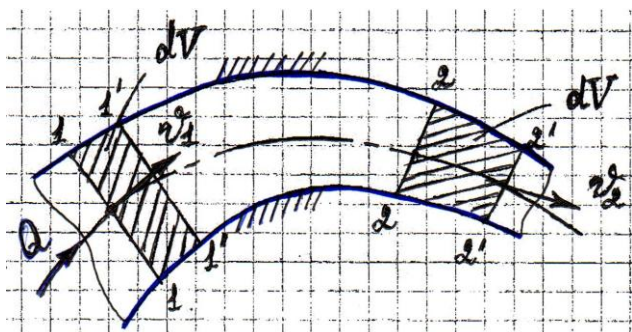


Теорема импульса.

Пусть имеется некоторый поток жидкости в сужающемся канале с расходом между сечениями (1-1) и (2-2) равным Q . Движение считаем установившимся. За время dt этот участок переместится в положение, определяемое сечениями (1'-1') и (2'-2'). Канал – неподвижный и недеформируемый.



Будем считать, что:

- 1) жидкость несжимаема;
- 2) движение установившееся;
- 3) имеем одномерную модель потока с равномерным распределением скоростей по сечению.

Т.к. от сечения (1-1) до сечения (2-2) произошло изменение скоростей, то изменилось и количество движения (импульс сил), т.е. на поток действовали силы.

Обозначим: K – количество движения; ΣP – сумма всех внешних сил;

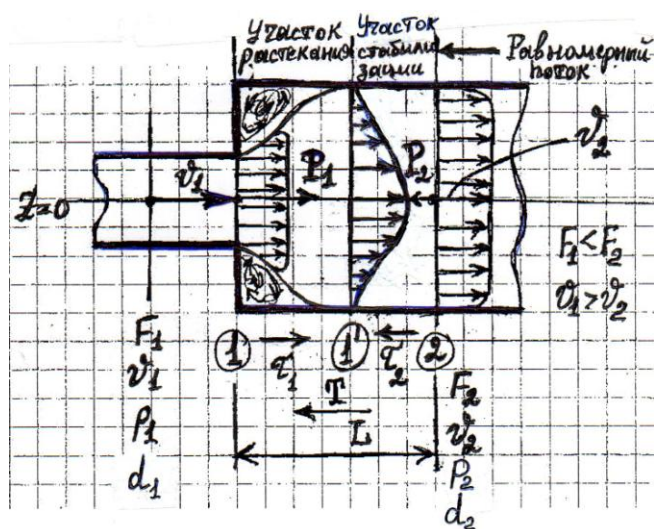
Тогда, $dK = \Sigma P \cdot dt$; где $dK = K_{1'-2'} - K_{1-2} = K_{2-2'} - K_{1-1'}$ или

$dK = \rho \cdot dV \cdot v_2 - \rho \cdot dV \cdot v_1$. Так как, $dV = Q \cdot dt$, то получаем:

$\rho \cdot Q \cdot (v_2 - v_1) = \Sigma P$ - теорема импульса, где $\rho Q v$ – секундное количество движения

потока в данном сечении.

Приращение секундного количества движения потока в канале равно сумме действующих на него внешних сил.

Внезапное расширение канала.

Характер протекания процесса:

- 1) Происходит инерционный отрыв на кромке, образованной уступом.
- 2) Постепенное растекание струи (поток отрывается от стенок канала, но расширяется постепенно).
- 3) Образование вихревой или водоворотной зоны, т.к. в сечении 1' $p_1 > p_1 \Rightarrow$ у стенок жидкость течёт в другую сторону.

На участке (1-1') проявляются два вида движения – циркуляционное (частицы движутся по замкнутому контуру) и транзитное (частицы движутся прямо).

- 4) На участке стабилизации потока происходит

размывание вихрей и выравнивание осреднённых скоростей (здесь происходит интенсивный переход энергии в тепло).

5) Выравнивание скоростей приводит к изменению давлений (т.е. $p_2 > p_1$) и к уменьшению количества движения потока.

6) Стабилизация потока происходит на длине – $L \approx 10 \cdot d_2$.

При расчёте потока будем использовать следующие соотношения:

I. Уравнение постоянства расхода - $v_1 \cdot F_1 = v_2 \cdot F_2 = Q$.

II. Уравнение сохранения энергии (уравнение Бернулли):

$z_1 = z_2 = 0$ (т.к. плоскость отсчёта совпадает с осью); $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ (турб. режим), тогда

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_n \quad (1)$$

III. Теорему импульса: $\rho \cdot Q \cdot (v_2 - v_1) = \sum P$.

При учёте всех внешних сил P имеем ввиду, что есть нормальные силы (обусловлены действием внутренней поверхности канала на жидкость) и силы трения (из-за наличия касательных напряжений).

Ввиду малости – силами трения пренебрежём:

- так как участок деформации потока относительно мал;
- имеется взаимная компенсация τ_1 и τ_2 .

В дальнейшем будем оперировать только силами давления, причём сила P_1 равна: $P_1 = p_1 \cdot F_2$. Тогда

$$\sum P_x = p_1 \cdot F_2 - p_2 \cdot F_2 \quad \text{или} \quad \rho Q \cdot (v_2 - v_1) = F_2 (p_1 - p_2).$$

Разделим обе части равенства на $F_2 \rho g$, получим:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{v_2}{g} (v_2 - v_1) \quad \text{- формула справедлива лишь для турбулентного режима.}$$

Из уравнения (1), принимая во внимание полученную формулу, получаем:

$$h_n = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} = \frac{v_2}{g} (v_2 - v_1) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} = \frac{v_2^2}{g} - \frac{v_1 v_2}{g} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{2v_1 v_2}{2g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

В итоге имеем: $h_n = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$ - **Формула Борда.**

Потеря напора при внезапном расширении русла равна скоростному напору, определённом по разности скоростей до и после расширения.

С учётом ур. неразр., что скорость в широком сечении равна: $v_2 = v_1 \cdot \frac{F_1}{F_2}$, имеем:

$$\begin{aligned} h_{n, \text{ep1}} &= \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = \frac{1}{2g} (v_1^2 - 2v_1 v_2 + v_2^2) = \frac{1}{2g} \left(v_1^2 - 2v_1 \cdot v_1 \frac{F_1}{F_2} + v_1^2 \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 \right) = \frac{v_1^2}{2g} \left(1 - 2 \frac{F_1}{F_2} + \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 \right) = \\ &= \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \zeta_{\text{ep1}} \frac{v_1^2}{2g}, \quad \text{т.е.} \quad \zeta_{\text{ep1}} = \left(1 - \frac{F_1}{F_2} \right)^2 = \left(1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \right)^2, \end{aligned}$$

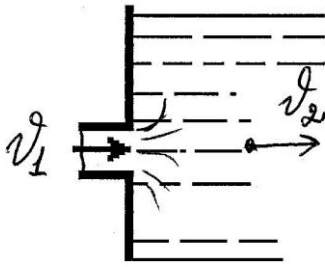
где ζ_{ep1} – коэффициент потерь напора при внезапном расширении канала.

Через скорость в узком сечении $v_1 = v_2 \cdot \frac{F_2}{F_1}$, получим:

$$\begin{aligned} h_{n, \text{ep2}} &= \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = \frac{1}{2g} (v_1^2 - 2v_1 v_2 + v_2^2) = \frac{1}{2g} \left(v_2^2 \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 - 2 \cdot v_2 \frac{F_2}{F_1} v_2 + v_2^2 \right) = \frac{v_2^2}{2g} \left(\left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2 - 2 \frac{F_2}{F_1} + 1 \right) = \\ &= \left(\frac{F_2}{F_1} - 1 \right)^2 \frac{v_2^2}{2g} = \zeta_{\text{ep2}} \frac{v_2^2}{2g}, \quad \text{т.е.} \quad \zeta_{\text{ep2}} = \left(\frac{F_2}{F_1} - 1 \right)^2 = \left(\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 - 1 \right)^2, \end{aligned}$$

где $\zeta_{вр2}$ – коэффициент потерь напора при внезапном расширении канала.

Частный случай. В случае истечения жидкости из ограниченного объема в неограниченный объем (т.е. $F_2 \rightarrow \infty, v_2 \rightarrow 0$), имеем:

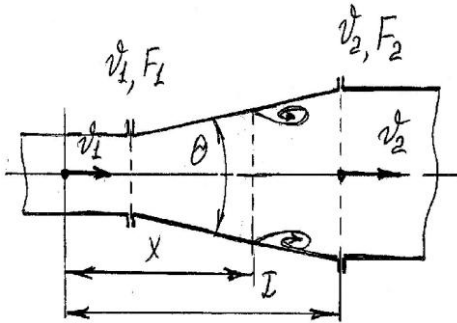


$$h_{н\text{ вых}} = \zeta_{\text{вых}} \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_1^2}{2g}, \quad \text{так как } \zeta_{\text{вых}} = 1.$$

Диффузоры.

Местное сопротивление, при котором труба постепенно расширяется, называется диффузором.

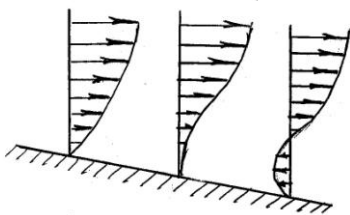
Течение жидкости в диффузоре сопровождается уменьшением скорости и увеличением давления, происходит преобразование кинетической энергии жидкости в энергию давления.



Слои жидкости, прилегающие к стенкам, обладают столь малой кинетической энергией, что подчас оказываются не в состоянии преодолеть повышенное давление, поэтому они останавливаются или даже начинают двигаться обратно (вид А на рисунке).

Основной поток наталкивается на эти противотоки, возникают вихреобразования и отрыв потока от стенки:

Вид А:



Интенсивность этих явлений возрастает с увеличением угла расширения диффузора.

Основная задача при проектировании и эксплуатации потока обеспечить безотрывное движение жидкости на длине L.

В хорошем диффузоре гидравлические потери напора на порядок меньше, чем при внезапном расширении. Потери напора в диффузоре равны сумме потерь на трение и потерь, обусловленных расширением потока:

$$h_n = h_{тр} + h_{расш},$$

где $h_{тр}$ – потери напора на преодоление трения по длине диффузора;

$h_{расш}$ – потери напора при расширении потока.

Однако, часто за основу определения потерь напора в диффузоре, принимают формулу Борда:

$$h_n = \varphi_{диф} \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}, \quad \text{где } \varphi_{диф} \text{ – безразмерный коэффициент сопротивления диффузора.}$$

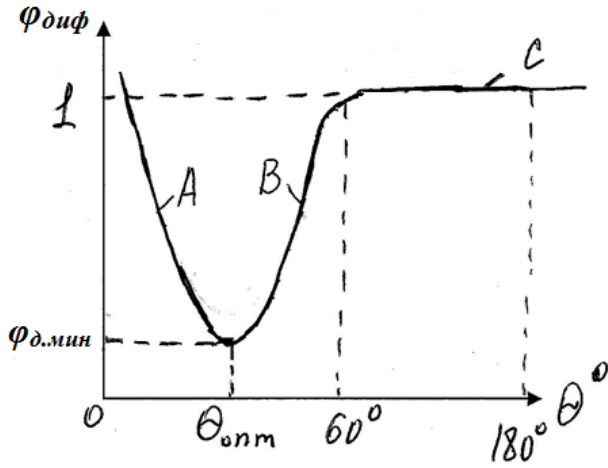
Коэффициент диффузора $\varphi_{диф}$ определяется экспериментально и зависит главным образом от:

- угла раскрытия θ° ;

- от отношения площадей $\frac{F_2}{F_1}$;

- относительной гладкости $\frac{d}{\Delta}$.

График зависимости коэффициента диффузора - $\varphi_{диф} = f(\theta)$ имеет следующий вид:



На графике имеем:

- **участок А** – в потоке доминируют потери на трение (при увеличении угла раскрытия диффузора θ° – уменьшается L и уменьшаются потери).

- **участок В** – нарастают потери из-за отрыва, вихреобразования и удара;

- **участок С** – полный отрыв, т.е. $x \approx 0$.

На практике в целях сокращения длины диффузора

при заданном отношении $\frac{F_2}{F_1}$ обычно принимают:

$\theta_{опт} = 6^\circ - 8^\circ$, а $\varphi_{диф.мин} = 0,1 - 0,2$.

Диффузор устанавливают для уменьшения потерь, возникающих при переходе от меньшего диаметра трубы к большему.

Внезапное сужение канала.

В сечении (С-С) – максимальное сжатие струи из-за инерционного срыва по кромке:

$F_c < F_2, v_c > v_2, p_c < p_2.$

Примечание: в сечении (С-С) при определённых условиях может возникнуть кавитация.

Потери напора можно определить, используя формулу Борда, полагая, что в основном потери будут за сжатым сечением:

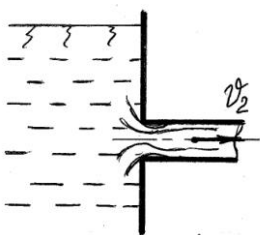
$$h_n = 0,5 \cdot \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \right) \frac{v_2^2}{2g}.$$

Коэффициент сжатия в этом случае равен: $\varepsilon = \frac{F_c}{F_1} < 1$. Его можно определить по

эмпирической формуле: $\varepsilon = 0,62 + 0,38 \cdot \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^2.$

Частный случай. В случае истечения жидкости из неограниченного объёма в ограниченный объём (т.е.

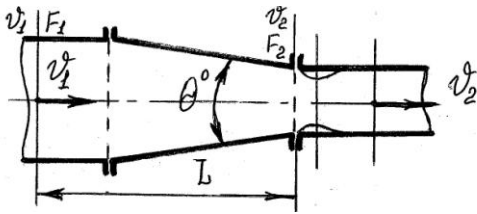
$F_1 \rightarrow \infty, v_1 \rightarrow \infty$), имеем:



$$h_n = \zeta_{ex} \frac{v_2^2}{2g}, \text{ где } \zeta_{ex} = 0,5 \text{ (при прямых углах соединения трубы).}$$

Конфузоры.

Конфузор – это постепенно сужающаяся труба.



Конфузоры бывают конические прямоосные и криволинейные (коноидальные).

При постепенном сужении трубы происходит увеличение скорости и соответственно падение давления.

Так как жидкость движется от большего давления к меньшему, то причин для срыва потока (как это имеет место в диффузоре) в конфузоре меньше. Отрыв потока от стенки с небольшим сжатием возможен на выходе из конфузора в месте соединения конической части с цилиндрической.

Потери в конфузоре также складываются из потерь на постепенное сужение и потерь на трение:

$$h_p = h_{суж} + h_{тр}.$$

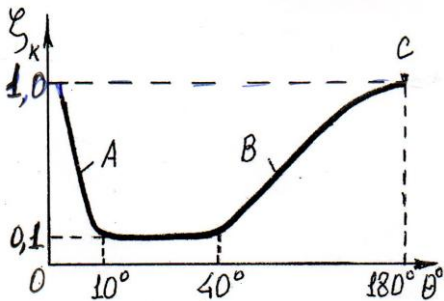
Потери напора на сужение определяются по формуле:

$$h_{суж} = \zeta_{\kappa} \frac{v_2^2}{2g}, \text{ где } \zeta_{\kappa} = f\left(\theta^\circ, \frac{F_2}{F_1}\right),$$

где ζ_{κ} – коэффициент местного сопротивления при плавном сужении тр-да.

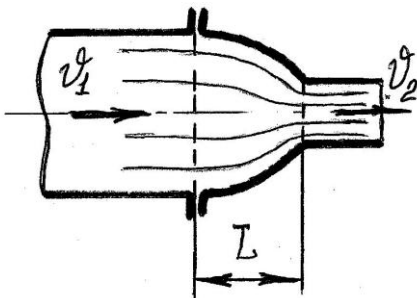
График зависимости коэффициента сопротивления конфузора – $\zeta_{\kappa} = f(\theta)$ имеет следующий вид

(при $\frac{F_2}{F_1} = const$):



На графике $\zeta_{\kappa} = f(\theta)$:

- **участок А** – уменьшение коэффициента ζ_{κ} при увеличении угла θ° (малые потери трения, малые вихри в сечении С-С);
- **участок В** – увеличение ζ_{κ} при увеличении угла θ° (из-за увеличения вихревых потерь в сечении С-С);
- **точка С** – соответствует случаю внезапного сужения.



Преимущества коноидальных конфузоров:

- 1) Уменьшены осевые габариты;
- 2) Так как длина L сравнительно невелика, то $\zeta_{\kappa} = 0,02 - 0,04$.
- 3) Хорошая гидродинамическая устойчивость потока.