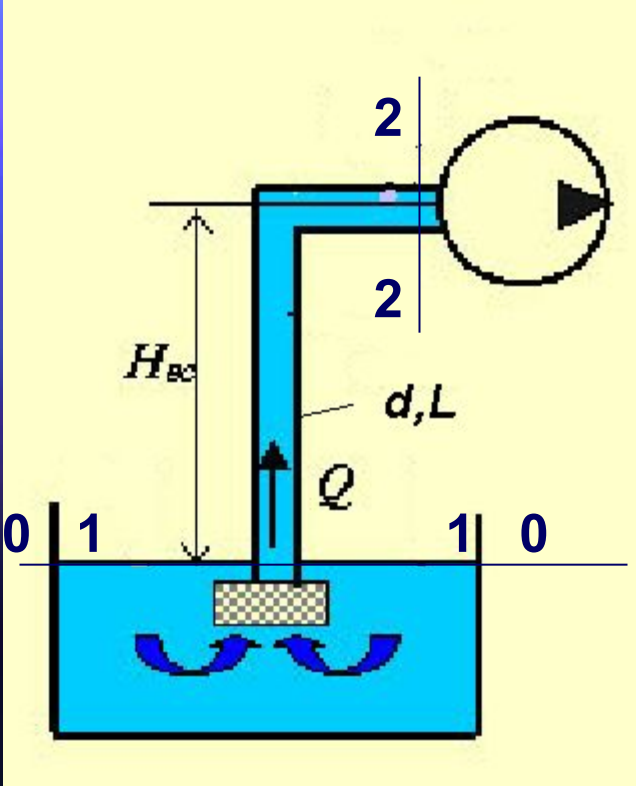
$$h_{1\text{-}2} = h_{дл} + \sum h_м = h_{дл} + h_{кор} + h_{пов}$$

Применяем уравнение Бернулли для сеч. 1-1 и 2-2 при $p_2 = p_{н.п.}$

$$h_{1-2} = \lambda \frac{L}{d}\frac{v^2}{2g} + (\xi_{кор} + \xi_{пов})\frac{v^2}{2g} = (\lambda \frac{L}{d} + \sum \xi)\frac{v^2}{2g} = (\lambda \frac{L}{d} + \sum \xi)\frac{8Q^2}{\pi^2 d^4 \cdot g}$$

# Кавитационный расчет всасывающей линии

$$\frac{p_{am} - p_{н.п.}}{\rho g} - H_{вс} = \left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \xi + \alpha_2\right) \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4 \cdot g}$$




**Применяем уравнение Бернулли для сеч. 1-1 и 2-2 при $p_2 = p_{н.п.}$**

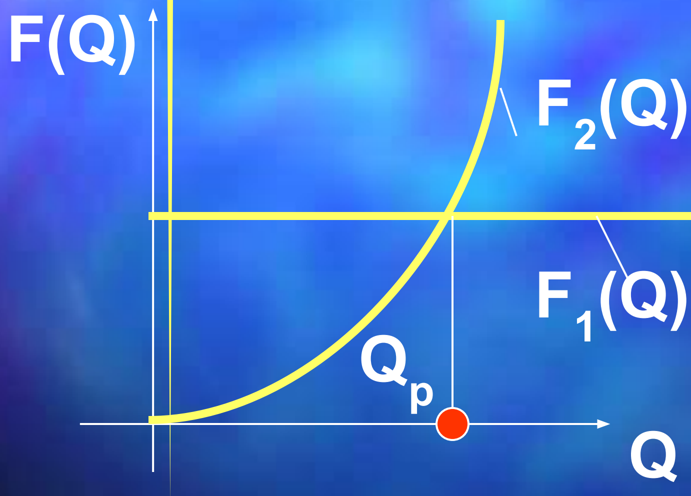
**Задачи расчета**

1. *Определение максимальной высоты подъёма $(H_{вс})_{max}$*
2. *Определение максимального расхода $Q_{max}$*
3. *Определение минимального диаметра трубопровода $d_{min}$*

# Графический способ определения $Q_{max}$

$$\underbrace{\frac{p_{am} - p_{н.п.}}{\rho g} - H_{вс}}_{F_1(Q)} = \underbrace{\left(\lambda \frac{L}{d} + \sum \xi + \alpha_2\right) \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4 \cdot g}}_{F_2(Q)}$$

**Трансцендентное уравнение (от лат. transcendo-выхожу за пределы). Это уравнение не решается алгебраическими способами**




$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{Qd \cdot 4}{\pi d^2 \nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu};$$

$$Re < 2300 \Rightarrow \lambda = \frac{64 \pi d \nu}{4Q}, \ \alpha = 2;$$

$$Re > 2300 \Rightarrow \lambda = 0{,}11\left(\frac{68 \pi d \nu}{4Q} + \frac{\Delta_э}{d}\right)^{0{,}25}, \ \alpha = 1$$

$$Q \Rightarrow Re \Rightarrow \lambda, \alpha \Rightarrow F_2(Q)$$