

Гидравлика и ГП

Роман Владимирович Чернухин

Кафедра проектирования технологических
машин

Chernuxin@corp.nstu.ru

Тематика лекционных занятий:

- Основы гидравлики
- Общие сведения об объемных гидроприводах
- Объемные гидромашины
- Гидроаппараты
- Кондиционеры рабочей жидкости, гидроемкости, гидролинии и уплотнительные устройства
- Схемы объемных гидроприводов и гидропередат
- Расчет гидропривода

1.6 Уравнение Бернулли

Основным уравнением гидродинамики является уравнение Бернулли, которое устанавливает связь между скоростью движения и давлением жидкости при установившемся движении.

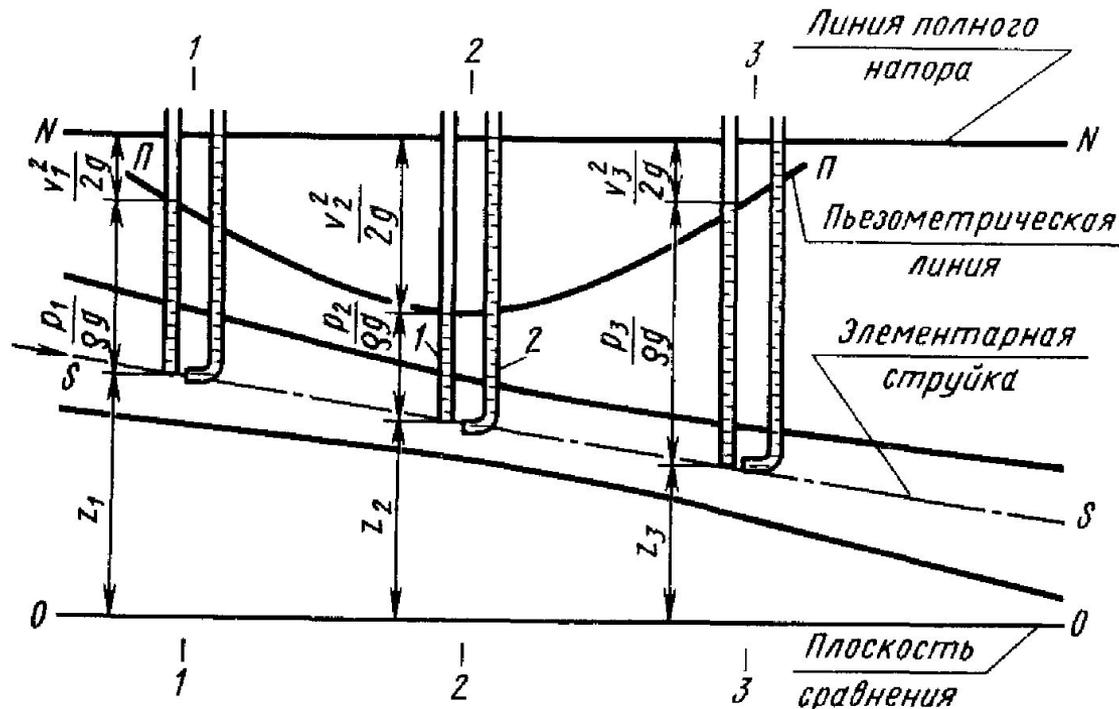
Уравнение Бернулли для **элементарной струйки**:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = H = \text{const.}$$

где H – *напор* – уд.энергия или энергия, отнесенная к единице веса

z_1, z_2 – расстояние от рассматриваемого сечения до некоторой плоскости сравнения (геометрический напор)

Уравнение Бернулли



Итак, с геометрической точки зрения членами уравнения Бернулли для каждого сечения являются: z_1, z_2 — геометрические высоты (высоты положения) сечений 1 и 2, м; $p_1/(\rho g), p_2/(\rho g)$ — пьезометрические высоты (напоры), м; $v_1^2/(2g), v_2^2/(2g)$ — скоростные напоры.

С энергетической (физической) точки зрения членами уравнения Бернулли для каждого сечения являются: z_1, z_2 — удельная потенциальная энергия положения; $p_1/(\rho g), p_2/(\rho g)$ — удельная потенциальная энергия давления; $v_1^2/(2g), v_2^2/(2g)$ — удельная кинетическая энергия, м.

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости

Поправки:

1. Средняя скорость потока, а не постоянная скорость струйки. Уравнение дополняется коэффициентами Кориолиса α (зависят от режима движения жидкости, $\alpha=1$ при ламинарном режиме и $\alpha = 2$ при турбулентном режиме)

2. Уравне

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\Pi}$$

пора h_{Π}

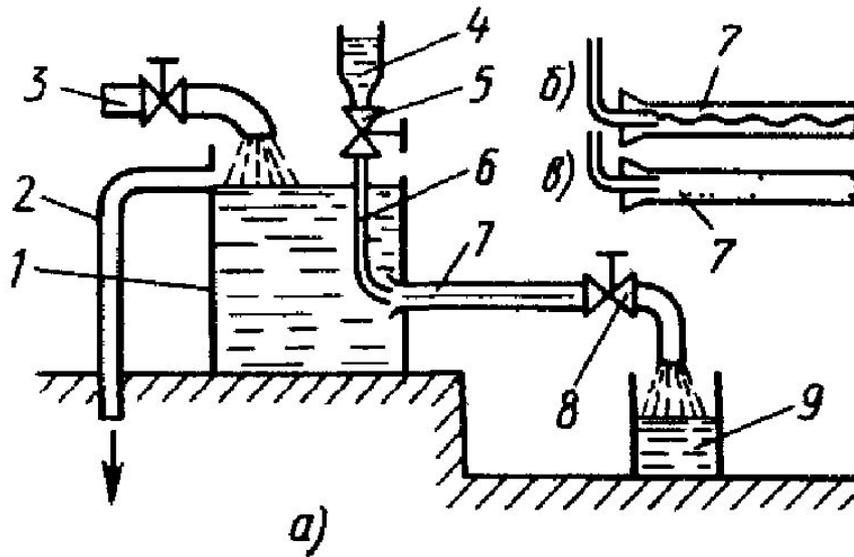
Полные потери выражаются суммой потерь напора по длине и местн $h_{\Pi} = \sum h_l + \sum h_m$.

1.7 Режимы течения жидкости

При **ламинарном режиме** течения частицы жидкости перемещаются по траекториям, направленным вдоль потока без поперечного перемешивания. Поток жидкости образуется как бы отдельными параллельными слоями; пульсации скорости потока и давления жидкости отсутствуют.

При **турбулентном режиме** течения частицы жидкости перемещаются по случайным хаотическим траекториям. Турбулентное течение сопровождается постоянным перемешиванием жидкости, характеризуется наличием пульсации скорости потока и давления жидкости.

Опыт Рейнольдса



1. Бак
2. Сливная труба
3. Питающая труба
4. Бачок
5. Вентиль
6. Тонкая трубка
7. Стекло́нная труба
8. Вентиль
9. Сливной бачок

Число Рейнольдса – безразмерное выражение, определяющее режим течения жидкости

$$Re = vd/\nu,$$

где v — средняя скорость потока жидкости, м/с; d — внутренний диаметр трубы, м; ν — кинематическая вязкость, м²/с.

$$Re = \frac{4Qd}{\pi d^2 \nu} = 1,27 \frac{Q}{d\nu},$$

Правило. Режим течения жидкости считают ламинарным при $Re < Re_{кр}$ и турбулентным при $Re > Re_{кр}$.

Практическое определение числа Рейнольдса

Если расход Q задан в л/мин, d – в мм, ν – мм²/с

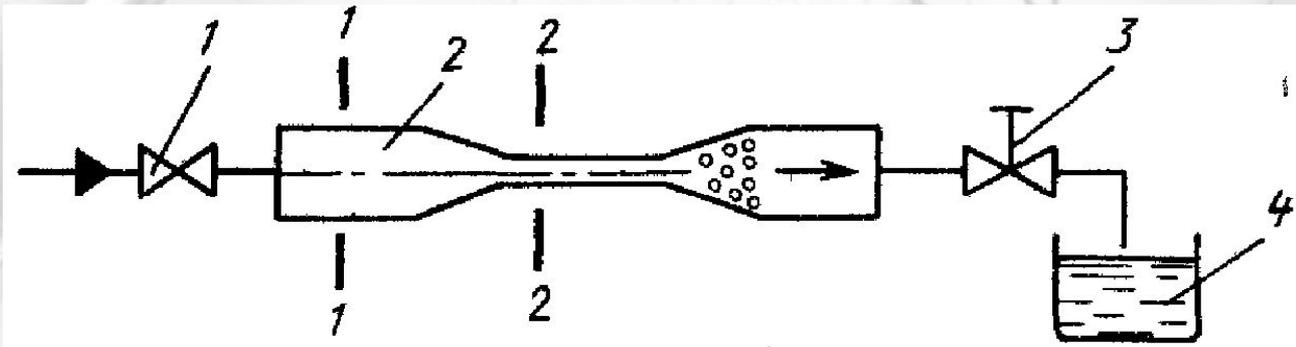
$$Re = 21\,200 \frac{Q}{d\nu}.$$

Пример:

Определить режим течения жидкости вязкостью $\nu = 20$ мм²/с в круглой трубе с внутренним диаметром $d = 10$ мм при расходе жидкости $Q_1 = 12.5$ л/мин и $Q_2 = 40$ л/мин

Понятие о кавитации

Кавитацией называется процесс возникновения пузырьков пара в потоке жидкости при снижении рабочего давления до давления парообразования с последующей конденсацией паров жидкости в зоне повышенного давления.



1 и 3 – вентили; 2 – трубка; 4 –

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}.$$

1.8 Расчет простых трубопроводов. Потери давления в трубопроводах

Простым называют трубопровод, не имеющий боковых ответвлений.

Цель расчета: выбор условного прохода, определение потерь давления и толщины стенок.

Под условным проходом понимают внутренний диаметр трубопровода, округленный до ближайшего значения из установленного $D_y = \sqrt{4Q/(\pi v)} = 1,13 \sqrt{Q/v}$, проходов D_y (мм)
где Q — расход жидкости, м³/с; v — средняя скорость потока жидкости, м/с.

Если расход задан в л/мин, а скорость в м/с, то

$$D_y = 4,6 \sqrt{Q/v}.$$

Пример

Определить условный проход напорного трубопровода, если расход $Q = 45$ л/мин и номинальное давление $p_{\text{НОМ}} = 32$ МПа. Скорость потока жидкости $v = 5$ м/с.

ГОСТ 16516-80 Условные проходы

$$D_y = 4,6 \sqrt{Q/v}$$

$D_y = ?$

1,0	10	100
1,2	12	125
1,6	16	160
2,0	20	200
2,5	25	250
3,0	32	
4,0	40	
5,0	50	
6,0	63	
8,0	80	

Потери давления в трубопроводах по длине

Различают два вида потерь: потери по длине h_l и местные потери напора h_M .

Потери напора по длине при равномерном движении жидкости в трубопроводе круглого сечения:

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

где λ — безразмерный коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси); l и d — длина и диаметр трубопровода, м; $v^2/(2g)$ — скоростной напор, м.

Потери давления по длине трубопровода:

$$\Delta p_l = \lambda \gamma \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

где γ — удельный вес жидкости, Н/м³.

Коэффициент Дарси для ламинарного и турбулентного потока

При ламинарном режиме коэффициент Дарси зависит от числа Рейнольдса и для гладких круглых трубопроводов рассчитывается по формуле Пуазейля:

$$\lambda = 64/Re = 64\nu/(vd) = \frac{64\nu d^3}{1,27dQ} = \frac{64\nu d}{1,27Q}.$$

На практике применяют выражение: $\lambda = (75 \dots 150)/Re$,

где коэффициент 75 принимают для стальных труб, а 150 — для гибких рукавов.

При турбулентном режиме течения жидкости коэффициент λ зависит в основном от материала трубопроводов и значений параметров их внутренних поверхностей. Для гладких стальных трубопроводов коэффициент λ определяют по формуле Блазиуса:

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

Пример

Гладкий круглый трубопровод с внутренним диаметром $d = 10$ мм имеет длину $l = 2$ м. По трубопроводу перемещается рабочая жидкости – минеральное масло с кинематической вязкостью $\nu = 20$ мм²/с. Определить во сколько раз увеличатся потери по длине, если первоначальный расход жидкости $Q_1 = 12,5$ л/мин увеличится в 3,2 раза.

1. Вычисляем увеличенный расход жидкости

$$Q_2 = Q_1 \cdot 3,2 = 12,5 \cdot 3,2 = 40$$

2. Определяем режим движения жидкости при Q_1 и Q_2
3. Находим перепад давлений Δp для Q_1 и Q_2
4. Определяем отношение $\Delta p_2 / \Delta p_1$

Эмпирические формулы потерь давления по длине

- ламинарный режим:

$$\Delta p_l = 0,62\nu l Q / d^4,$$

где ν — кинематическая вязкость, мм²/с; l — длина трубопровода, м; Q — расход жидкости, л/мин; d — внутренний диаметр трубопровода, мм.

- турбулентный режим:

$$\Delta p_l = 7,85 l Q^2 / d^5,$$

где l — в м; Q — в л/мин; d — в мм.

Местные потери давления в трубопроводах

Местные потери напора:

$$h_m = \zeta v^2 / (2g),$$

где ζ — безразмерный коэффициент местного сопротивления; $v^2 / (2g)$ — скоростной напор, м.

ζ (дзета) — как правило определяют экспериментальным путём и выражают в виде эмпирических формул, графиков, таблиц.

Местные потери давления:

$$\Delta p_m = h_m \rho g = \zeta v^2 \rho / 2.$$

Если в формулу поставить выражение $v^2 = (1,27Q/d^2)^2 = 1,6Q^2/d^4$

$$\Delta p_m = \zeta \rho \frac{1,6Q^2}{2d^4} = 0,8\zeta \rho \frac{Q^2}{d^4}$$

Эмпирическая формула

$$\Delta p_m = 0,21\zeta Q^2 / d^4,$$

где Q — в л/мин; d — в мм.

Пример

Рабочая жидкость - минеральное масло перемещается по трубопроводу диаметром 10 мм через местное сопротивление, коэффициент $\zeta = 1,5$, расход жидкости $Q = 40$ л/мин. Определить местные потери давления.

$$\Delta p_m = 0,21\zeta Q^2/d^4,$$

где Q — в л/мин; d — в мм.

Понятие об эквивалентной длине

Длиной, эквивалентной длине данного местного сопротивления, считается такая длина прямой трубы, на протяжении которой гидравлические потери равны потерям в данном сопротивлении

Пример: заменить местное сопротивление трубой эквивалентной длины

$$\Delta p_l = \lambda \gamma \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g},$$

$$\gamma = mg/V = \rho g$$

$$\Delta p_m = h_m \rho g = \zeta v^2 \rho / 2.$$

$$\lambda \rho \frac{l_{\text{ЭКВ}}}{d} \frac{v^2}{2} = \zeta \rho \frac{v^2}{2},$$

$$l_{\text{ЭКВ}} = (\zeta/\lambda) d.$$

Расчет труб на прочность

Тонкостенные трубы $D/s \geq 16$

$$D/d_B < 1,7$$

Толщина стенки трубы: $s = \frac{p_{\max} (D + m)}{2 [\sigma]}$,

где p_{\max} — максимальное давление жидкости, Па, D — наружный диаметр трубы, м, m — предельное отклонение наружного диаметра, м, $[\sigma]$ — допустимое напряжение материала трубы, Па

Допускаемое напряжение $[\sigma] = \sigma_B / n_B$,

где σ_B — предел прочности материала трубы, Па, n_B — коэффициент запаса прочности ($n_B = 3 \text{ } 6$)

Пример

Определить толщину стенки трубы диаметром $D = 25$ мм, из коррозионно стойкой стали 12Х18Н10Т. Максимальное давление рабочей жидкости 32 Мпа.

Решение:

Для данной стали временное сопротивление $\sigma_B = 549$ Мпа.

Коэффициент запаса прочности выбираем...

Отклонение по диаметру $m = 0.45$ мм (ГОСТ 9941-72)

Определяем толщину

Далее толщина стенки выбирается из стандартного ряда.