

Лекция
Гидравлические сопротивления в трубопроводах

«Гидравлические сопротивления» - силы трения, возникающие в реальной жидкости при её движении.

На преодоление гидравлических сопротивлений поток жидкости **расходует часть удельной энергии, которую называют «гидравлическими потерями напора».**

Гидравлические потери зависят

- от режима движения жидкости,
- формы сечения русла и его изменения,
- характера поверхности стенок и
- вязкости жидкости.

Гидравлические потери напора делятся на **потери на трение по длине и местные потери.** Гидравлические потери **измеряются** либо в линейных единицах – **метрах (м)**, либо в единицах давления – **паскалях (Па)**.

Потери напора по длине обусловлены силами внутреннего трения и представляют собой потери энергии. Они **складываются из сопротивления трения о стенки и возрастают пропорционально длине трубы.**

Потерю напора на трение при установившемся равномерном прямолинейном движении потока по трубопроводу круглого сечения можно найти по формуле Вейсбаха-Дарси:

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

или в единицах давления

$$\Delta p_t = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2}$$

где λ – **коэффициент гидравлического трения** (коэффициент Дарси), зависящий от режима движения потока и шероховатости стенок трубопровода.

Для **ламинарного** режима λ зависит только от числа Рейнольдса и определяется по формуле

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Формула Вейсбаха-Дарси справедлива и для турбулентного режима. Но в этом случае коэффициент λ зависит не только от числа Рейнольдса, но и от шероховатости труб. Определение λ для турбулентного режима довольно сложная задача. В настоящее время его находят по эмпирическим формулам и графикам (например, график Никурадзе).

Экспериментально было установлено, что **при турбулентном режиме существует три области**, в которых коэффициент λ по-разному зависит от числа Рейнольдса:

- 1) **область гидравлически гладких труб (русел);**
- 2) **переходная область** (область доквадратического сопротивления);
- 3) **область гидравлически шероховатых труб** (квадратического сопротивления).

Физическая картина существования этих областей в одной и той же трубе объясняется следующим образом. У всякой трубы или русла на стенках имеются выступы и шероховатости. Их высота зависит от материала труб, технологии их изготовления, времени эксплуатации, качества воды

и т.д. Согласно исследованиям Прандтля, в турбулентном потоке скорости непосредственно у стенок равны нулю. Поэтому принято считать, что вблизи стенок русла имеется тонкий подслой жидкости толщиной δ , где скорости столь малы, что в его пределах движение жидкости близко к ламинарному. Этот слой, толщина которого измеряется долями миллиметра, называется вязким (ламинарным) подслоем.

Если через Δ обозначит среднюю высоту выступов шероховатости, то возможны следующие соотношения Δ и δ .

Если $\delta > \Delta$, то выступы шероховатости покрыты вязким подслоем. турбулентная часть потока не касается выступов и скользит по ламинарному слою как по гладкой трубе. В этом случае имеют место так называемые гидравлически гладкие трубы и потери напора не зависят от шероховатости трубы.

Если $\delta < \Delta$, то выступы шероховатости вклиниваются в турбулентную зону, и в них ударяются частицы турбулентного ядра потока. При этом потери напора и коэффициент λ зависят от шероховатости трубы.

Опыты показывают, что **толщина ламинарного подслоя зависит от числа Рейнольдса**. При увеличении числа Рейнольдса толщина ламинарного подслоя уменьшается:

$$\delta = 30 \frac{d}{Re\sqrt{\lambda}}$$

Поэтому понятия гидравлически гладкой и шероховатой стенки относительны. Одна и та же стенка в одних условиях (при малых Re) может быть «гладкой», а в других условиях (при больших Re) – шероховатой.

Поскольку выступы шероховатости неодинаковы, то пользуются понятием эквивалентной шероховатости $\Delta_{э\text{кв}}$, т.е. **такой равнозернистой шероховатости, при которой потери на трение равны потерям при действительной шероховатости**. Значения эквивалентной шероховатости приведены в справочниках.

Эквивалентная шероховатость в зависимости от диаметра трубы по-разному сказывается на величине гидравлических сопротивлений, поэтому в гидравлике используют понятие относительной шероховатости ($\Delta_{э\text{кв}}/d$) или относительной гладкости ($d/\Delta_{э\text{кв}}$).

Область сопротивления **гидравлически гладких труб возникает при**

$$\underline{Re < 10d/\Delta_{э\text{кв}} (\delta > \Delta_{э\text{кв}})}$$

Значение λ можно определить по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{R}$$

или по формуле Конакова:

$$\lambda = \frac{e}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}$$

Переходная область сопротивления возникает при

$$\underline{10d/\Delta_{э\text{кв}} < Re < 500d/\Delta_{э\text{кв}} (\delta = \Delta_{э\text{кв}})}$$

В этой области коэффициент λ рекомендуется вычислять по формуле Альтшуля:

$$\text{Область шероховатых труб возникает при } \frac{68}{Re}$$

$$\underline{Re > 500d / \Delta_{\text{экв.}}}$$

При этом λ можно вычислять по формуле Шифринсона: _

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

Существуют и другие формулы для определения коэффициента λ при движении в трубах, изготовленных из различных материалов (стекло, пластмасса, бетон и т.д.). Они приведены в

справочниках. Кроме того, λ можно определять по таблицам и справочникам, которые также приводятся в справочной литературе.

Местные сопротивления возникают при изменении направления и скорости потока.

Местные потери напора (энергии) обусловлены наличием местных гидравлических сопротивлений, к которым относятся

- вход и выход потока из трубы,
- внезапные сужения и расширения труб,
- колена,
- тройники,
- отводы,
- диафрагмы,
- краны,
- задвижки,
- дроссели и т.д.

Сопротивления называют местными, поскольку они располагаются на малом участке потока и в определенном месте. Местные потери напора, как и потери по длине, обусловлены работой сил трения.

Потери напора на преодоление местных сопротивлений определяют по формуле Вейсбаха:

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

или в единицах давления $\Delta p_m = \rho g h_m = \zeta_m \frac{\rho v^2}{2}$

ζ_m (дзета) – коэффициент местного гидравлического сопротивления.

Этот коэффициент зависит от формы местного сопротивления и иногда от числа Рейнольдса и определяется опытным путем. Его значения для различных видов местных сопротивлений приведены в справочниках по гидравлике.

Общие потери напора жидкости складываются из потерь напора на трение (по длине трубопровода) и суммы потерь на местные сопротивления.

Общие потери напора

$$\frac{v^2}{2g} + \sum \zeta_m \frac{v^2}{2g} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_m \right) \frac{v^2}{2g} = \zeta_c \frac{v^2}{2g}$$

где ζ_c – коэффициент сопротивления системы.

Потери давления, Па, определяются по следующей формуле

$$\Delta p = \rho g h_w = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_m \right) \frac{\rho v^2}{2} = \zeta_c \frac{\rho v^2}{2}$$

$$\frac{\rho v}{2}$$