

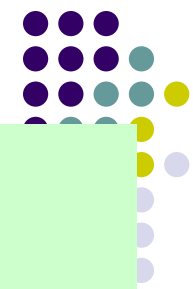
Раздел 4. Гидравлические сопротивления

4.1. Виды гидравлических сопротивлений

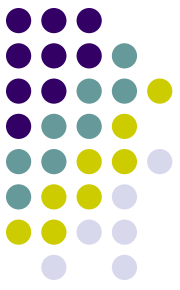


При движении жидкости в трубе между нею и стенками трубы возникают дополнительные силы сопротивления, в результате чего частицы жидкости, прилегающие к поверхности трубы, тормозятся. Это торможение благодаря вязкости жидкости передается следующим слоям, причем скорость движения частиц по мере удаления их от оси трубы постепенно уменьшается.

Равнодействующая сил сопротивления T направлена в сторону, противоположную движению, и параллельна направлению движения. Это и есть **силы гидравлического трения (сопротивления гидравлического трения)**.



- Для преодоления сопротивления трения и поддержания равномерного поступательного движения жидкости необходимо, чтобы на жидкость действовала сила, направленная в сторону ее движения и равная силе сопротивления, т.е. необходимо затрачивать энергию. Энергию или напор, необходимые для преодоления сил сопротивления, называют **потерянной энергией или потерянным напором.**
- Потери напора, затрачиваемые на преодоление сопротивления трения, носят название **потерь напора на трение или потерь напора по длине потока** (линейные потери напора) и обозначаются через $h_{тр}$.



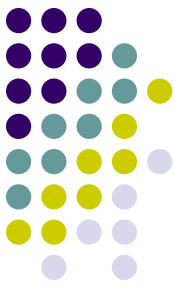
Однако трение является не единственной возможной причиной, вызывающей потери напора; резкие изменения сечения также оказывают сопротивление движению жидкости (так называемое сопротивление формы) и вызывают потери энергии. Существуют и другие причины, вызывающие потери напора, например внезапное изменение направления движения жидкости. Потери напора, вызываемые резким изменением конфигурации границ потока (затрачиваемые на преодоление сопротивления формы), называют **местными потерями напора или потерями напора на местные сопротивления** и обозначают через h_m .

Таким образом, потери напора при движении жидкости складываются из потерь напора на трение и потерь на местные сопротивления, т. е.

$$h_{\omega} = h_{тр} + h_m$$

Режимы движения жидкостей.

Критерий О. Рейнольдса



Наблюдения показывают, что в природе существуют два различных вида движения жидкости:

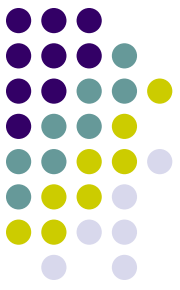
слоистое, упорядоченное или ламинарное движение, при котором отдельные слои жидкости скользят друг относительно друга, не смешиваясь между собой,

Ламинарный режим для воды и воздуха возможен лишь при их движении в трубах очень малого диаметра. Более вязкие жидкости, например масла, могут двигаться ламинарно даже в трубах значительного диаметра.

неупорядоченное, так называемое турбулентное движение, когда частицы жидкости движутся по сложным, все время изменяющимся траекториям и в жидкости происходит интенсивное перемешивание.

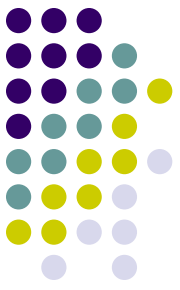
Уже давно было известно, что вязкие жидкости (масла) движутся большей частью упорядоченно, а маловязкие жидкости (вода, воздух) почти всегда неупорядоченно.

Ясность в вопрос о том, как именно будет происходить движение жидкости в тех или иных условиях, была внесена в 1883 г. в результате опытов английского физика О. Рейнольдса.

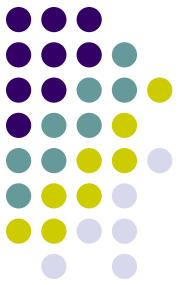


- О. Рейнольдс установил общие условия, при которых возможны существование ламинарного и турбулентного режима движения жидкости и переход от одного режима к другому. Оказалось, что состояние (режим) потока жидкости в трубе зависит от величины безразмерного числа, которое учитывает основные факторы, определяющие это движение: среднюю скорость v , диаметр трубы d , плотность жидкости ρ и ее абсолютную вязкость μ . Это число (позже ему было присвоено название числа Рейнольдса) имеет вид:

- $$\text{Re} = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{vd}{v_{\text{вяз}}}$$

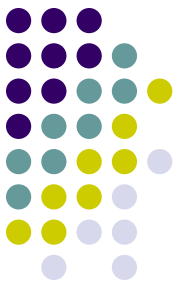


- Величина d в числе Рейнольдса может быть заменена любым линейным параметром, связанным с условиями течения или обтекания (диаметр трубы, диаметр падающего в жидкости шара, длина обтекаемой жидкостью пластинки и др.).
- Значение числа Рейнольдса, при котором происходит переход от ламинарного движения к турбулентному, называют **критическим числом Рейнольдса** и обозначают $Re_{кр}$.

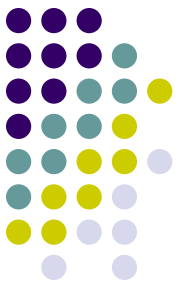


При $Re > Re_{кр}$ режим движения
является турбулентным,
при $Re < Re_{кр}$ – ламинарным.

Величина критического числа
Рейнольдса зависит от условий входа
в трубу, шероховатости ее стенок,
отсутствия или наличия
первоначальных возмущений в
жидкости, конвекционных токов и др.

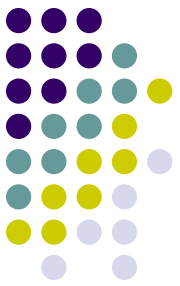


- Вопрос о неустойчивости ламинарного движения и его переходе в турбулентное, а также о величине критического числа Рейнольдса подвергся тщательному теоретическому и экспериментальному изучению, но до сих пор еще уточняется. Наиболее часто в расчетах принимают для критического числа Рейнольдса значение
- $Re_{кр} = 2300$,
- отвечающее переходу движения жидкости из турбулентного в ламинарное;
- при переходе движения из ламинарного в турбулентное критическое число Рейнольдса имеет большую величину (для хорошо закругленного плавного входа оно может быть доведено до 20 000).



- Проведенные исследования показывают также, что критическое значение числа Рейнольдса увеличивается в сужающихся трубах и уменьшается в расширяющихся. Это можно объяснить тем, что при ускорении движения частиц жидкости в сужающихся трубах их тенденция к поперечному перемешиванию уменьшается, а при замедленном течении в расширяющихся трубах усиливается.
- По критическому значению числа Рейнольдса легко можно найти также критическую скорость, т.е. скорость, ниже которой всегда будет иметь место ламинарное движения жидкости:

$$v_{кр} = \frac{Re_{кр} v_{вяз}}{d} = \frac{2300v_{вяз}}{d}$$



Общее выражение для потерь напора на трение при равномерном движении жидкости в трубах

Найдем общее выражение для потерь напора на трение при равномерном движении жидкости в трубах, справедливое как для ламинарного, так и для турбулентного режимов.

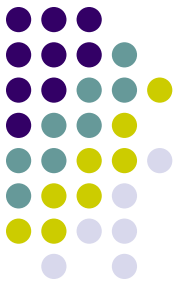
Рассмотрим равномерное течение жидкости в трубе постоянного диаметра. Выделим два сечения 1 и 2. Потерю напора между этими сечениями определим из уравнения Бернулли:

Из этого уравнения найдем величину потерь энергии h_{mp}

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + h_{mp}$$

Выражение $h_{mp} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right)$ называют **уравнением равномерного движения жидкости в трубопроводах.**

Турбулентное равномерное движение жидкости в трубах.



При равномерном движении в трубах потери напора на трение по длине $h_{л}$ как при турбулентном, так и при ламинарном движении определяют для круглых труб по **формуле Дарси-Вейсбаха**:

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

для труб любой формы сечения по формуле

$$h_{л} = \lambda \frac{l}{4R} \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{l}{d_{г}} \frac{v^2}{2g}$$

где λ – коэффициент гидравлического трения (безразмерный)

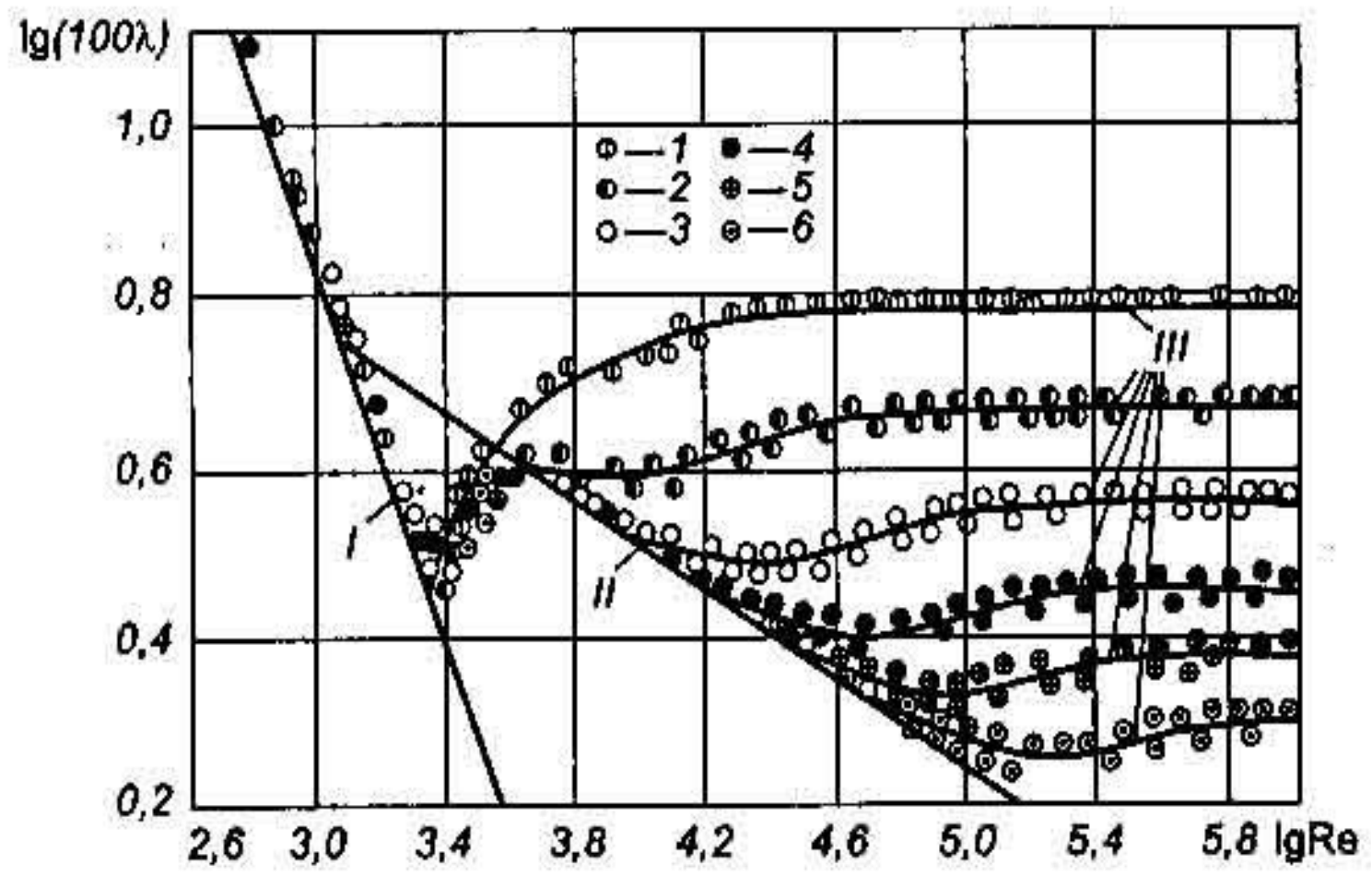
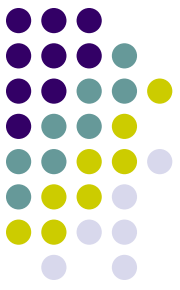


Рис. 1. График Никурадзе:

I - линия ламинарного движения; II – линия гидравлически гладких труб;
III – линии вполне шероховатых труб

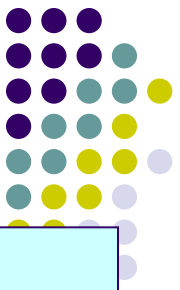


Трубы, в которых коэффициент гидравлического трения λ не зависит от вязкости жидкости (числа Рейнольдса), а зависит только от относительной шероховатости, называют **вполне шероховатыми**.

Трубы же, в которых коэффициент λ вовсе не зависит от шероховатости стенок, а зависит только от числа Рейнольдса, называют **гидравлически гладкими**.

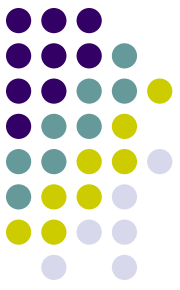
Из графика Никурадзе видно, что одна и та же труба в одних условиях может быть гидравлически гладкой, а в других – вполне шероховатой.

Область движения, в которой λ зависит и от Re , и от k/d , называют **переходной (область смешанного трения)**.



Полученным результатам можно дать следующее физическое истолкование.

При малых числах Рейнольдса жидкость обтекает выступы шероховатости без образования и отрыва вихрей благодаря значительному влиянию вязкости жидкости; свойства поверхности стенок труб не оказывают при этом влияния на сопротивление и кривые $\lambda = f(Re)$ совпадают с прямой II (для гладких труб). Когда же с увеличением скорости (т. е. числа Рейнольдса) от бугорков шероховатости начинают отрываться вихри, то свойства поверхности уже оказывают влияние на сопротивление и кривые $\lambda = f(Re)$ отклоняются от линии гладкого трения.



- В результате опытов сопротивлений трубопроводов были предложены различные эмпирические формулы для определения коэффициента гидравлического трения λ .
- Для гидравлически гладких труб широкое распространение получила **формула Блазиуса**

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0.25}}$$

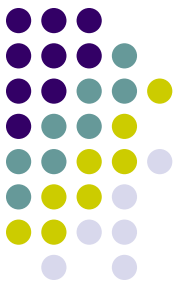


- Для **полиэтиленовых водопроводных труб**, обычно работающих в области гидравлически гладких труб, применяют **формулу Ф.А. Шевелева**

$$\lambda = \frac{0,0134}{(dv)^{0.226}}$$

- Для **вполне шероховатых труб** применяют формулу **Б.Л. Шифринсона:**

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k}{d} \right)^{0.25}$$



- **Ламинарное течение.** При ламинарном течении в круглых трубах коэффициент гидравлического трения вычисляют по формуле
 - $\lambda = 64 / Re$
 - для труб любой формы сечения –
 - $\lambda = A / Re$
 - где A – коэффициент, численное значение которого зависит от формы поперечного сечения трубы.



число Рейнольдса для ламинарного режима определяется по формуле $Re = \frac{v d_{\text{э}}}{\nu_{\text{вяз}}}$

где $d_{\text{э}} = 4R = 4\omega / \chi$

Значения коэффициента формы A и эквивалентного диаметра $d_{\text{э}}$ для труб с различной формой поперечного сечения справочные данные.

- зависимость для определения потерь напора по длине при ламинарном движении в круглых трубах 32v вяз l v в виде

$$h_l = \frac{32 \nu_{\text{вяз}} l v}{d^2 g}$$

- Эта формула получила название **формулы Пуазейля**

Местные гидравлические сопротивления



Местные потери напора обуславливаются преодолением местных сопротивлений, создаваемых фасонными частями, арматурой и прочим оборудованием трубопроводных сетей. Местные сопротивления вызывают изменение величины или направления скорости движения жидкости на отдельных участках трубопровода, что связано с появлением дополнительных потерь напора. Движение в трубопроводе при наличии местных сопротивлений является неравномерным. Потери напора в местных сопротивлениях h_m (местные потери напора) вычисляют по **формуле**

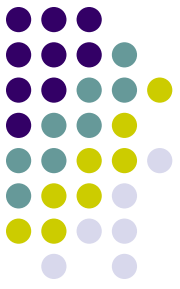
Вейсбаха:

$$h_m = \xi \frac{v^2}{2g}$$

- где v – средняя скорость в сечении, как правило, расположенном ниже по течению за данным сопротивлением;
- ξ – безразмерный коэффициент местного сопротивления.

Потери давления Δp_m :

$$\Delta p_m = \xi \rho v^2 / 2$$



Значения коэффициентов местных сопротивлений зависят от конфигурации местного сопротивления и режима потока, подходящего к сопротивлению; этот режим определяется коэффициентом гидравлического трения λ подходящего потока, т.е. числом Рейнольдса и относительной шероховатостью.

Внезапное расширение трубопровода



Потери напора при внезапном расширении трубопровода находят по **формуле Борда**:

$$h_{\text{вн.р}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = \xi_{\text{вн.р1}} \frac{v_1^2}{2g} = \xi_{\text{вн.р2}} \frac{v_2^2}{2g}$$

где v_1 и v_2 – средние скорости течения соответственно до и после расширения.

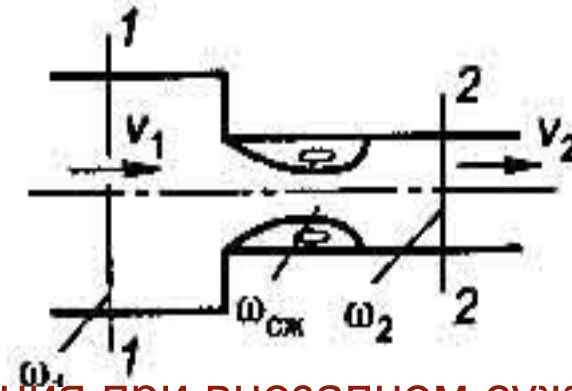
- Коэффициенты местного сопротивления определяются выражениями (справочные даны):

-

$$\xi_{\text{вн.р1}} = \left(1 - \omega_1 / \omega_2\right)^2 \quad \xi_{\text{вн.р2}} = \left(\omega_2 / \omega_1 - 1\right)^2$$

- где ω_1 и ω_2 – площади сечений трубопровода соответственно до и после расширения.

Внезапное сужение трубопровода



Коэффициент местного сопротивления при внезапном сужении

$$\xi_{\text{вн.с.}} = (1/\varepsilon - 1)^2$$

где ε – коэффициент сжатия струи, представляющий собой отношение площади сечения сжатой струи в узком трубопроводе $\omega_{\text{сж}}$ к площади сечения узкой трубы

$$\varepsilon = \omega_{\text{сж}} / \omega_2$$

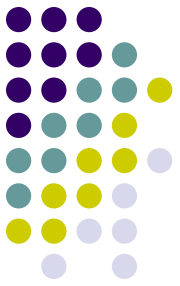
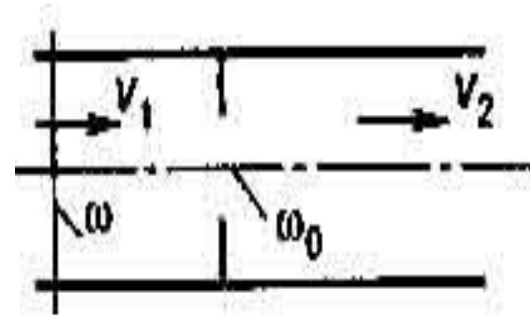
Коэффициент сжатия струи ε зависит от степени сжатия

потока $n = \omega_2 / \omega_1$

и может быть найден по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}$$

Диафрагма на трубопроводе



Коэффициент местного сопротивления диафрагмы, расположенной внутри трубы постоянного сечения (отнесенный к сечению трубопровода),

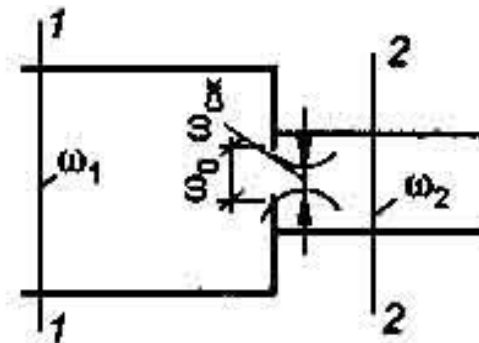
$$\xi_{\text{диафр}} = \left(\frac{1}{n_{\text{диафр}} \varepsilon} - 1 \right)^2$$

где $n_{\text{диафр}} = \omega_0 / \omega$ – отношение площади отверстия диафрагмы ω_0 к площади сечения трубы ω

Для диафрагмы, расположенной на выходе в трубопровод другого диаметра, коэффициент сопротивления, отнесенный к сечению узкого трубопровода

$$\xi_{\text{диафр}} = \left(\frac{1}{n_{\text{диафр}} \varepsilon} - \frac{1}{m} \right)^2$$

где $m = \omega_2 / \omega_1$, $n_{\text{диафр}} = \omega_0 / \omega_1$



Вход в трубу из резервуара



Для коэффициента сопротивления следует принимать следующие значения:

- при острых кромках $\xi_{\text{вх}} = 0,4 - 0,5$;
- при закругленных кромках $\xi_{\text{вх}} = 0,2$;
- при весьма плавном входе $\xi_{\text{вх}} = 0,05$.

Выход из трубы

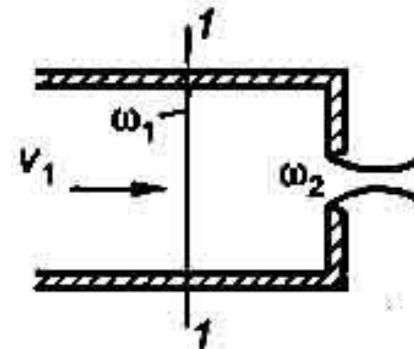


Коэффициент сопротивления $\xi_{\text{вых}}$,
отнесенный к сечению трубы

$$\xi_{\text{вых}} = \frac{v_1^2}{2g}$$

- При выходе из трубы через диафрагму в конце трубопровода

$$\xi_{\text{вых}} = \left(\frac{1}{n\varepsilon} \right)^2$$



Сварные стыки на трубопроводах



- Коэффициент сопротивления стыка определяется как:

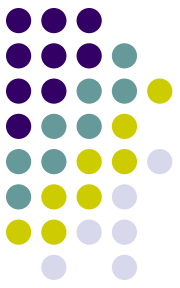
$$\xi_{cm} = 14(\delta / d)^{3/2}$$

где δ – эквивалентная высота сварного стыка:
для стыков с подкладными кольцами $\delta = 5$ мм;
для стыков электродуговой и контактной сварки $\delta = 3$ мм.

- Возрастание сопротивления, вызываемое стыками, можно определить по формуле

где $K = \lambda_1 / \lambda$ – коэффициент $\xi_{cm} d / \lambda$ относительного увеличения сопротивления трубопровода (отношение сопротивления трубопровода со стыками к сопротивлению трубопровода без стыков);
 l – расстояние между стыками (длина труб).

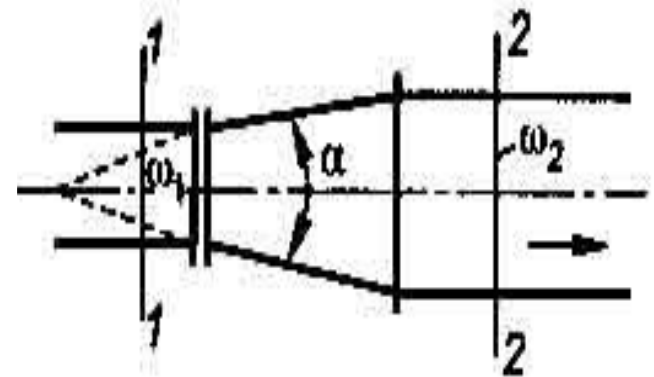
Потери напора при изменении направления потока Постепенное расширение трубопровода



Коэффициент сопротивления для конически расходящихся переходных конусов (диффузоров) зависит от угла конусности и соотношения диаметров. Для коротких конусов коэффициент сопротивления, отнесенный к более широкому сечению, можно найти по формуле:

$$\xi_{n.p} = K_{n.p} \left(\omega_2 / \omega_1 - 1 \right)^2$$

где $K_{п.р}$ – коэффициент смягчения при постепенном расширении, зависящий от угла конусности α



Для длинных конусов нужно учитывать также потери по длине.

Постепенное сужение трубопровода



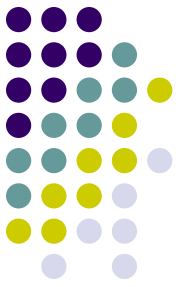
Коэффициент сопротивления для сходящихся переходных конусов (конфузоров) зависит от угла конусности и соотношения диаметров.

Для коротких конусов

$$\xi_{n.c} = K_{n.c} (1/\varepsilon - 1)^2$$

где $K_{пс}$ – коэффициент смягчения при постепенном сужении, зависящий от угла конусности α ;

Резкий поворот трубы круглого поперечного сечения на угол α .

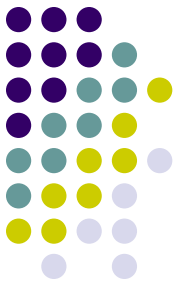


- Коэффициент сопротивления можно найти по формуле:

$$\xi_{\alpha} = \xi_{90^{\circ}} (1 - \cos \alpha)$$

- где $\xi_{90^{\circ}}$ – значение коэффициента сопротивления для угла 90°

Плавный поворот трубы круглого поперечного сечения (закругленное колено, отвод).



Коэффициент сопротивления $\xi_{\alpha} = \xi_{90} a$

- Коэффициент ξ_{90} определяется по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\xi_{90} = \left[0,2 + 0,001(100\lambda)^8 \right] \sqrt{d/R}$$

где d – диаметр трубопровода;
 R – радиус закругления.

Потери напора в запорных устройствах трубопроводов



- Теоретические значения коэффициента сопротивления для задвижки

$$\xi = \left(\frac{\omega}{\omega_0 \varepsilon} - 1 \right)^2$$

где ω_0 – площадь сечения, не стесненная запорным приспособлением;

ω – площадь сечения трубы.

- Значения коэффициентов местных сопротивлений для некоторых запорных устройств (задвижка, вентиль, дроссель, кран и др.) приведены в справочных данных.

Местные потери в трубах при малых числах Рейнольдса



Приведенные выше формулы относятся к турбулентному течению с большими числами Рейнольдса, когда влияние вязкости жидкости проявляет себя лишь в слабой степени.

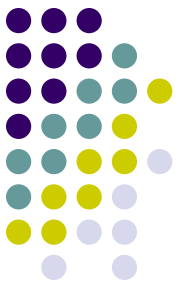
При движении жидкости с малыми числами Рейнольдса коэффициенты местных сопротивлений зависят не только от геометрических характеристик сопротивления, но и от числа Рейнольдса и могут быть при ориентировочных расчетах найдены по формуле А.Д. Альтшуля:

$$\xi = A / Re + \xi_{кв}$$

где $\xi_{кв}$ – значение коэффициента местного сопротивления в квадратичной области;

Re – число Рейнольдса, отнесенное к нестесненному сечению трубопровода.

- Значения параметров A и $\xi_{кв}$ для местных сопротивлений табличные значения.



Задачи

- 1. Горизонтальная труба диаметром $d_1 = 0,1$ м внезапно переходит в трубу диаметром $d_2 = 0,15$ м. Проходящий расход воды $Q = 0,03$ м³/с.

Требуется определить:

- а) потери напора при внезапном расширении трубы;
- б) разность давлений в обеих трубах;
- в) потери напора и разность давлений для случая, когда вода будет течь в противоположном направлении (т.е. из широкой трубы в узкую);
- г) разность давлений при постепенном расширении трубы (считая потери напора пренебрежимо малыми).

