

случае, скорость, удовлетворяющую условию (14) называют средней (V_{cp}). Очевидно, что она лежит в пределах от $V = 0$ до $V = V_{max}$.

Уравнение расходов представляет собой равенство расходов в двух сечениях потока (рис.9), т.е.

$$Q_1 = Q_2$$

или, с учетом (14),

$$V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2, \quad (15)$$

где V и S - средняя скорость и площадь соответствующего сечения.

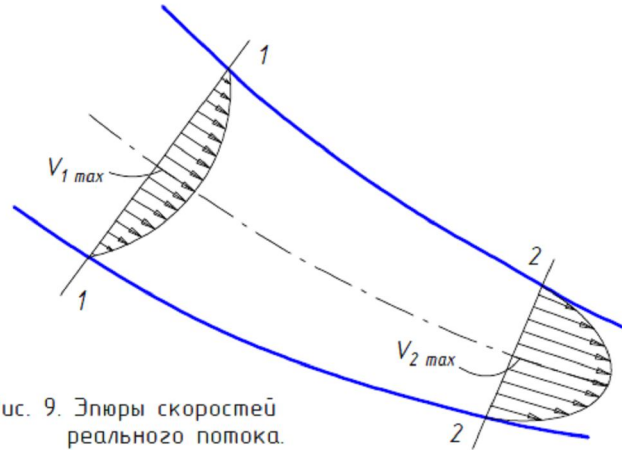


Рис. 9. Эпюры скоростей реального потока.

Используя зависимость (15) можно найти среднюю скорость в любом сечении потока жидкости, если в каком-то сечении этого потока скорость уже известна и известны его геометрические размеры.

Уравнение расхода является законом сохранения массы для движущейся жидкости.

3.3. Уравнение Бернулли для струйки идеальной жидкости.

Рассмотрим установившееся течение идеальной жидкости, находящейся под действием лишь одной массовой силы - силы тяжести (рис.10).

Для записи уравнения Бернулли выберем два сечения 1-1 и 2-2, а также произвольную горизонтальную поверхность 0-0, от которой будем

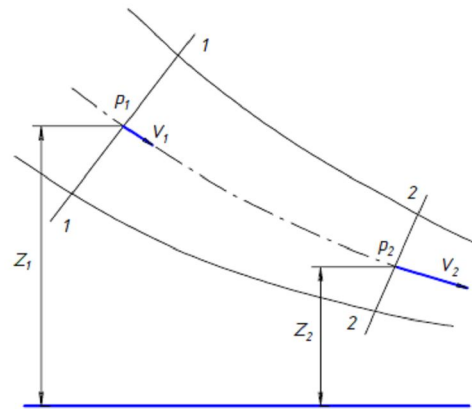


Рис. 10. Струйка идеальной жидкости.

торой будем отсчитывать координаты положения центров тяжести выбранных сечений.

Тогда уравнение Бернулли, записанное для этих двух сечений струйки идеальной жидкости, будет имеет следующий вид:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \quad .$$

Каждый из членов уравнения Бернулли с одной стороны представляет собой некоторую высоту (напор), а с другой стороны является тем или иным видом удельной энергии, т. е. Энергии отнесенной к единице веса жидкости. Поэтому каждый член уравнения (16) имеет размерность единицы длины (м).

Рассмотрим их физический смысл:

Z - нивелирная высота или удельная потенциальная энергия положения жидкости;

$p / \rho \cdot g$ - пьезометрическая высота или удельная потенциальная энергия давления;

$Z + p / \rho \cdot g$ - гидростатический напор или удельная потенциальная энергия

(включает два вида потенциальной энергии);

$V^2 / 2g$ - скоростной напор или удельная кинетическая энергия жидкости;

$Z + p / \rho \cdot g + V^2 / 2g$ - полный напор или полная удельная энергия жидкости в данном сечении.

Таким образом, в уравнении (16) полная удельная энергия в сечении 1-1 приравнивается полной удельной энергии в сечении 2-2. А из этого следует вывод: **УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ** - это закон сохранения энергии для движущейся жидкости.

3.4. Уравнение Бернулли для реальной (вязкой) жидкости.

В отличие от идеальной жидкости в потоке реальной жидкости возникают напряжения трения. Это вызывает:

- неравномерность распределения скоростей по сечениям (см. рис.9);
- потери энергии при движении жидкости.

С учетом отмеченного, уравнение Бернулли принимает следующий вид:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \Sigma h_{\text{пот}}, \quad (17)$$

где α - безразмерный коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению (коэффициент Карнолиса);

$\Sigma h_{\text{пот}}$ - суммарная потеря напора (удельной энергии) при движении жидкости от сечения 1-1 до сечения 2-2.

В практических расчетах коэффициент Карнолиса принимают $\alpha_d = 2$ для ламинарного режима течения и $\alpha_t = 1$ для турбулентного.

Гидравлические потери условно делят на местные потери и потери на трение по длине. Местные потери обусловлены так называемыми местными гидравлическими сопротивлениями (поворот потока, сужение, расширение, кран и т.д.). Местные потери оцениваются по формуле Вейсбаха:

$$h = \zeta \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (18)$$

где ζ - безразмерный коэффициент, характеризующий местное сопротивление;

V - средняя скорость в трубе, в которой установлено сопротивление.

Потери на трение по длине - это потери, которые возникают в прямых трубах постоянного сечения. Они оцениваются по формуле Дарси:

$$h = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (19)$$

где λ - безразмерный коэффициент потерь на трение (коэффициент Дарси);

V - средняя по сечению скорость в трубе;

l и d - длина и диаметр трубы.

Определение коэффициентов ζ и λ для различных случаев, имеющих практическое значение при расчетах машиностроительных гидросистем, рассмотрено в разделе 5.

4. ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПОДОБИЕ И РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ.

4.1. Основы гидродинамического подобия.

В гидравлике широко используются методы подобия, которые позволяют существенно упростить решения практических задач за счет использования уже известных (подобных) решений. При этом, наиболее сложным вопросом является выбор критерия подобия, т.е. параметра оценивающего степень "подобности" двух потоков. В качестве такого критерия наиболее целесообразно использовать так называемое число Рейнольдса Re . Эта величина пропорциональна отношению сил инерции к силам трения и для круглых труб определяется по

$$Re = V \cdot d / \nu, \quad (20)$$

где V - средняя по сечению скорость в трубе;

d - диаметр трубы;

ν - кинематическая вязкость жидкости.

От числа Рейнольдса зависят многие параметры потоков реальной жидкости. Например, Re однозначно определяет величину коэффициента Карриолиса, оказывают существенное влияние на коэффициент Дарси и т.д.

4.2. Режимы течения жидкости.

Практика показывает, что возможны два режима течения жидкости: ламинарный и турбулентный.

Ламинарный режим (ламинарное течение) - это слоистое течение без перемешивания жидкости и без пульсации скоростей и давлений.

Турбулентный режим (турбулентное течение) - это течение с перемешиванием слоев жидкости, интенсивным вихреобразованием и пульсациями скоростей и давлений.

Для каждого из отмеченных режимов течения характерны свои особенности и законы (зачастую весьма отличные). Поэтому важно определить какое течение имеет место в каждом конкретном случае.

В качестве критерия режима течения используется число Рейнольдса. Если его величина не превышает 2300, то режим считают ламинарным. При Re больше 4000 начинается турбулентное течение.

В диапазоне чисел Рейнольдса от 2300 до 4000 существует переходная область, когда слоистое течение уже разрушилось, а интенсивного вихреобразования еще нет.

4.3. Кавитационное течение.

Рассмотрим течение жидкости через трубку изображенную на рис.11. В месте сужения потока (сечение 2-2) скорость жидкости увеличивается, а давление уменьшается и, если его величина станет равным давлению насыщенных паров, то начинается интенсивное парообразование (кипение). Двигаясь вместе с жидкостью пузырьки газов, попадают в расширяющуюся часть трубки, где скорость уменьшается, а давление возрастает.

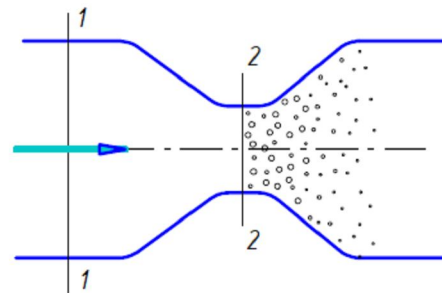


Рис. 11. Кавитация.

Выделившиеся газы и пары конденсируются и пузырьки "схлопываются".

Такое явление получило название кавитации, а течение - кавитационное. Кавитация сопровождается характерным шумом и вибрацией, а при длительном воздействии - постепенным разрушением (эрозией) металлических стенок. Кавитация может иметь место в гидромашинах, а также на лопастях гребных винтов.