

# Гидравлика

Лекция 7

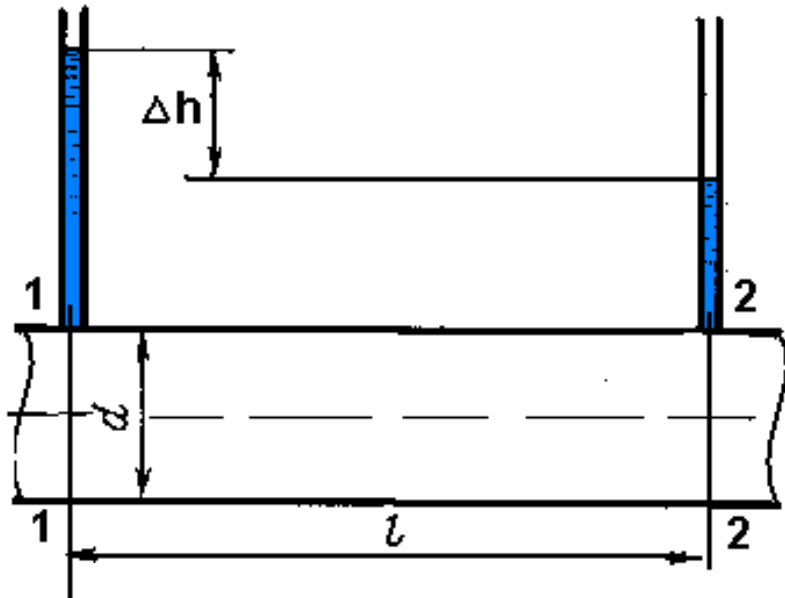
**Гидравлические сопротивления**

## Виды гидравлических сопротивлений и потери напора

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \sum h_n$$

$\sum h_n$  — суммарная потеря удельной энергии, полного напора между сечениями 1 и 2, обусловленная вязкостью жидкости.

Различают два вида гидравлических потерь напора:  
**потери на трение по длине и местные потери.**



Из уравнения Бернулли, записанного для сечений 1 – 1 и 2 – 2 потери по длине в горизонтальной трубе:

$$\sum h_n = h_{тр} = \Delta h$$

Потери напора на трение по длине  $h_\ell = h_{тр}$  определяются общей формулой Дарси:

$$h_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

где  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения, или коэффициент Дарси.

Коэффициент гидравлического трения зависит в общем случае от числа Рейнольдса  $Re$  и относительной шероховатости стенок трубы  $\Delta/d$ :

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

где  $\Delta$  - высота выступов шероховатости внутренних стенок трубы.

# Существует пять зон гидравлического сопротивления:

## **1. Зона вязкого сопротивления.**

Движение ламинарное,  $Re < 2300$ . В этой зоне шероховатость стенок мало влияет на потери напора:

Для круглой трубы:  $\lambda = \frac{64}{Re}$

Для труб гидропривода:  $\lambda = \frac{75}{Re}$

Для канала с произвольной формой сечения:  $\lambda = \frac{A}{Re}$

$A$  - зависит от формы и размеров сечения канала.<sup>4</sup>

## ***2. Переходная зона.***

При  $2300 < Re < 4000$  имеет место переходная зона, в которой движение уже не ламинарное и еще не турбулентное, т. е. здесь режим неустойчивый. Инженерные расчеты в этой зоне выполняются очень редко.

## ***3. Зона гидравлически гладких труб.***

Движение турбулентное  $4000 < Re < 100000$ .  
В этой зоне шероховатость стенок трубы мало влияет на потери напора.

Для определения коэффициента гидравлического трения часто пользуются формулой Блазиуса:

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

#### **4. Зона доквадратичного сопротивления.**

Ориентировочные границы зоны:

$$20 \frac{d}{\Delta_{\text{э}}} < \text{Re} < 500 \frac{d}{\Delta_{\text{э}}},$$

где  $\Delta_{\text{э}}$  - величина эквивалентной шероховатости.

В качестве эквивалента принята **равномерно – зернистая шероховатость.**

Наглядным примером может служить наждачная бумага. Все реальные шероховатости сведены к эквивалентной и приводятся в справочниках.

Под эквивалентной шероховатостью понимают такую **равномерно - зернистую шероховатость**, которая в области квадратичного сопротивления оказывает такое же сопротивление движению жидкости как и труба с естественной шероховатостью.

Для определения коэффициента гидравлического трения пользуются формулой А.Д. Альтшуля:

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

### **5. Зона квадратичного сопротивления.**

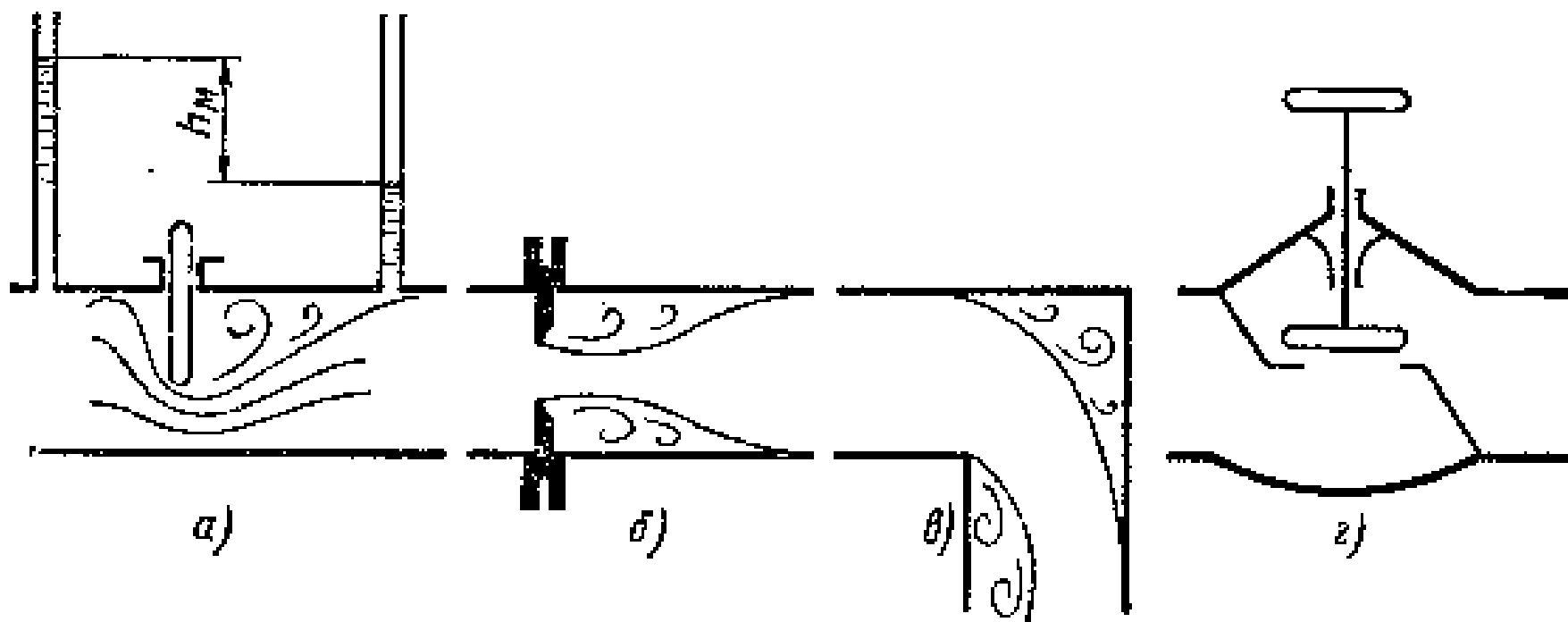
Нижняя граница зоны  $\text{Re} > (500d) / \Delta_{\text{э}}$ . В этой зоне основным фактором, влияющим на сопротивление, является шероховатость стенок трубы:

Пользуемся формулой Б.Л.Шифринсона:

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

## Потери в местных сопротивлениях

Местными называются такие сопротивления, которые оказывают сопротивление свободному движению жидкости за счет какого-либо локального препятствия.





В местных сопротивлениях возможны следующие случаи:

- 1) изменяется величина скорости (внезапное расширение или внезапное сужение, постепенное расширение или сужение потока жидкости);
- 2) изменяется направление течения (резкий или плавный поворот потока жидкости);
- 3) одновременно изменяется величина скорости и направление течения, иногда неоднократно (вентили, краны, задвижки);
- 4) изменяется величина скорости и направление течения за счет деления или слияния потоков жидкости (тройники, крестовины и т.д.).

В местных сопротивлениях сопротивление движению оказывается на небольшом по протяженности участке, поэтому потерями давления по длине местного сопротивления пренебрегают.

За счет резкой деформации потока жидкости, перераспределения скоростей по живому сечению, возникновения водоворотных и вихревых образований в окрестности основного потока, поток теряет часть своей энергии.

Потери энергии на местных сопротивлениях, выраженные через скоростной напор, определяются по формуле Вейсбаха:

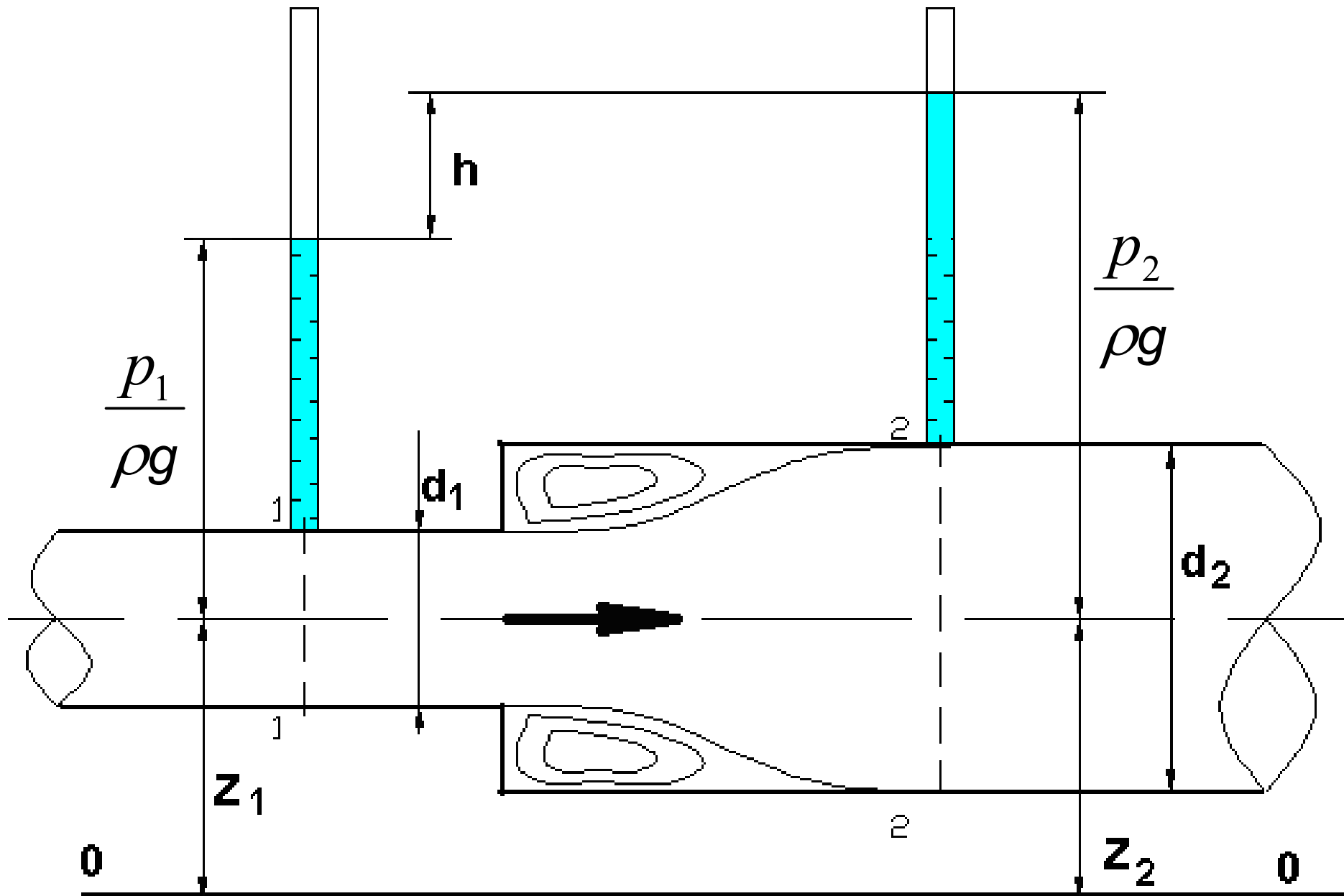
$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g},$$

где  $h_M$  - потери напора в местном сопротивлении, м;  
 $\zeta$  - коэффициент местного сопротивления, зависит от вида местного сопротивления его геометрических размеров и (в общем случае) от числа Рейнольдса;

$v$  - средняя скорость движения жидкости (обычно принимается перед местным сопротивлением), м/с;

$g$  - ускорение силы тяжести,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

# Внезапное расширение потока



Потери напора при внезапном расширении потока определяются по формуле Борда:

$$h_{\text{в.р.}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g},$$

или по общей формуле:

$$h_{\text{в.р.}} = \zeta_{\text{в.р.2}} \frac{v_2^2}{2g}, \quad h_{\text{в.р.}} = \zeta_{\text{в.р.1}} \frac{v_1^2}{2g},$$

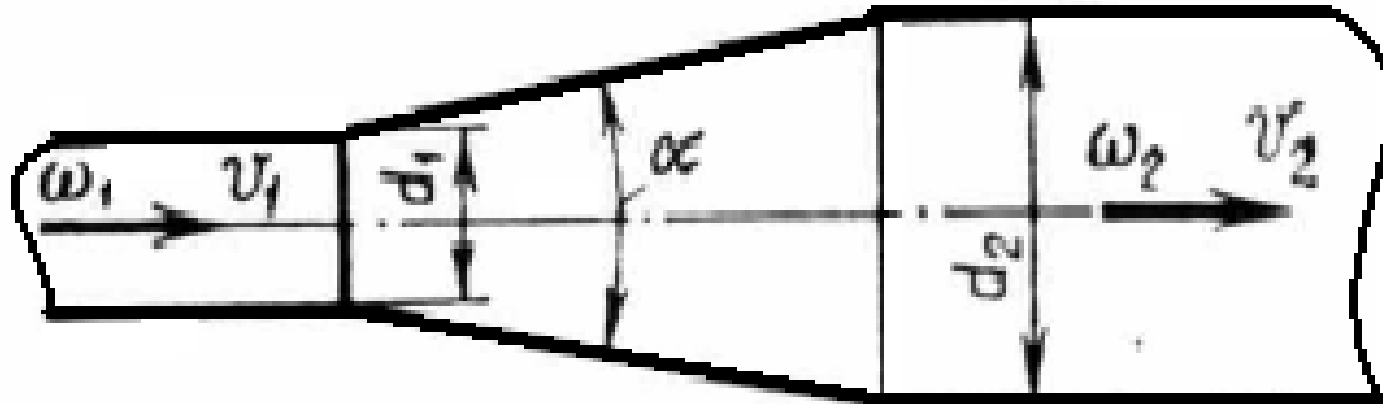
где  $v_1$  - средняя скорость в узкой части трубы;  
 $v_2$  - средняя скорость в широкой части трубы;  
 $\zeta_{\text{в.р.}}$  - коэффициент местного сопротивления при  
внезапном расширении.

Найдем коэффициенты местных сопротивлений используя уравнение неразрывности и формулу площади круга:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad \omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2},$$

$$\zeta_{\text{в.р.2}} = \left( \frac{d_2^2}{d_1^2} - 1 \right)^2, \quad \zeta_{\text{в.р.1}} = \left( 1 - \frac{d_1^2}{d_2^2} \right)^2$$

## Постепенное расширение трубопровода – диффузор



При течении жидкости по диффузору потери значительно меньше, чем при внезапном расширении. У стенок диффузора также образуются завихрения.

Чем больше угол конусности трубопровода, тем больше вихреобразование и соответственно больше потери напора. Потерями по длине в данном случае пренебрегать нельзя.

Потери напора в диффузоре равны сумме потерь на расширение и на трение по длине:

$$h_{\text{диф}} = h_{\text{расш}} + h_{\text{дл}}.$$

Потеря напора на расширение может быть найдена по формуле внезапного расширения с введением поправочного коэффициента  $K_{\text{см}}$ , называемого **коэффициентом смягчения**, который зависит от угла конусности  $\alpha$ :

$$h_{\text{расш}} = K_{\text{см}} \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

Коэффициент местного сопротивления в этом случае:

$$\zeta_{\text{расш}} = K_{\text{см}} \zeta_{\text{вн.р}} = K_{\text{см}} \left( 1 - \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2$$

$K_{\text{см}}$  при  $\alpha < 20^\circ$  можно принять:  $K_{\text{см}} \cong \sin \alpha$ ,  
при  $\alpha \leq 60^\circ$  значение коэффициента  $K_{\text{см}}$   
приводится в таблице.



Потери напора на трение по длине определяют по формуле:

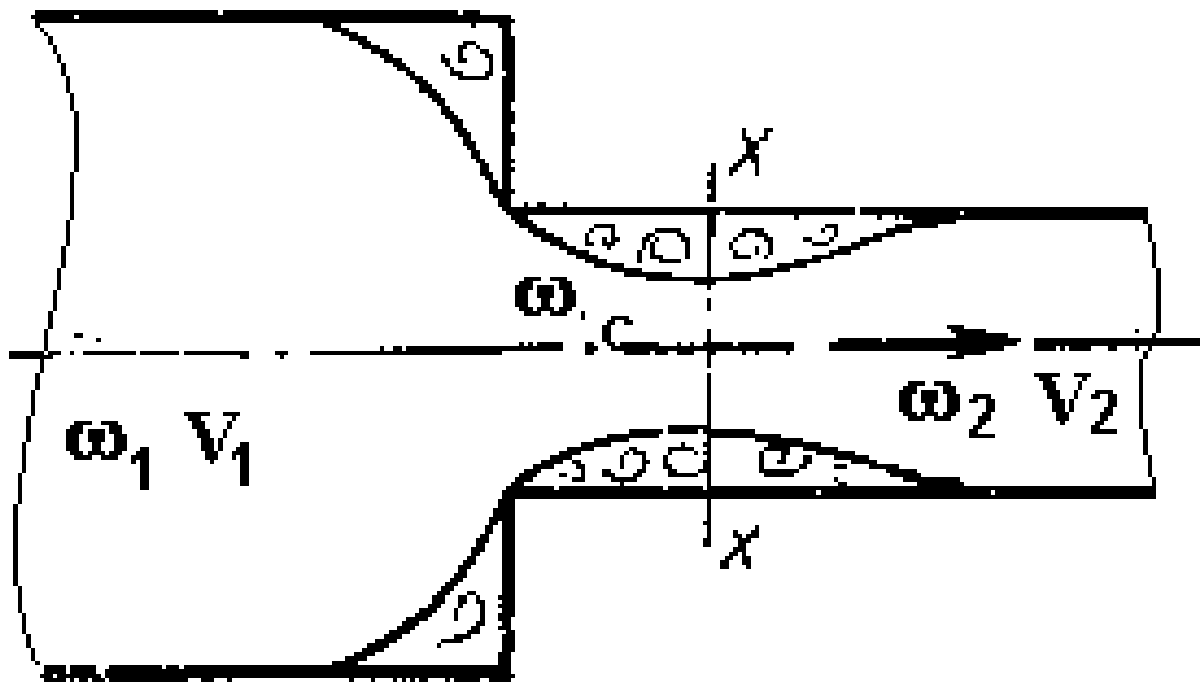
$$h_{\text{дл}} = \frac{\lambda}{8 \sin \alpha/2} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \frac{v_1^2}{2g}.$$

Суммарный коэффициент местного сопротивления для диффузора равен:

$$\zeta_{\text{диф}} = K_{\text{см}} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 + \frac{\lambda}{8 \sin \alpha/2} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right).$$

Наименьшие потери напора в диффузоре получают при угле расширения его в пределах от 5 до 10°.

## Внезапное сужение потока



Для расчетов используют формулу внезапного расширения с  $\omega_c$  до  $\omega_2$ :

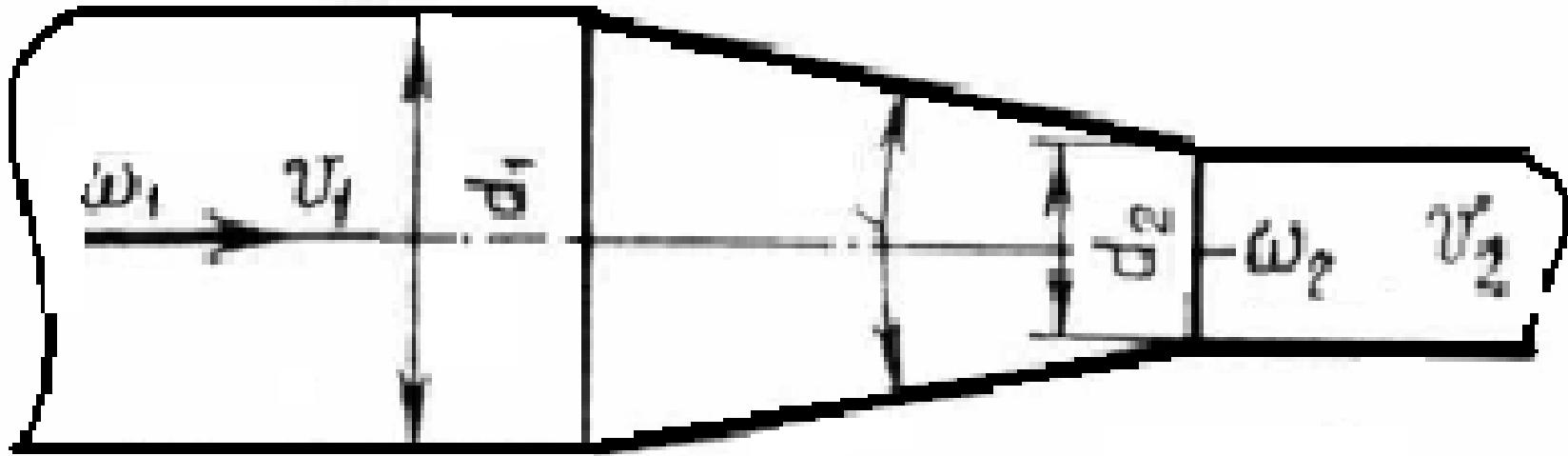
$$\zeta_2 = \left( \frac{\omega_2}{\omega_c} - 1 \right)^2.$$

$\frac{\omega_c}{\omega_2} = \varepsilon$  - степень сжатия струи. Зависит от  $\frac{\omega_1}{\omega_2} = n$ .

Для практических расчетов пользуются формулой И.Е. Идельчика:

$$\zeta_2 = \frac{1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}}{2}.$$

### Постепенное сужение трубопровода



Отрыв потока от стенок в этом случае возможен только на выходе из конфузора в цилиндрическую часть трубопровода.

Потери в конфузоре равны сумме потерь на постепенное сужение и на трение по длине:

$$h_{\text{конф}} = h_{\text{п.с}} + h_{\text{дл}}$$

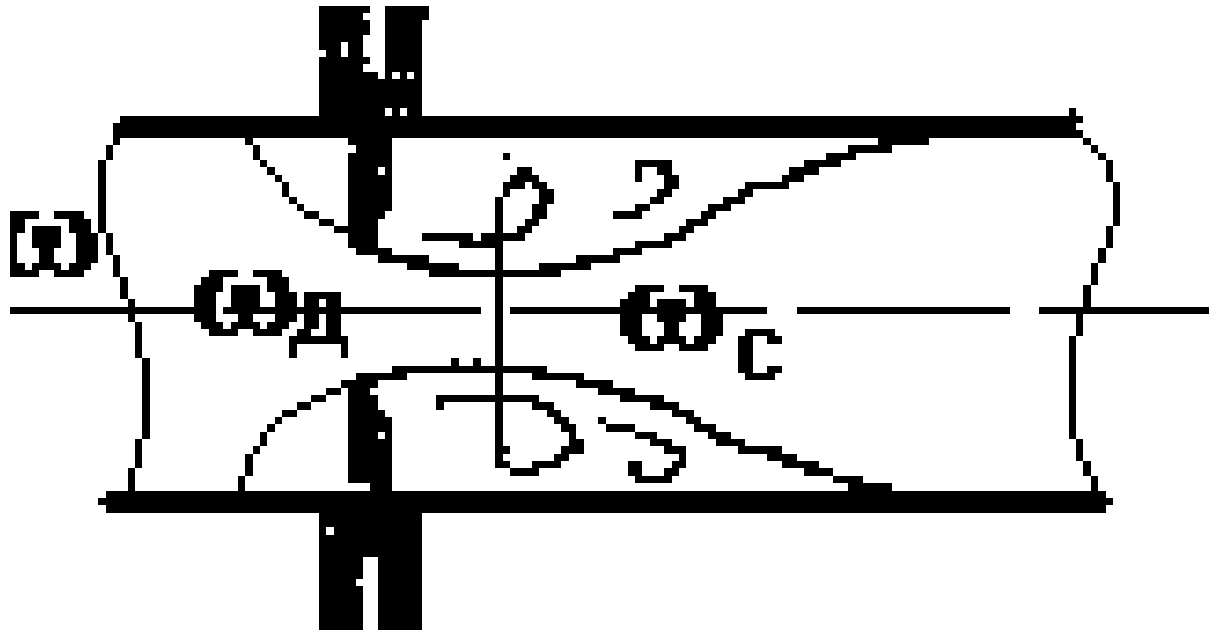
Коэффициент местного сопротивления при плавном сужении:

$$\zeta_{\text{п.с}} = K_{\text{суж}} \zeta_{\text{вн.с}}$$

$\zeta_{\text{вн.с}}$  - коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении;

$K_{\text{суж}}$  – коэффициент смягчения, учитывающий плавное сужение, который зависит от угла конусности.

# Диафрагма



Диафрагма - тонкая перегородка с отверстием в канале.

Используют формулу внезапного расширения с  $\omega_C$  до  $\omega$ :

$$\zeta_D = \left( \frac{\omega}{\omega_C} - 1 \right)^2, \quad \frac{\omega_C}{\omega_D} = \varepsilon, \quad \zeta_D = \left( \frac{\omega}{\omega_D \cdot \varepsilon} - 1 \right)^2$$

## Местные потери при ламинарном движении жидкости

Коэффициенты местного сопротивления могут быть ориентировочно определены по формуле:

$$\zeta = \frac{A}{\text{Re}} + \zeta_{\text{кв}},$$

где  $A$  – число определяемое формой местного сопротивления;

$\zeta_{\text{кв}}$  – коэффициент местного сопротивления на режиме квадратичного сопротивления, т.е. при  $\text{Re} \rightarrow \infty$ .