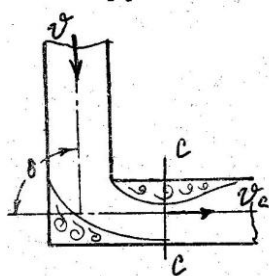


Устройства, изменяющие направление потока.1) Внезапный поворот трубы (или колено без закругления).

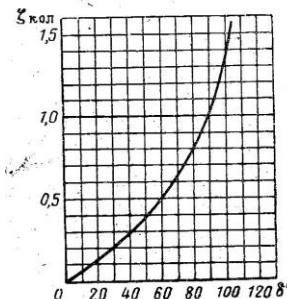
Это участок, в котором происходит резкое изменение направления потока и вследствие этого значительные потери энергии (так как в нём происходит отрыв потока от стенок и вихреобразование).

Причём эти потери тем больше, чем больше угол  $\delta$ .

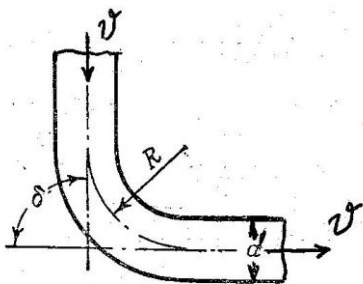
Как видно из графика  $\zeta_{\text{кол}} = f(\delta)$ , коэффициент сопротивления колена круглого сечения  $\zeta_{\text{кол}}$  возрастает с увеличением  $\delta$  очень круто и при  $\delta = 90^\circ$  имеет значение -  $\zeta_{\text{кол}} = 1$ .

Потерю напора рассчитывают по формуле:

$$h_n = \zeta_{\text{кол}} \frac{v^2}{2g}$$



Ввиду больших потерь напора в коленах без закругления применение их в трубопроводах не рекомендуется.

2) Постепенный поворот трубы (или отвод) – это участок, в котором происходит плавное изменение направления потока.

Плавность поворота значительно уменьшает интенсивность вихреобразования, а, следовательно, и сопротивление отвода по сравнению с коленом. Это уменьшение тем больше, чем больше

относительный радиус кривизны отвода  $\frac{R}{d}$ .

Коэффициент сопротивления отвода -  $\zeta_{\text{отв}} = f\left(\frac{R}{d}, \delta\right)$ .

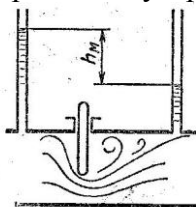
Для отводов круглого сечения с углом  $\delta = 90^\circ$  и  $\frac{R}{d} \geq 1$  при турбулентном течении можно воспользоваться эмпирической формулой определения коэффициента сопротивления:

$$\zeta_{\text{отв}} = 0,051 + 0,19 \frac{d}{R}$$

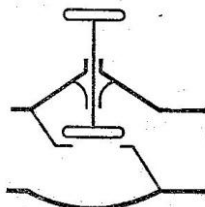
Коэффициент  $\zeta_{\text{отв}}$  учитывает лишь дополнительное сопротивление, обусловленное кривизной русла. Поэтому при расчёте трубопроводов, содержащих отводы, следует длины этих отводов включать в общую длину трубопровода, по которой рассчитывается потеря на трение, а затем к этой потере на трение нужно добавить дополнительную потерю от кривизны, определяемую коэффициентом  $\zeta_{\text{отв}}$ .

Регулирующие устройства и затворы.

Регулирующие устройства и затворы – это гидравлические элементы с изменяемой геометрией проточной части. Примеры таких устройств:



Задвижка



Вентиль



Дисковый затвор

Их назначение – менять режимы движения жидкости в системах (скорости меняются в зависимости от открытия элементов этих устройств).

Например, для односторонней задвижки круглой трубы сопротивление зависит от степени её открытия. В результате малого открытия происходит отрыв потока от сегментов задвижки и стенок с образованием водоворотной области.

Значения коэффициентов местных сопротивлений данных устройств определяются опытным путём, либо для стандартных устройств по таблицам и графикам.

### **Взаимное влияние местных сопротивлений.**

При определении потерь напора в трубопроводе при движении потока жидкости используется принцип наложения потерь (т.е. потери напора по длине не зависят от друг от друга, и все их можно складывать).

Однако, используя принцип наложения потерь, следует учитывать влияние местных сопротивлений в случае, когда они находятся на достаточно близком расстоянии друг от друга.

Выравнивание поля скоростей за местным сопротивлением происходит на некотором расстоянии, зависящем от вихреобразования. Наибольшие расстояния между сопротивлениями д.б. при наличии регулирующих устройств и затворов (вентили, задвижки, краны).

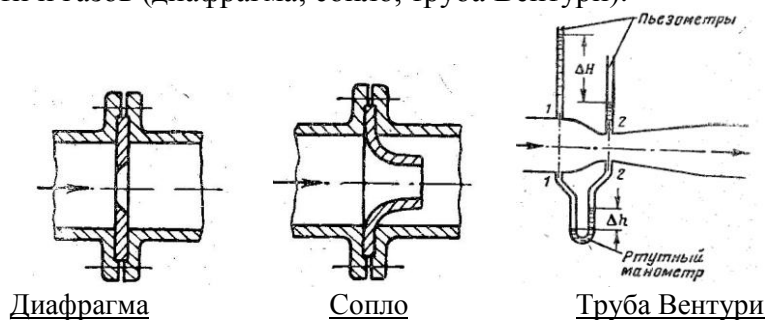
На практике расстояние между местными сопротивлениями принято принимать:

- при большой деформации потока -  $l \approx (15 \dots 20) \cdot d$ ;
- при малой деформации потока -  $l \approx (3 \dots 8) \cdot d$ ;

Потребный напор  $H$  для обеспечения расхода жидкости в трубопроводе складывается из потерь напора по длине и местных потерь напора.

### **Экспериментальное измерение расхода.**

В лабораторной практике используют ряд устройств, в которых существует сжатие потока, для измерения расхода жидкости и газов (диафрагма, сопло, труба Вентури).



О величине расхода судят по изменению перепада давления до и после сужения. В трубе Вентури этот перепад давлений ( $\Delta H$ ) измеряется парой пьезометров и связан с расходом:

$$Q = \mu F_0 \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta H},$$

где  $\mu$  – безразмерный коэффициент расхода расходомера.

Очень часто вместо пары пьезометров для измерения перепада давления в расходомере применяют дифференциальный U-образный ртутный манометр. Учитывая, что над ртутью в трубках находится та же жидкость с удельным весом  $\gamma$ , можно записать:

$$\Delta H = \Delta h \frac{\gamma_{pm} - \gamma}{\gamma} = \Delta h \frac{\rho_{pm}g - \rho g}{\rho g} = \Delta h \frac{\rho_{pm} - \rho}{\rho}.$$

Коэффициент расхода  $\mu$  в свою очередь зависит от:  $\mu = f\left(\text{Re}, \frac{F}{F_0}, \frac{d}{\Delta}\right).$

Коэффициент расхода расходомера  $\mu$  чаще определяется опытным путём либо он подобран для конкретного расходомера.

Если увеличивается расход, то увеличивается и скоростной напор  $\frac{v_0^2}{2g}$ , а давление падает по абсолютной величине (растёт вакуум – отрицательное избыточное давление).

Минимальное падение давления в данном случае будет -  $p \approx p_{\text{нн}}$ .

Расхомеры в жилых домах. В корпус расходомера встроена осевая турбинка. Поток воды, проходящий по трубопроводу, куда встроены расходомер, передаёт кинетическую энергию рабочему колесу турбинки. В результате передачи энергии колесо вращается с определённой угловой скоростью. Частота вращения вала колеса турбинки соответствует расходу жидкости в трубопроводе. Вращение турбинного колеса через червячную передачу, находящуюся в корпусе, передаётся счётному устройству. Счётное устройство, располагаемое снаружи корпуса, фиксирует расход за интервал времени. Расходомеры такого типа предназначены для измерения расхода чистой воды.

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТРУБОПРОВОДОВ.

### Расчёт простого трубопровода (ПТ).

Простым трубопроводом называется трубопровод без промежуточных ответвлений, по которому жидкость подаётся от источника гидравлической энергии к приёмному устройству.

ПТ может иметь постоянный диаметр по всей длине или же может включать в себя ряд последовательно соединённых участков различного диаметра.

При расчёте ПТ исходными соотношениями являются:

- 1) Уравнение баланса напоров (уравнение Бернулли).
- 2) Уравнение неразрывности (уравнение постоянства расхода).

Гидравлические потери напора в простых трубопроводах определяются:

$$h_n = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \text{ где } v = \frac{Q}{F} = \frac{4 \cdot Q}{\pi d^2}.$$

Подставив выражение для  $v$  в формулу потерь, получим:

$$h_n = \frac{16\lambda \cdot l}{\pi^2 2gd^5} \cdot Q^2 = 0,0827 \cdot \lambda \frac{l}{d^5} Q^2.$$

Обозначим:  $\sqrt{\frac{d^5}{0,0827\lambda}} = k$ , где  $k$  – модуль расхода, тогда получим:

$$h_n = \frac{l}{k^2} \cdot Q^2, \text{ и отсюда следует, что } Q = k\sqrt{i},$$

где  $i = \frac{h_n}{l}$  – гидравлический уклон. В свою очередь:  $k = f\left(d, \text{Re}, \frac{d}{\Delta}\right)$ .

Если обозначим:  $0,0827 \cdot \lambda \frac{l}{d^5} = a$ , где  $a$  – гидравл. сопот. трубопровода, то:

$$h_n = a \cdot Q^2.$$

При расчёте длинных трубопроводов, в которых определяющими являются потери на трение целесообразно заменить все местные сопротивления эквивалентными длинами:

$h_{н.м} = h_{н.тр}$ , следовательно,  $\zeta \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{l_{\text{экв}}}{d} \frac{v^2}{2g}$ . Отсюда имеем:

$$l_{\text{экв}} = d \frac{\zeta}{\lambda} \quad \text{- Метод эквивалентных длин.}$$

### Методика расчёта простого трубопровода.

Наиболее распространены две схемы расчёта:

**а) Простой трубопровод соединяет два резервуара.**

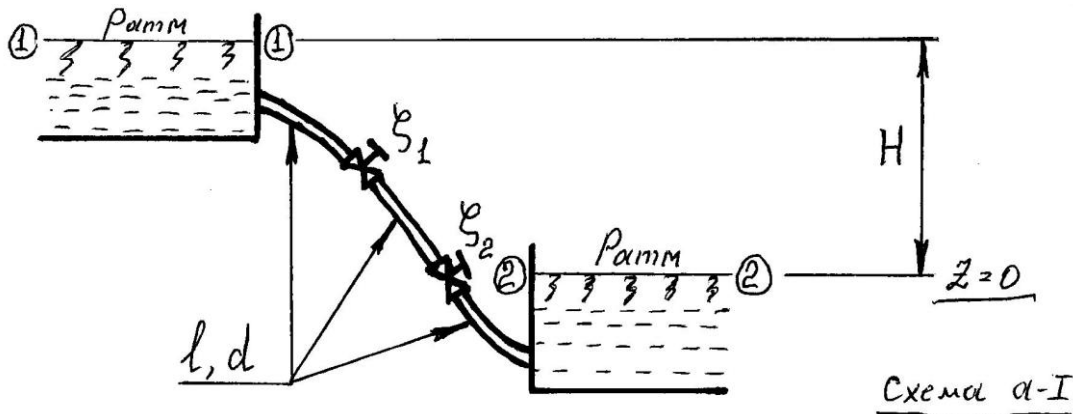
В этом случае расчётное уравнение Бернулли имеет вид:  $H = \sum h_n$ .

**б) Истечение жидкости через трубопровод в атмосферу:**  $H = \alpha_i \frac{v_i^2}{2g} + \sum h_n$ .

**Типовые случаи.**

**а-I)** Трубопровод состоит из нескольких последовательно соединённых участков равного диаметра,  $d = \text{const}$ , и имеет два местных сопротивления (два вентиля).

**Определить расход Q.**



**Решение:**

1) Заменяем все местные сопротивления эквивалентными трубопроводами:

$$l_{1\text{экв}} = d \frac{\zeta_1}{\lambda}; \quad l_{2\text{экв}} = d \frac{\zeta_2}{\lambda}.$$

2) Находим полную расчётную длину трубопровода (или приведённую длину трубопровода):

$$L_n = l_i + \sum l_{\text{экв}i}.$$

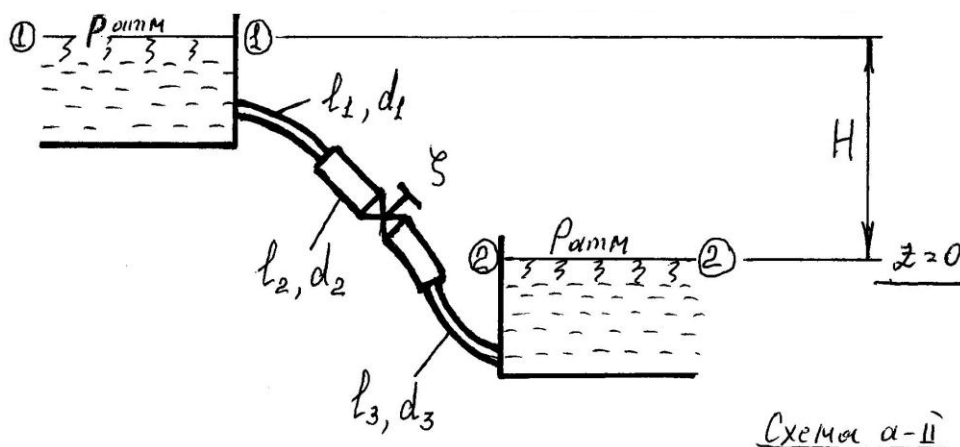
3) Определяем гидравлическое сопротивление трубопровода:  $a = 0,0827 \cdot \lambda \frac{L_n}{d^5}$ .

4) Записываем уравнение Бернулли для сечений (1-1) и (2-2):  $H = \sum h_n = a \cdot Q^2$ .

5) Определяем искомую величину расхода:  $Q = \sqrt{\frac{H}{a}}$ .

**а-II).** Трубопровод состоит из нескольких последовательно соединённых участков различного диаметра и имеет ещё одно местное сопротивление (вентиль).

**Определить расход Q.**



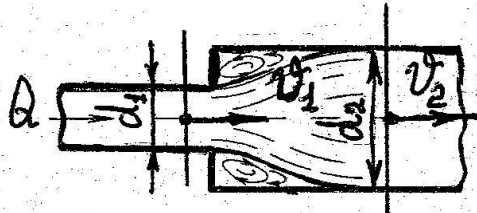
**Решение:**

1) Заменяем местные сопротивления эквивалентными длинами:  $l_{\text{экви}} = d_i \frac{\zeta_i}{\lambda_i}$ ,

где  $d_i$  – диаметр участка, где стоит местное сопротивление.

Если местное сопротивление стоит на границе двух участков, коэффициент  $\zeta$  д.б. отнесён к какой-либо скорости.

Если коэффициент  $\zeta$  отнесён к скорости за местом местного сопротивления, значит и  $d$ , и  $\lambda$  берут за местом местного сопротивления (а если до него, то наоборот):



$$\text{а) } h_n = \zeta_{\text{exp1}} \frac{v_1^2}{2g}, \Rightarrow \zeta_{\text{exp1}} = \left(1 - \frac{F_1}{F_2}\right)^2 = \left(1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right)^2,$$

$$\text{тогда } l_{\text{экви}} = d_1 \frac{\zeta_{\text{exp1}}}{\lambda_1};$$

$$\text{б) } h_n = \zeta_{\text{exp2}} \frac{v_2^2}{2g}, \Rightarrow \zeta_{\text{exp2}} = \left(\frac{F_2}{F_1} - 1\right)^2 = \left(\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 - 1\right)^2,$$

тогда  $l_{\text{экви}} = d_2 \frac{\zeta_{\text{exp2}}}{\lambda_2}$  (это тоже эквивалентная длина, выраженная через параметры после мест. сопр.).

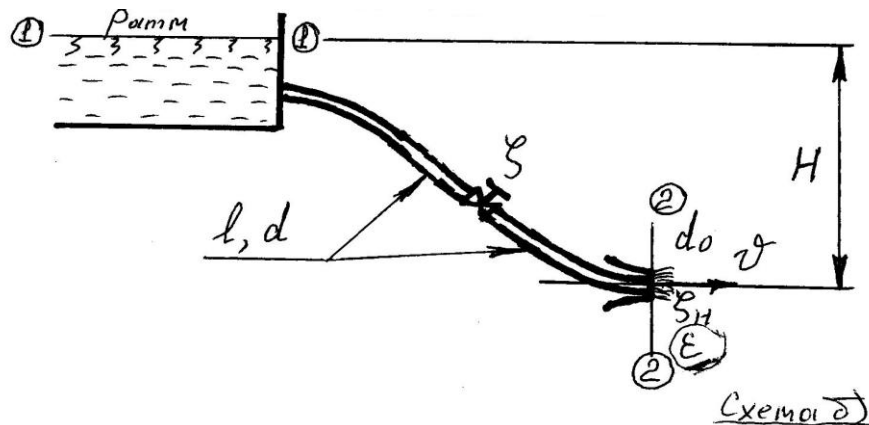
2) Находим полную расчётную длину участков:  $L_i = l_i + \sum l_{\text{экви}}$ .

3) Определяем гидравлическое сопротивление участков:  $a_i = 0,0827 \cdot \lambda_i \frac{L_i}{d_i^5}$ .

4) Записываем ур-ние Бернулли для сечений (1-1) и (2-2):  $H = \sum h_n = \sum a_i \cdot Q^2$ .

5) Определяем искомую величину расхода:  $Q = \sqrt{\frac{H}{\sum a_i}}$ .

**б) Истечение жидкости через трубопровод в атмосферу. Определить расход Q.**

**Решение:**

Уравнение Бернулли для сечений (1-1) и (2-2) имеет вид (при турбулентном течении):

$$H = \frac{v^2}{2g} + \zeta_n \frac{v^2}{2g} + \sum h_n.$$

$$\text{Но так как: } v = \frac{Q}{F_c} = \frac{Q}{F \cdot \varepsilon} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2 \varepsilon}. \quad \text{Тогда } \frac{v^2}{2g} = \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 d^4 \varepsilon^2 \cdot 2g} = 0,0827 \frac{1}{d^4 \varepsilon^2} Q^2.$$

Подставив в уравнение Бернулли, получаем:

$$H = 0,0827 \frac{1}{d^4 \varepsilon^2} Q^2 (1 + \zeta_n) + 0,0827 \lambda \frac{L_n}{d^5} Q^2. \quad \text{Отсюда находим расход } Q.$$