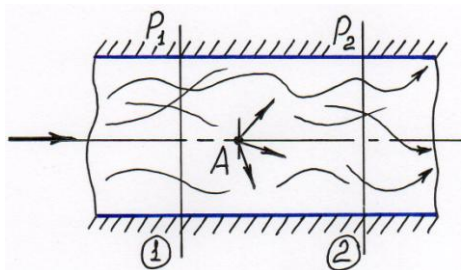


Турбулентный режим движения жидкости.Общие свойства турбулентного потока.

Для турбулентного потока характерно перемешивание жидкости, пульсации скоростей и давлений в процессе течения.

1) Пульсации скоростей.

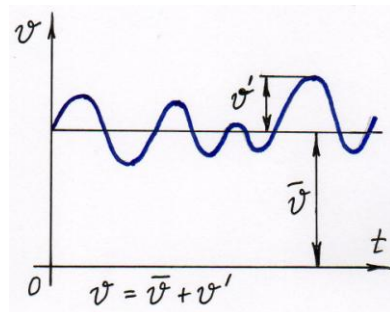
Рассмотрим напорное движение жидкости, т.е.: $\Delta p = p_1 - p_2 = const.$



Происходит движение частиц в продольном, вертикальном и поперёчном направлениях (точка А на схеме). Частицы жидкости описывают весьма сложные траектории движения.

Ввиду сложности турбулентного течения и трудностей его аналитического исследования не имеется достаточно точной и строгой теории этого течения (хотя есть много эмпирических и приближённых теорий, описывающих это течение; например, теория Прандтля и др.).

Для практических расчётов, связанных с турбулентным течением пользуются часто экспериментальными данными, систематизированными на основе теории гидродинамического подобия.



Пользуясь аппаратурой, включающей в себя датчик, вторичную аппаратуру и осциллограф, можно записать и измерить, например, пульсации скорости по времени в фиксированной точке потока (пульсировать – значит подвергаться знакопеременным изменениям относительно какой-то средней величины).

На графике показано:

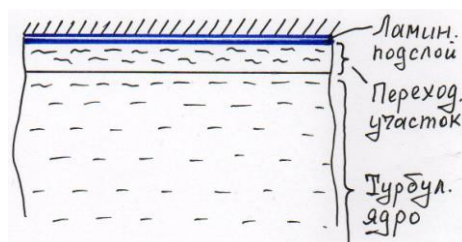
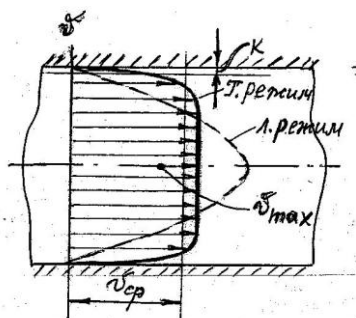
\bar{v} - средняя составляющая скорости;

v' - пульсационная составляющая скорости (относительно среднего значения).

Изменения скорости кажутся беспорядочными. Однако, осредненное за достаточно длинный промежуток времени T значение скорости сохраняется всё же постоянным, т.е. **скорость непрерывно пульсирует около некоторого среднего значения.**

Только имея в виду осреднённые скорости, можно говорить об установившемся турбулентном движении.

Обычно в задачах инженерной практики рассматривается не истинная, а только осреднённая скорость, а также поле осреднённых скоростей.

2) Распределение осреднённой скорости по нормальному сечению потока.

Вместо действительного турбулентного потока в гидравлике исследуется его упрощённая модель – **осреднённый турбулентный поток.**

где k – толщина ламинарного подслоя.

Если сравним кривые распределения скоростей в лам. и турб. потоках в одной и той же трубе и при одном и том же расходе (т.е. при одинаковой средней скорости), то обнаружим существенное различие.

Из рисунка видно, что распределение скоростей при турбулентном режиме в ядре потока более равномерное (выравниванию скоростей способствует интенсивное перемешивание жидкости) и с более крутым нарастанием скорости у стенки, чем при ламинарном режиме.

Опыты ряда исследователей (И.И.Никурадзе, Г.Г.Гуржиенко и др.) показали, что при турбулентном течении жидкости непосредственно на стенке трубы обычно имеется ламинарный подслой, толщина которого составляет:

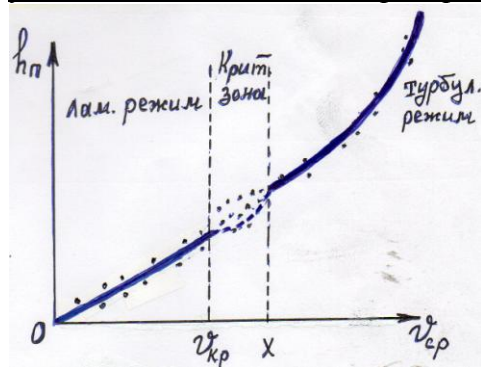
$$\kappa = 0,05 - 0,1 \text{ мм.}$$

Средняя скорость для т.р. - $v_{cp} = (0,85 - 0,95) v_{max}$. (Для л.р. - $v_{cp} = 0,5 v_{max}$).

Коэффициент кинетической энергии α , учитывающий неравномерность распределения скоростей в уравнении Бернулли: $\alpha = 1,025 - 1,13$. Однако, для практических расчётов для т.р. принимаем - $\alpha = 1$.

3) Гидравлические потери энергии (напора).

Потери напора в трубах при турбулентном течении значительно больше, чем при ламинарном. Это увеличение вызывается вихреобразованием, перемешиванием и искривлением траекторий.



Как видно из графика зависимости $h_n = f(v_{cp})$:

а) от малых значений скорости до v_{kp} имеет место ламинарный режим течения (при $Re \leq 2000$).

$h_n \sim v_{cp}$ (потери напора пропорциональны средней скорости);

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \text{ и потеря напора по ф-ле Пуазейля - } h_n = \frac{32lv_{cp}v}{gd^2}.$$

б) от v_{kp} до некоторого значения x - критическая зона (неустойчивое движение).

$Re \sim (2000 - 3000)$.

в) Участок от $x \rightarrow \infty$ - это турбулентный режим.

$h_n \sim v_{cp}^n$, где $n \approx 1,72 - 2$ (т.е. движение жидкости будет происходить в области доквадратичного сопротивления).

Гидравлические потери напора на трение определяются по формуле Вейсбаха-Дарси:

$$h_n = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \text{ где } \lambda - \text{безразмерный коэффициент потерь на трение по длине.}$$

Эта формула применима, как при турбулентном, так и при ламинарном течении (различие заключается лишь в значениях коэффициента λ).

Факторы (критерии) подобия.

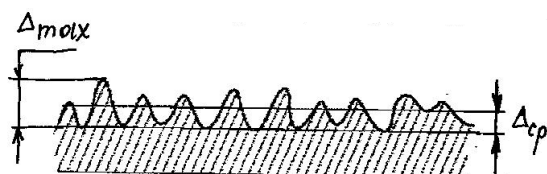
Из законов гидродинамического подобия следует, что коэффициент λ_t , так же как и λ_l , д.б. функцией основного критерия подобия напорных потоков - числа Рейнольдса Re , а также может зависеть от относительной шероховатости внутренней поверхности трубы $\frac{\Delta_s}{d}$.

а) геометрия сечения;

б) микрогеометрия внутренней поверхности стенок (материал и технология изготовления);

в) значения числа Re .

Рассмотрим срез трубопровода под микроскопом.



Δ (мм) - абсолютная шероховатость;

$\frac{\Delta_s}{d}$ - относительная шероховатость;

$\frac{d}{\Delta_s}$ - относительная гладкость,

где Δ_3 – абсолютная шероховатость, эквивалентная искусственной шероховатости в опытах И.И.Никурадзе.

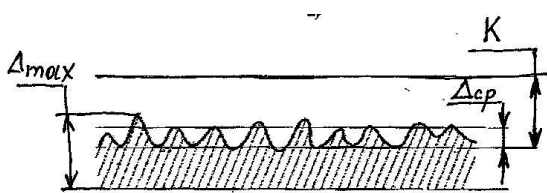
И.И.Никурадзе были проведены опыты по исследованию влияния шероховатости поверхности труб и числа Рейнольдса на потери напора по длине, и была построена зависимость: $\lambda = f(Re, \frac{\Delta_3}{d})$.

Три характерные зоны турбулентного потока.

- а) Зона гидравлически гладких труб;
- б) Переходная зона;
- в) Зона гидравлически шероховатых труб.

Гидравлически гладкие трубы

К этой области сопротивления относятся технически гладкие трубы (медные, латунные, стеклянные трубы, высококачественные бесшовные стальные трубы).



Характерным для данных труб является соотношение между величиной ламинарного подслоя κ и абсолютной шероховатостью (т.е. $\kappa \gg \Delta_{max}$), Тогда, $\lambda = f(Re)$, т.е. в данной зоне коэффициент λ зависит только от числа Re .

В этой зоне коэффициент λ может определяться по следующим формулам:

Формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}$$

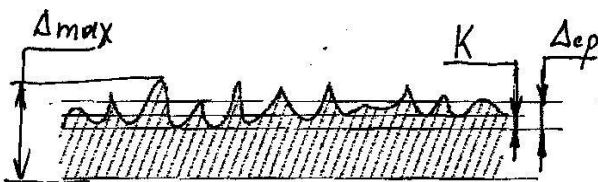
Формула П.Конакова:

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

Некоторые значения λ :

Re	4000	10^4	10^5	10^6
λ	0,04	0,0315	0,018	0,011

Гидравлически шероховатые трубы (квадратичная область).



В данной области коэффициент λ есть:

$$\lambda = f\left(\frac{d}{\Delta_3}\right); \quad \kappa \ll \Delta_{max}$$

С увеличением числа Re происходит уменьшение толщины κ . Идёт процесс размывания ламинарного подслоя.

В этой зоне коэффициент λ может определяться по следующим формулам:

Формула Никурадзе:

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{d}{\Delta_3} + 1,14\right)^2}$$

Формула Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d}\right)^{0,25}$$

Некоторые значения λ :

$\frac{d}{\Delta_3}$	100	10^3	$1,5 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
λ	0,038	0,019	0,018	0,016	0,014

Большой сложностью для построения графика зависимости коэффициента λ является шероховатость.

Следует отметить, что в результате эксплуатации шероховатость стенок труб увеличивается со временем.

Переходная зона.

В данной области коэффициент λ зависит от числа Re и от относительной гладкости: $\lambda = f(Re, \frac{d}{\Delta_s})$.

Для этой зоны предлагается использовать универсальную формулу А.Д.Альтшуля:

$$\lambda = 0,1 \left(\frac{1,46 \Delta_s}{d} + \frac{100}{Re} \right)^{0,25}$$

Как отмечалось выше, И.И.Никурадзе были проведены опыты по определению влияния шероховатости поверхности труб и числа Re на потери напора по длине.

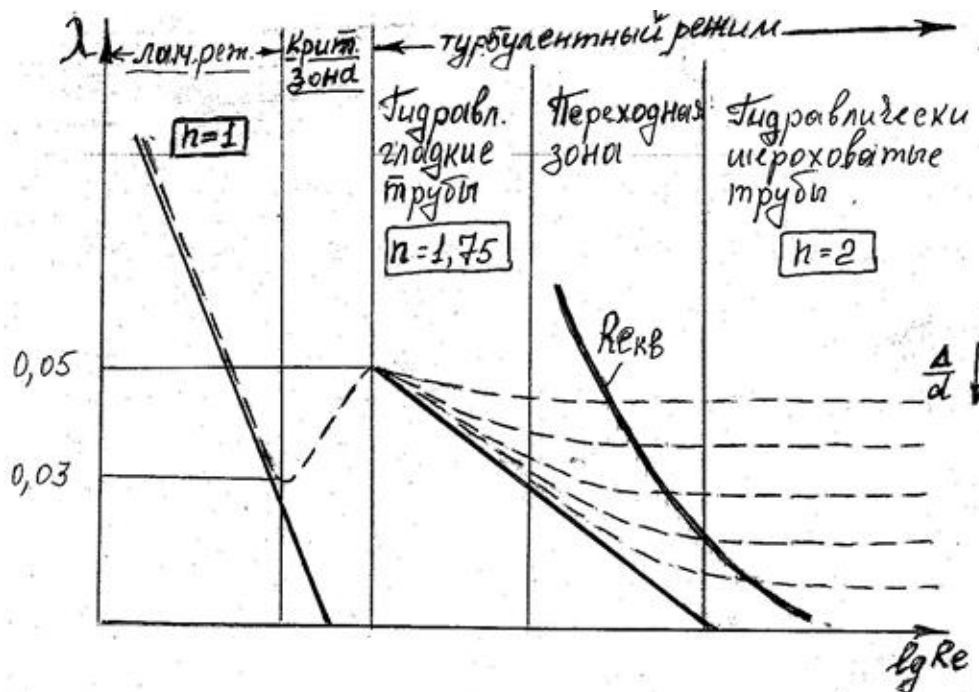
Опыты осуществлялись на гидравлическом стенде с круглыми трубами с искусственной однородной шероховатостью.

Она создавалась путём наклеивания на внутреннюю поверхность труб песчинок одинакового размера.

Эксперименты проводились как при ламинарном, так и при турбулентном режимах движения жидкости.

В трубах с разной относительной шероховатостью определялись потери напора по длине h_n при различных расходах.

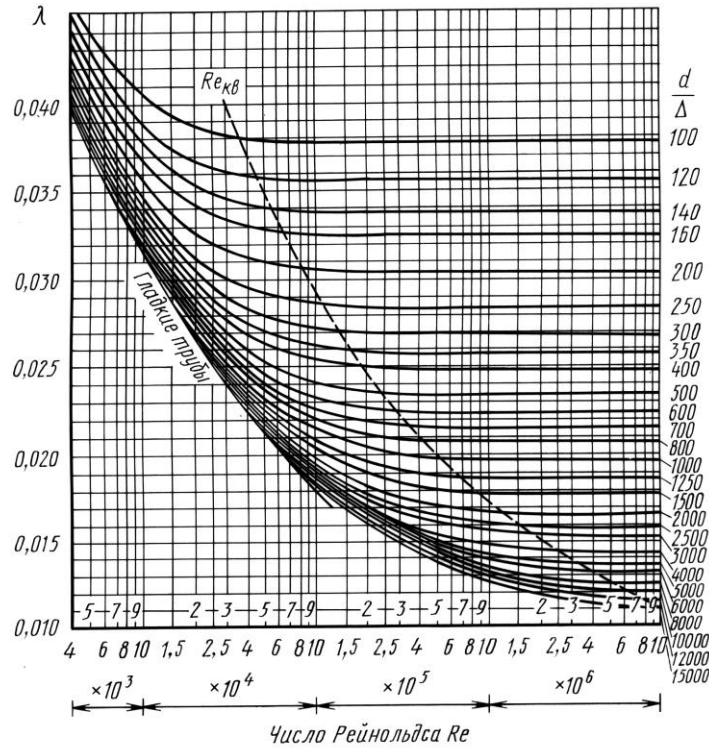
В результате этих опытов И.И.Никурадзе получил формулу для определения коэффициента λ и построил график зависимости λ от Re для труб с искусственной шероховатостью.



Для натуральных шероховатых труб закон изменения λ от Re получается несколько иным, а именно, без провала кривых, характерного для графика И.И.Никурадзе.

Зависимость для таких труб по результатам опытов была получена Г.А.Муриным (ВТИ):

Различие в характере кривых объясняется тем, что в натуральной трубе бугорки шероховатости имеют различную высоту (в пределах размерного диапазона) и при увеличении числа Re начинают выступать за пределы ламинарного слоя не одновременно, т.е. переход от одного закона течения к другому происходит более плавно.



Местные гидравлические сопротивления.

Местными гидравлическими сопротивлениями принято называть относительно короткие участки трубопроводов, где ввиду изменения профиля сечения происходит нарушение равномерности движения и скорость меняется от сечения к сечению по направлению и по величине.

Общие признаки, характеризующие любые местные сопротивления:

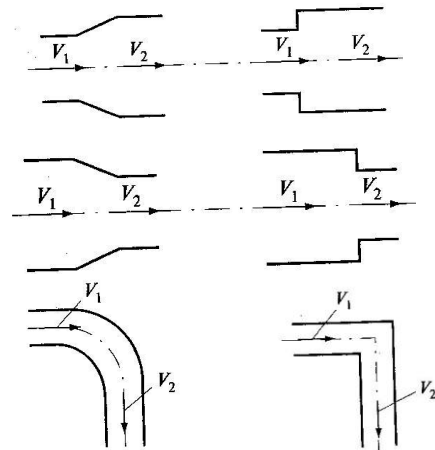
- 1) Концентрация потери энергии напора;
- 2) Гидродинамическая неустойчивость потока;
- 3) Возможность появления кавитации (происходит разрыв сплошности потока и давление может стать = $p_{н.п.}$).

Простейшие МГС можно разделить на:

- расширение трубы
(плавное или внезапное):

- сужение трубы
(плавное или внезапное):

- повороты трубы (плавные или резкие):



Более сложные случаи МГС, представляют собой соединения или комбинации перечисленных простейших сопротивлений (задвижки, клапаны, вентили, тройники, крестовины).

В таких сопротивлениях происходит весьма значительная деформация потока с возникновением интенсивного вихреобразования.

Эмпирической общей формулой связи местной потери напора и скорости потока является формула Вейсбаха:

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g} = \zeta \frac{Q^2}{2gF^2}.$$