

**ДЕПАРТАМЕНТ ОБРАЗОВАНИЯ АДМИНИСТРАЦИИ
ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ
ГБПОУ ВО
«Владимирский химико-механический колледж»**

**Методическое пособие
по гидравлике**

2017

Рассмотрено на заседании цикловой
комиссии естественнонаучных и
общепрофессиональных дисциплин

УТВЕРЖДАЮ

Протокол № _____ от _____

Председатель ЦК _____

Зам. директора по УР _____

М.Н.Чекалова

С.В.Макарова

Составитель:

Зубарев В.С.

преподаватель ГБПОУ ВО «ВХМК»

Рецензент:

Николаева О.С.

методист ГБПОУ ВО «ВХМК»

Содержание

Разделы пособия	Стр.
Пояснительная записка	4
1. Физические свойства жидкостей	5
2. Гидростатическое давление	8
3. Режимы движение жидкостей	12
4. Уравнение Бернулли	17
5. Гидравлические сопротивления	22
6. Расчет трубопроводов	28
7. Гидравлический удар	32
8. Истечение из отверстий и насадок	34
9. Динамические насосы	38
10.Объемные насосы	43
Литература	47

Пояснительная записка

Данные методические пособие предназначено для помощи студентам и преподавателям специальностей 13.02.02 «Теплоснабжение и теплотехническое оборудование» в изучении дисциплины «Теоретические основы гидравлики и теплотехники» и 15.02.01 «Монтаж и техническая эксплуатация промышленного оборудования» в изучении ПМ 02 т. 1 «Гидравлические и пневматические системы».

Пособие содержит основные теоретические сведения и примеры решения по гидростатике, гидродинамике и теории насосов, а также задачи по указанным выше разделам.

Пособие может быть применено при проведении уроков, практических занятий и самостоятельной работе студентов, в том числе и для задания на дом.

1 Физические свойства жидкости

Жидкости характеризуются основными физическими свойствами: плотностью, удельным весом, удельным объемом, температурным расширением, сжимаемостью и т.д.

Плотностью (или удельной массой) ρ (кг/м³) любого вещества называют массу этого вещества, заключенную в единице объема. Это определение относится и к жидкостям:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Так, например, для воды при температуре 4°C плотность ρ равна 1000 кг/м³, т.е. в каждом кубометре объема вмещается 1000 кг воды.

Удельным весом γ (Н/м³) называют вес единицы объема жидкости:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \rho g.$$

Для воды удельный вес $\gamma \approx 9810$ Н/м³ т.е. каждый кубометр воды притягивается к Земле силой тяжести равной 9810 Н.

Удельным объемом v (м³/кг) жидкости называют объем, занимаемый единицей массы жидкости:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}.$$

Объем жидкости существенно зависит от температуры: при ее повышении он увеличивается и наоборот - при охлаждении уменьшается. Температурное изменение объема жидкости определяется температурным коэффициентом объемного расширения β_t :

$$\beta_t = \frac{\Delta V}{\Delta T} \cdot \frac{1}{V_0}$$

Где:

V_0 - объем жидкости до расширения,

ΔV - изменение объема жидкости после расширения,

ΔT - изменение температуры.

Тогда объем жидкости после температурного расширения будет равен:

$$V_1 = V_0(1 + \beta_t \cdot \Delta T),$$

а плотность:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta_t \cdot \Delta T}.$$

Сжимаемость – это способность жидкости изменять объем при сжатии, т. е. действием на нее давления. Объемная сжимаемость показывает, насколько изменится первоначальный объем жидкости при изменении оказываемого на нее давления на 1 Па. Сжимаемость характеризуется коэффициентом сжимаемости β_v .

Коэффициентом сжимаемости (объемного сжатия) называется отношение относительного изменения объема жидкости $\Delta V/V_0$ к изменению давления Δp :

$$\beta_v = -\frac{\Delta V}{V_0} \cdot \frac{1}{\Delta p}.$$

Тогда объем жидкости после сжатия будет равен:

$$V_1 = V_0(1 - \beta_v \cdot \Delta p).$$

При давлениях до 50 МПа коэффициент β_v для воды равен $4,75 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Н (Па}^{-1}\text{)}$.

При давлениях, наиболее часто применяемых на практике в механизмах и устройствах, объемная сжимаемость жидкостей очень мала, и в обычных гидравлических расчетах ей пренебрегают, учитывая лишь в особых случаях, например, при расчетах некоторых гидроприводов, и явлениях гидроудара.

Пример 1.1

В отопительной системе жилого дома (котел, нагреватели и трубопроводы) вмещается $V_0 = 0,4 \text{ м}^3$ воды. Сколько воды войдет в расширительный бак при нагревании системы от 20°C до 90°C ? Температурный коэффициент объемного расширения воды $\beta_t = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

Решение:

1. Объем воды после расширения:

$$V_1 = V_0(1 + \beta_t \cdot \Delta T) = 0,4[1 + 0,0017(90 - 20)] = 0,4476 \text{ м}^3;$$

2. Изменение объема при расширении:

$$\Delta V = V_1 - V_0 = 0,4476 - 0,4 = 0,0076 \text{ м}^3 = 7,6 \text{ л}.$$

Ответ: В расширительный бак войдет 12,88 литров воды.

Пример 1.2

После сжатия воды в цилиндре давление в ней увеличилось на 0,3 МПа. Необходимо определить конечный объем V_1 воды в цилиндре и разность объемов ΔV , если ее первоначальный объем составлял $V_0 = 2$ л. Коэффициент объемного сжатия воды $\beta_v = 4,75 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Решение:

1. Объем воды после сжатия:

$$V_1 = V_0(1 - \beta_v \cdot \Delta p) = 2,0(1 - 4,75 \cdot 10^{-10} \cdot 0,3 \cdot 10^6) = 1,999715 \text{ л.}$$

2. Изменение объема при сжатии:

$$\Delta V = V_0 - V_1 = 2 - 1,999715 = 0,000285 \text{ л.}$$

Ответ: Конечный объем после сжатия составил 1,999715 л., изменение объема при сжатии составило 0,000285 л.

Задача 1.1

Рассчитать объем расширительного бачка системы охлаждения автомобильного двигателя, если объем системы охлаждения равен 20 л, пределы изменения температуры от -40°C до 100°C , а температурный коэффициент объемного расширения охлаждающей жидкости $\beta_t = 0,0032 \text{ град}^{-1}$.

Варианты заданий:

Номер варианта	Объем системы, л	Коэффициент β_t
2	10	0,0032
3	11	0,0033
4	12	0,0034
5	13	0,0035
6	14	0,0036
7	15	0,0037
8	16	0,0036
9	17	0,0035
10	18	0,0034
11	19	0,0033
12	21	0,0032
13	22	0,0031
14	23	0,0030
15	24	0,0031
16	25	0,0033
17	26	0,0054
18	27	0,0055
19	28	0,0056
20	29	0,0057

Задача 1.2

Рассчитать конечный объем минерального масла после сжатия его в гидроцилиндре до давления 3,5 МПа. Начальный объем масла 10 л. Коэффициент объемного сжатия масла $\beta_v = 7 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Варианты заданий:

Номер варианта	Объем системы, л	Коэффициент β_v
2	10	$7,0 \cdot 10^{-10}$
3	11	$7,2 \cdot 10^{-10}$
4	12	$7,4 \cdot 10^{-10}$
5	13	$7,6 \cdot 10^{-10}$
6	14	$7,8 \cdot 10^{-10}$
7	15	$8,0 \cdot 10^{-10}$
8	16	$8,2 \cdot 10^{-10}$
9	17	$8,4 \cdot 10^{-10}$
10	18	$8,6 \cdot 10^{-10}$
11	19	$8,8 \cdot 10^{-10}$
12	20	$9,0 \cdot 10^{-10}$
13	21	$9,2 \cdot 10^{-10}$
14	22	$9,4 \cdot 10^{-10}$
15	23	$9,6 \cdot 10^{-10}$
16	24	$9,8 \cdot 10^{-10}$
17	25	$7,0 \cdot 10^{-10}$
18	26	$7,2 \cdot 10^{-10}$
19	27	$7,4 \cdot 10^{-10}$
20	28	$7,6 \cdot 10^{-10}$

2 Гидростатическое давление

На каждую частицу жидкости, находящуюся в сосуде, действует сила земного тяготения $P = m \cdot g$. Под её действием каждый слой жидкости давит на слой, находящийся под ним. В результате давление жидкости в разных слоях будет неодинаковым, и давление будет увеличиваться с глубиной погружения. Давлением называется отношение силы к площади поверхности, на которую она действует.

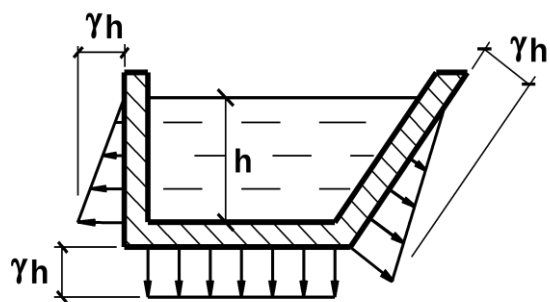


Рис. 3. Эпюры давления жидкости на плоские поверхности

Тогда давление, оказываемое весом столба жидкости на дно сосуда будет равно:

$$p = \frac{\rho g}{\omega} = \frac{\rho \omega h g}{\omega} = \gamma h = \rho g h,$$

а величина силы давления жидкости на дно:

$$P = p \omega = \rho g h \omega.$$

Если на поверхность жидкости воздействует внешнее давление p_0 , то на дно сосуда будет действовать давление:

$$p = p_0 + \rho gh ,$$

а сила давления на дно:

$$P = (p_0 + \rho gh)\omega .$$

Здесь:

ρ - плотность жидкости;

γ – удельный вес жидкости;

ω – площадь дна (площадь, на которую жидкость оказывает давление);

h – высота столба жидкости (глубина сосуда);

$g=9,81 \text{ м/сек}^2$ – ускорение свободного падения.

Из основного уравнения гидростатики, $p = \rho \cdot g \cdot h$ следует, что эпюра давления p представляет собой прямоугольный треугольник. Причем максимальное избыточное давление на стенку равно давлению на дно сосуда:

$$p_{\max} = \rho gh,$$

а давление на уровне центра тяжести стенки (неважно, вертикальной или наклонной) равно:

$$p_c = \rho gh_c ,$$

Сила давления жидкости на стенку равна:

$$P = \rho gh_c \omega .$$

Здесь:

p_c – давление жидкости в центре тяжести смоченной поверхности стенки;

$p_{\max}$ – давление жидкости на дно сосуда;

h_c – глубина погружения центра тяжести поверхности стенки;

ω – смоченная жидкостью площадь стенки.

У прямоугольной стенки центр тяжести располагается в месте пересечения диагоналей, у треугольной – в месте пересечения медиан, у круглой – в центре.

Точку приложения силы давления на стенку называют центром давления. Для прямоугольной стенки центр давления располагается на глубине $2/3$ глубины сосуда.

Пример 2.1

В открытую сверху цилиндрическую трубку диаметром 1 см налита ртуть на высоту 1 м. Определить давление и силу давления ртути на дно сосуда; плотность ртути $\rho = 13546 \text{ кг/м}^3$, атмосферное давление $p_0 = 101,3 \text{ кПа}$.

Решение:

1. Гидростатическое давление:

$$p = p_0 + \rho gh = 101300 + 13546 \cdot 9,81 \cdot 1 = 234190 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 234,19 \text{ кПа}.$$

2. Площадь дна трубки:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 0,785 \text{ см}^2 = 0,785 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

3. Сила давления на дно:

$$P = p\omega = 234190 \cdot 0,785 \cdot 10^{-4} = 18,38 \text{ Н}.$$

Ответ: Давление на дно составляет 234,19 кПа, сила давления – 18,38 Н

Пример 2.2

Бак кубической формы со стороной $h=1\text{м}$ полностью заполнен бензином. Определить силу давления бензина на одну из вертикальных стенок бака. Плотность бензина $\rho=860 \text{ кг/м}^3$.

Решение:

1. Площадь стенки:

$$\omega = 1 \cdot 1 = 1 \text{ м}^2$$

2. Глубина погружения центра тяжести квадратной стенки (точки пересечения диагоналей квадрата) – половина стороны квадрата.

$$h_c = \frac{h}{2} = 0,5 \text{ м}.$$

3. Давление на вертикальную стенку:

$$p_c = \rho gh_c = 860 \cdot 9,81 \cdot 0,5 = 4218,3 \text{ Па}.$$

4. Сила давления на стенку:

$$P_c = p_c \omega = 4218,3 \cdot 1 = 4218,3 \text{ Н}.$$

Ответ: Сила давления на вертикальную стенку 4218,3 Н.

Задача 2.1

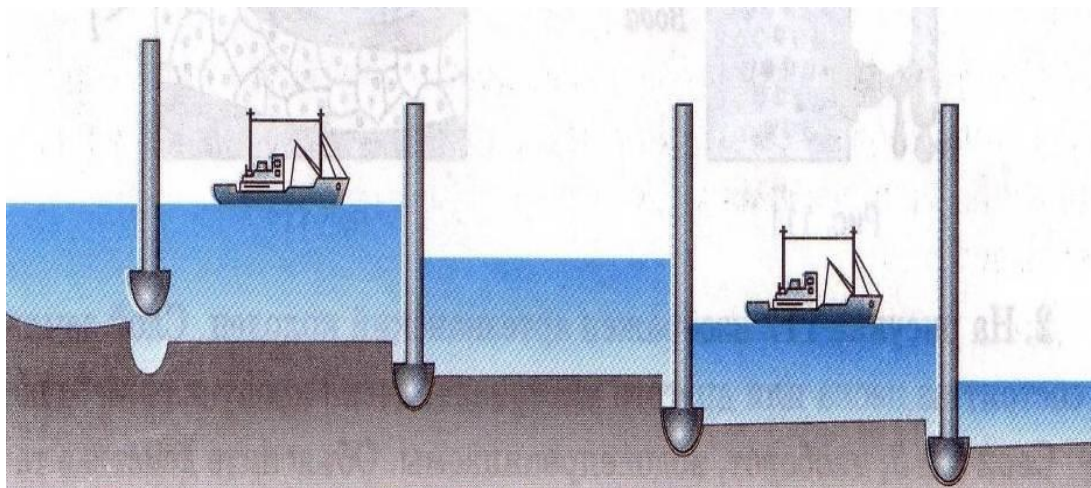
Водолаз работает в море на глубине $h = 50$ м. Определить давление воды на этой глубине и силу давления на скафандр водолаза, если площадь поверхности ω скафандра равна $2,5 \text{ м}^2$. Атмосферное давление принять $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. После подсчета записать, что не дает давлению воды раздавить скафандр?

Варианты заданий:

Номер варианта	Глубина, м	Атм. давление, Па
2	30	$1,00 \cdot 10^5$
3	32	$1,05 \cdot 10^5$
4	34	$0,95 \cdot 10^5$
5	36	$1,00 \cdot 10^5$
6	38	$1,05 \cdot 10^5$
7	40	$0,95 \cdot 10^5$
8	42	$1,00 \cdot 10^5$
9	44	$1,05 \cdot 10^5$
10	46	$0,95 \cdot 10^5$
11	48	$1,00 \cdot 10^5$
12	52	$1,05 \cdot 10^5$
13	54	$0,95 \cdot 10^5$
14	56	$1,00 \cdot 10^5$
15	58	$1,05 \cdot 10^5$
16	60	$0,95 \cdot 10^5$
17	62	$1,00 \cdot 10^5$
18	64	$1,05 \cdot 10^5$
19	66	$0,95 \cdot 10^5$
20	68	$1,05 \cdot 10^5$

Задача 2.2

Шлюз судоходного канала перекрыт шлюзовыми воротами. Определить силу давления воды на ворота, если ширина канала 15 м, а разница уровней воды внутри и снаружи шлюза 6 метров.



Варианты заданий:

Номер варианта	Разница уровней, м	Ширина канала, м
2	4,0	10
3	4,5	11
4	5,0	12
5	5,5	13
6	6,0	14
7	6,5	15
8	7,0	16
9	4,0	17
10	4,5	18
11	5,0	19
12	5,5	10
13	6,0	11
14	6,5	12
15	7,0	13
16	5,0	14
17	5,5	15
18	6,0	16
19	6,5	17
20	7,0	18

3 Режимы движение жидкости.

Поток движущейся жидкости характеризуют следующими показателями:

Живым сечением потока называют поверхность, нормальную (перпендикулярную) к вектору скорости, т. е. к линии тока.

Площадью живого сечения потока ω называют площадь потока жидкости в сечении, перпендикулярном направлению движения потока.

Смоченным периметром χ называют длину линии соприкосновения жидкости со стенками, ограничивающими поток в данном сечении.

Гидравлическим радиусом потока жидкости R называют отношение площади сечения потока ω к длине смоченного периметра χ :

$$R = \frac{\omega}{\chi}.$$

Количество жидкости, протекающее через площадь живого сечения в единицу времени, называют расходом. Расход бывает объемным и массовым.

$$Q = \frac{V}{t}; \quad Q_m = \frac{m}{t}.$$

Объемный расход жидкости Q измеряется в $\text{м}^3/\text{с}$ или $\text{л}/\text{с}$, массовый расход Q_m – в $\text{кг}/\text{с}$. Объемный расход связан с массовым расходом зависимостью:

$$Q = \frac{Q_m}{\rho},$$

где ρ – плотность жидкости.

Средней скоростью потока называется отношение расхода жидкости к площади живого сечения:

$$v = \frac{Q}{\omega},$$

откуда $Q = v \cdot \omega$.

Потоки жидкости характеризуются условием неразрывности – в любой момент времени расход жидкости постоянен во всех сечениях, т. е. соблюдается соотношение:

$$v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2 = \dots = v_n \omega_n \quad \text{или} \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1},$$

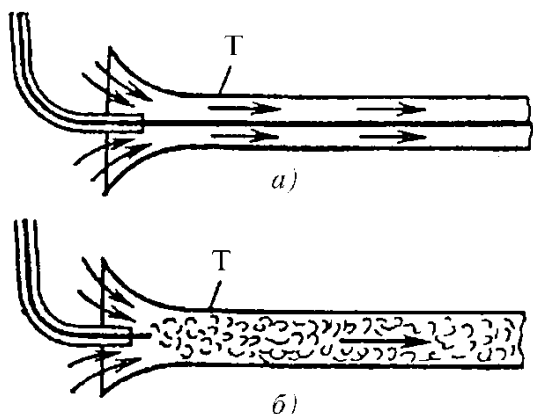
где $v_1, v_2, \dots, v$ – соответственно средние скорости потока в разных сечениях $\omega_1, \omega_2, \omega_n$.

Уравнение $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ называют уравнением неразрывности потока.

Реальные жидкости в отличие от идеальной обладают вязкостью. Вязкостью называют свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу слоев жидкости относительно друг друга. Это свойство обусловлено наличием в движущейся жидкости сил внутреннего трения.

В расчетах используют величины динамической вязкости μ , измеряемой в $\text{Па} \cdot \text{с}$, и кинематической вязкости ν , измеряемой в $\text{м}^2/\text{с}$.

В природе существуют два различных вида движения жидкости:



– во-первых, слоистое упорядоченное или ламинарное движение, при котором отдельные слои жидкости скользят друг относительно друга, не смешиваясь между собой (рис. а);

– во-вторых, неупорядоченное, так называемое турбулентное движение, когда частицы жидкости движутся по сложным, все время изменяющимся

траекториям и в жидкости происходит интенсивное перемешивание частиц и слоев (рис. б);

Имеется и третий режим движения жидкостей - переходный, при котором упорядоченное движение частиц очень неустойчиво, и при малейшем изменении условий перемещения потока может произойти переход от ламинарного режима к турбулентному, и наоборот.

Подмечено, что вязкие жидкости (например, масла), движутся большей части упорядоченно, а маловязкие жидкости (вода, бензин, газообразные вещества) - неупорядоченно.

На характер движения жидкости также сильно влияет скорость потока - медленно перемещающаяся по руслу жидкость ведет себя спокойно, но при увеличении скорости картина меняется.

Ученый Рейнольдс определил условия, при которых возможны существование разных режимов движения жидкости и переход от одного режима к другому. Оказалось, что режим потока жидкости в трубе зависит от величины некоторого безразмерного числа, учитывающего основные факторы, определяющие это движение: среднюю скорость, диаметр трубы, плотность жидкости и ее вязкость.

Влияние всех этих величин на характер движения жидкости объединены в формуле, выражающей число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho v R}{\mu},$$

где:

R – гидравлический радиус потока;

ρ – плотность жидкости;

v – скорость потока;

μ - динамическая вязкость жидкости.

Поскольку динамическая вязкость жидкости связана с кинематической вязкостью соотношением $\mu = \rho \cdot \nu$, то число Рейнольдса можно записать в виде:

$$Re = v \frac{R}{\nu}.$$

Число Рейнольдса является безразмерной величиной. Число Рейнольдса определяет границы, между которыми режим движения жидкости может принимать ламинарный или турбулентный характер.

Эти границы характеризуются критическими значениями числа Рейнольдса: нижним $Re_{кр}$ и верхним $Re'_{кр}$.

При $Re < Re_{кр}$ наблюдается устойчивый ламинарный режим течения жидкости,

при $Re > Re'_{кр}$ – устойчивый турбулентный режим

В интервале чисел Рейнольдса $Re_{кр} > Re > Re'_{кр}$ имеет место переходный режим течения жидкости, т. е. ламинарный режим может легко переходить в турбулентный и наоборот.

По критическому значению числа Рейнольдса легко можно определить также критическую скорость, т. е. скорость, ниже которой в цилиндрической трубе будет иметь место ламинарное движение жидкости:

$$v_{кр} = Re_{кр} \frac{v}{d} = 2300 \frac{v}{d}.$$

Для круглых цилиндрических труб с внутренним диаметром d :

$$Re_d = v \frac{d}{\nu}.$$

При проведении гидравлических расчетов цилиндрических труб обычно принимают $Re_{кр} = 2300$, $Re'_{кр} = 10000$.

Пример 3.1

По трубопроводу диаметром $d = 350$ мм за время $t = 12$ с проходит объем $V = 0,25$ м³ воды. Определить объемный и массовый расход, а также среднюю скорость движения воды. Плотность воды $\rho = 1000 \frac{кг}{м^3}$.

Решение:

Площадь живого сечения потока:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,35^2}{4} = 0,096 м^2.$$

Объемный расход воды:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0,25}{12} = 0,021 \frac{м^3}{с}.$$

Массовый расход воды:

$$\text{т. к. } Q_m = \frac{m}{t} \text{ и } m = V \cdot \rho; \quad Q_m = \frac{V \cdot \rho}{t} = \frac{0,25 \cdot 1000}{12} = 21 \frac{кг}{с}.$$

Средняя скорость воды

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,021}{0,096} = 0,22 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: Объемный расход воды равен $0,021 \text{ м}^3$, массовый расход равен $21 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, средняя скорость воды в трубопроводе – $0,22 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Пример 3.2

Определить режим движения нефти в трубопроводе диаметром $d = 400 \text{ мм}$ при скорости движения $v = 0,13 \text{ м/с}$. Кинематическая вязкость нефти $\nu = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Решение:

1. Приведем исходные данные к системе единиц СИ: $d = 0,4 \text{ м}$.
2. Число Рейнольдса для данного диаметра трубы и скорости потока:

$$\text{Red} = v \frac{d}{\nu} = 0,13 \frac{0,4}{0,3 \cdot 10^{-4}} = 1733.$$

Ответ: поскольку число Рейнольдса менее критического значения ($1733 < 2300$), движение нефти в трубопроводе будет осуществляться в ламинарном режиме.

Задача 3.1

Вычислить массовый расход жидкости, проходящий через поперечное сечение трубопровода площадью $\omega = 0,1 \text{ м}^2$. Средняя скорость потока $v = 1,2 \text{ м/с}$, плотность жидкости $\rho = 890 \text{ кг/м}^3$.

Варианты заданий:

Номер варианта.	$\omega, \text{ м}^2$	$v, \text{ м/с}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$
2	0,6	1,1	840
3	0,8	1,0	850
4	1,0	0,9	860
5	2,0	0,8	870
6	1,4	0,7	880
7	1,6	0,6	890
8	0,6	1,1	900
9	0,8	1,0	910
10	1,0	0,9	920
11	2,0	0,8	930
12	1,4	0,7	940
13	1,6	0,6	950
14	0,6	1,1	960
15	0,8	1,0	970
16	1,0	0,9	980
17	2,0	0,8	990
18	1,4	0,7	1000
19	1,6	0,6	1010
20	1,8	1,2	1020

Задача 3.2

По трубе внутренним диаметром $d = 80$ мм движется вода, кинематическая вязкость которой $\nu = 1,515 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Скорость движения воды $u = 2$ м/с. Определить режим движения жидкости.

Варианты заданий:

Номер варианта	d , мм	u , м/с
2	20	1
3	25	1,2
4	30	1,4
5	35	1,6
6	40	1,8
7	45	2,0
8	50	2,2
9	55	2,4
10	60	2,6
11	65	2,8
12	70	3,0
13	75	3,2
14	20	3,4
15	25	3,6
16	30	3,8
17	35	4,0
18	40	4,2
19	45	4,4
20	50	4,6

4 Уравнение Бернулли.

Один из основополагающих законов природы говорит о том, что энергия не возникает ниоткуда и не исчезает бесследно. Применительно к гидравлике, к физическим законам о перемещении струи жидкости по руслу, этот закон принимает вид уравнения Бернулли:

$$\frac{\rho u^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}.$$

Здесь все слагаемые – это удельные энергии струйки жидкости.

Физический смысл уравнения Бернулли состоит в том, что однажды полученная струйкой жидкости суммарная энергия, состоящая из суммы энергии движения, энергии давления и энергии положения, остается неизменной вне зависимости от изменения условий протекания этой струйки (размера канала, по которому она течет, изменения места его расположения и т.д.).

Величина $\frac{\rho u^2}{2}$ в формуле называется удельной энергией движения или динамическим давлением. Энергия движения обусловлена скоростью

потока, в котором движется рассматриваемый элементарный объем жидкости.

Величина ρgh называется удельной потенциальной энергией давления или гидростатическим давлением. Потенциальная энергия обусловлена положением данной струйки жидкости в пространстве (зависит от высоты над поверхностью Земли).

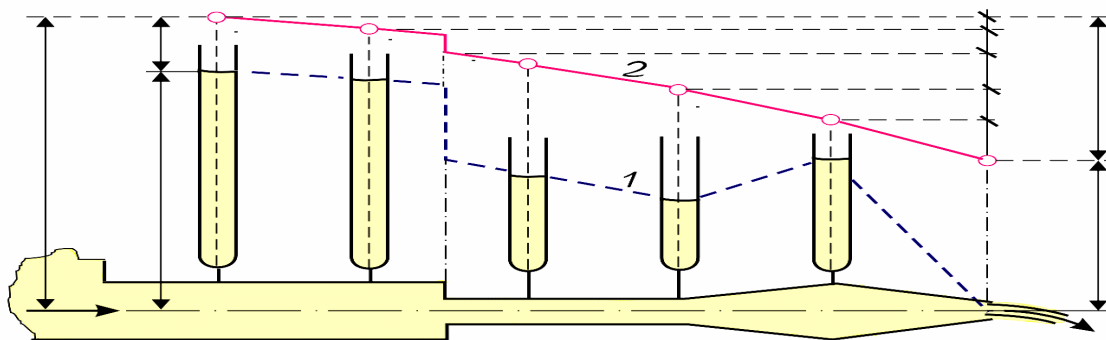
Величина p называется удельной потенциальной энергией положения или статическим давлением. Статическое (внешнее) давление обусловлено взаимодействием поверхности жидкости с внешней средой.

После некоторых математических преобразований записанное выше уравнение Бернулли приводят к другому виду:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = \text{const}.$$

В этом уравнении каждый его член выражает не величину удельной энергии, а напор, т.е. механическую энергию жидкости, отнесенную к единице ее веса.

Напор жидкости можно увидеть наглядно. Для этого достаточно в канал, по которому течет жидкость герметично вставить стеклянную трубку. Жидкость в трубке поднимется на некоторую высоту, тем большую, чем больше напор.



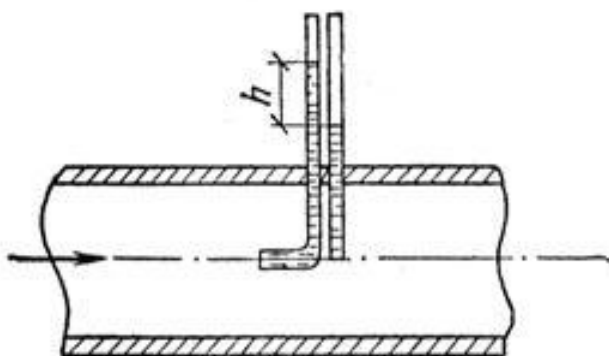
Величину $\frac{v^2}{2g}$ называют скоростным (кинетическим) напором, показывающим, на какую высоту может подняться движущаяся жидкость за счет ее кинетической энергии.

Величину $\frac{p}{\rho g}$ называют статическим (пьезометрическим) напором, показывающим на какую высоту поднимается жидкость в пьезометре под действием оказываемого на нее давления.

Величину z называют геометрическим напором, характеризующим высоту расположения движущейся струйки над условно выбранной плоскостью.

Сумму геометрического и пьезометрического напоров называют потенциальным напором, а сумму потенциального и скоростного напора - полным напором.

Так как динамическое давление зависит от скорости движения жидкости, то уравнение Бернулли можно использовать для измерения скорости потока жидкости. Устройство для определения скорости потока называется трубкой Пито – Прандтля (или просто трубкой Пито).



Трубка Пито – Прандтля состоит из двух тонких стеклянных трубок, одна из которых изогнута под прямым углом (Г-образно), а вторая - прямая. Изогнутая трубка имеет открытый свободный конец, направленный против тока и принимающий напор потока жидкости, а вторая погружена в поток перпендикулярно току, и

скорость потока на давление внутри трубки не влияет, т. е. внутри этой трубки действует лишь статическая составляющая давления жидкости.

Высота столба жидкости в прямой трубке (статический напор) определяется формулой:

$$H = \frac{p}{\rho g}.$$

Высота столба жидкости в изогнутой трубке (полный напор) равна сумме статического и скоростного напора и определяется по формуле:

$$H = \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}.$$

Разница h между высотами столба жидкости в первой трубке и второй трубке, является скоростным напором, определяемым по формуле:

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

Отсюда можно выразить скорость потока жидкости:

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Вязкость реальной жидкости, а также потери напора из-за действия в жидкости сил трения, в уравнении Бернулли учитывается включением в него добавочных членов α и h_s :

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

где

α_1, α_2 – коэффициенты Кориолиса, учитывающие различие скоростей в разных точках сечения потока реальной жидкости;

h_s – потери напора жидкости из-за действия сил трения при прохождении участка русла.

На практике обычно принимают для ламинарного режима течения жидкости в круглых трубах $\alpha = 2$, для турбулентного режима $\alpha = 1,04 \dots 1,1$.

Потери напора на трение h_s определяют расчетами гидравлических потерь в трубопроводах.

Пример 4.1

Скальную породу размывают гидромонитором; воду в гидромонитор подают насосом. Определить давление p_1 на выходе насоса, необходимое для придания воде на выходе из монитора скорости 40 м/с, если скорость на выходе насоса равна 3 м/с, насос расположен на уровне земли, а работы ведутся на высоте 10 м над землей.

Решение:

1. Уравнение Бернулли:

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

Левая часть уравнения описывает суммарный напор воды на уровне земли, на выходе насоса. Здесь v_1 , p_1 , ρ , z_1 – это скорость, давление, плотность воды и высота насоса от земли;

Правая часть уравнения описывает суммарный напор воды на выходе из монитора.

Здесь v_2 , p_2 , ρ и z_2 – это скорость, давление, и плотность воды на выходе из монитора, а также высота расположения монитора от земли;

2. Запишем исходные данные:

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$v_1 = 3 \text{ м/с};$$

$$z_1 = 0;$$

$$v_2 = 40 \text{ м/с};$$

$p_2 \approx 101300 \text{ Па}$ (давление на выходе из сопла монитора равно атмосферному);

$$z_2 = 10 \text{ м};$$

$$p_1 = ?$$

3. Выразим из уравнения Бернулли величину p_1 :

$$p_1 = \rho g \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + z_2 - z_1 \right).$$

4. Подставим в формулу исходные данные:

$$p_1 = 1000 \cdot 9,81 \left(\frac{101300}{1000 \cdot 9,81} + \frac{40^2 - 3^2}{2 \cdot 9,81} + 10 - 0 \right) = 995\,000 \text{ Па} = 995 \text{ кПа}.$$

Задача 4.1

Вычислить перепад давления в трубопроводе, транспортирующем жидкость, если известно: плотность жидкости $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$, средняя скорость потока через начальное сечение $v_1 = 2 \text{ м/с}$, а через конечное – $v_2 = 1,8 \text{ м/с}$, трубопровод расположен горизонтально.

Варианты заданий:

Номер варианта	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$v_1, \text{ м/с}$	$v_2, \text{ м/с}$
2	1500	3,0	2,0
3	1450	2,9	1,9
4	1400	2,8	1,8
5	1350	2,7	1,7
6	1300	2,6	1,6
7	1250	2,5	1,5
8	1200	2,4	1,4
9	1500	2,3	1,3
10	1450	2,2	1,2
11	1400	2,1	1,1
12	1350	3,0	1,0
13	1300	2,9	1,7
14	1250	2,8	1,6
15	1200	2,7	1,5
16	1500	2,6	1,4
17	1450	2,5	1,3
18	1400	2,4	1,2
19	1350	2,3	1,1
20	1300	2,2	1,0

Задача 4.2

Определить статическое давление в трубопроводе и скорость движения воды в нем, если в прямой трубке Пито жидкость поднялась на 1 м, а в изогнутой трубке – на 1,5 м. Плотность воды $\rho_v=1000 \text{ кг/м}^3$.

Варианты заданий:

Номер варианта	Высота в прямой трубке, м	Высота в изогнутой трубке, м
2	1,2	1,5
3	1,4	1,7
4	1,6	1,9
5	1,8	2,2
6	2,0	2,4
7	2,2	2,6
8	2,4	2,8
9	2,6	3,2
10	2,8	3,5
11	3,0	3,6
12	3,2	3,7
13	3,4	3,9
14	3,6	4,1
15	3,8	4,2
16	1,4	1,9
17	1,6	2,2
18	1,8	2,4
19	2,0	2,6
20	2,2	2,8

5 Гидравлические сопротивления

При движении жидкости в трубе между нею и стенками трубы возникают дополнительные силы сопротивления. Равнодействующая сил сопротивления направлена в сторону, противоположную движению жидкости, и параллельна направлению движения. Это и есть сила гидравлического трения.

Для преодоления сопротивления трения и поддержания равномерного поступательного движения жидкости необходимо, затрачивать энергию. Энергию или напор, необходимый для преодоления сил сопротивления, называют потеряннй энергией или потеряннм напором.

Потери напора, затрачиваемые на преодоление сопротивления трения, носят название потерь напора по длине потока (линейные потери напора) и обозначаются обычно $h_{\text{л}}$.

Резкое изменение сечения или внезапное изменение направления трубопровода также оказывает сопротивление движению жидкости и вызывает потери энергии. Потери напора, вызываемые резким изменением конфигурации границ потока, называют местными потерями

напора или потерями напора на местные сопротивления и обозначаются через h_m .

Таким образом, суммарные потери напора при движении жидкости складываются из потерь напора на трение и потерь на местные сопротивления:

$$h_s = h_l + h_m.$$

При равномерном движении жидкости в трубах потери напора на трение по длине определяют по формуле Дарси-Вейсбаха, которая справедлива для круглых труб, как при турбулентном, так и при ламинарном режиме.

$$h_l = \frac{\lambda l v^2}{2gd}.$$

где:

v – средняя скоростью потока жидкости;

d – диаметр трубы;

l – длина трубы;

g – ускорение свободного падения;

λ – коэффициент гидравлического трения, равный:

- для ламинарного движения $\lambda = \frac{64}{Re}$ – формула Пуазейля;
- для турбулентного движения $\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}$ – формула Блазиуса,.

где $Re = v \frac{d}{\nu}$ – число Рейнольдса.

Местные потери напора обусловлены преодолением местных сопротивлений, изгибов, арматуры и прочего оборудования трубопроводных сетей, а также изменением направления потока жидкости (изгибы труб, колена вентили и т. п.).

Потери напора в местных сопротивлениях h_m (местные потери напора) вычисляют по формуле Вейсбаха:

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

где:

v – средняя скорость в сечении, расположенном ниже по течению за местным сопротивлением;

ξ – безразмерный коэффициент местного сопротивления, определяемый для каждого вида местного сопротивления по справочным таблицам или установленным зависимостям.

В случае, если местные сопротивления создаются не одним, а многими препятствиями, в формуле учитывают их сумму:

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

Коэффициенты местных сопротивлений

<i>Местное сопротивление</i>	<i>Коэффициент местного сопротивления</i>
<i>Задвижка нормальная</i>	0,5
<i>Вентиль с косым шпинделем</i>	0,5
<i>Вентиль с вертик-м шпинделем</i>	6
<i>Обратный клапан нормальный</i>	7
<i>Обратный клапан захлопка</i>	3
<i>Кран проходной</i>	2
<i>Отвод гнутый 90° со скл. при R/d=3</i>	0,5
<i>Отвод гнутый 90° со скл. при R/d=4</i>	0,3
<i>Отвод сварной одношовн. 60°</i>	0,7
<i>Отвод сварной одношовн. 45°</i>	0,3
<i>Отвод сварной одношовн. 30°</i>	0,2
<i>Отвод сварной двухшовн. 90°</i>	0,6
<i>Отвод сварной трехшовн. 90°</i>	0,5
<i>Отвод гнутый 90° гладк. при R/d=1</i>	1
<i>Отвод гнутый 90° гладк. при R/d=3</i>	0,5
<i>Отвод гнутый 90° гладк. при R/d=4</i>	0,3
<i>Тройник на проход</i>	1,2
<i>Тройник на ответвление</i>	1,5
<i>Тройник на ответвление</i>	3
<i>Грязевик</i>	10

При внезапном расширении потока коэффициент местного сопротивления определяется как:

$$\xi = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2 ;$$

при внезапном сужении потока –

$$\xi = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right),$$

где ω_1, ω_2 – соответственно площадь сечения потока до и после расширения (сужения).

Полная потеря напора подсчитывается как сумма потерь на трение по длине и потерь на местные сопротивления

$$h_s = h_{\text{тр}} + \Sigma h_{\text{л}} = \frac{v^2}{2gd} \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi \right).$$

Здесь:

h_s – суммарные потери напора;

$h_{\text{л}}$ – потери напора на трение по длине трубопровода (линейные потери);

$\Sigma h_{\text{м}}$ – сумма местных потерь в трубопроводе

Пример 5.1

Вода, подаваемая по стальному трубопроводу $\frac{3}{4}$ " с внутренним диаметром 21 мм и длиной 50 м наполняет ведро объемом $V=10$ л за время $t=10$ с. Определить потери напора по длине. Кинематическая вязкость воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Решение:

1. Расход воды по трубопроводу:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0,01}{10} = 1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

2. Скорость воды в трубопроводе:

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,021^2} = 2,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

3. Число Рейнольдса:

$$Re = v \frac{d}{\nu} = 2,9 \frac{0,021}{1 \cdot 10^{-6}} = 60900.$$

4. Режим течения жидкости – турбулентный, т.к. $Re > Re'_{\text{кр}}$ ($60900 > 10000$).
5. Коэффициент гидравлического трения при турбулентном режиме определяем по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{60900}} = 0,02.$$

6. Потери напора на трение:

$$h_{\text{л}} = \frac{\lambda v^2}{2gd} = \frac{0,02 \cdot 50 \cdot 2,9^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,021} = 40,86 \text{ м.}$$

Ответ: потери давления на трение по длине трубопровода составят 40,86 м ($\approx 4,1 \text{ кг/см}^2$, $\approx 0,41 \text{ МПа}$).

Пример 5.2

Чему равны местные потери напора на внезапном сужении трубопровода с диаметра $d_1 = 200 \text{ мм}$ на $d_2 = 150 \text{ мм}$, если скорость движения жидкости через этот участок $v = 1,6 \text{ м/с}$?

Решение:

1. При внезапном сужении трубопровода коэффициент местного сопротивления ξ на внезапном сужении трубопровода определяется по формуле:

$$\xi = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \text{ или, после преобразования, } \xi = 0,5 \left(1 - \frac{d_2^2}{d_1^2} \right).$$

2. Коэффициент местного сопротивления;

$$\xi = 0,5 \left(1 - \frac{d_2^2}{d_1^2} \right) = 0,5 \left(1 - \frac{0,15^2}{0,2^2} \right) = 0,22.$$

3. Местные потери напора определяем по формуле Вейсбаха:

$$h_{\text{м}} = \frac{\xi v^2}{2g} = \frac{0,22 \cdot 1,6^2}{2 \cdot 9,81} = 0,029 \text{ м.}$$

Ответ: местные потери напора на внезапном сужении трубопровода равны 0,029 метра.

Задача 5.1

По трубопроводу внутренним диаметром $d = 20 \text{ мм}$ и протяженностью $l = 12 \text{ м}$ за время $t = 4 \text{ с.}$ перекачивают $V = 2 \text{ литра}$ бензина. Определить потери напора по длине.

Кинематическая вязкость бензина $\nu = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с.}$

Варианты заданий:

Номер варианта	Внутренний диаметр, мм	Время истечения, с
2	25	3
3	30	5
4	35	7
5	40	9
6	45	3
7	50	5

8	25	7
9	30	9
10	35	3
11	40	5
12	45	7
13	50	9
14	25	3
15	30	5
16	35	7
17	40	9
18	45	3
19	50	5
20	25	7

Задача 5.2

По трубопроводу внутренним диаметром $d = 20$ мм и протяженностью $l = 12$ м за время $t = 4$ с. перекачивают $V = 2$ литра глицерина. Определить потери напора по длине. Кинематическая вязкость глицерина $\nu = 9,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$. Сравнить ответы решения задач 5.1 и 5.2 и пояснить результат.

Номер варианта	Внутренний диаметр, мм	Время истечения, с
2	25	3
3	30	5
4	35	7
5	40	9
6	45	3
7	50	5
8	25	7
9	30	9
10	35	3
11	40	5
12	45	7
13	50	9
14	25	3
15	30	5
16	35	7
17	40	9
18	45	3
19	50	5
20	25	7

Задача 5.3

По трубопроводу внутренним диаметром $d=15$ мм насосом с производительностью $Q=12$ литров в минуту подают воду. Определить потери напора, если длина трубопровода $l=30$ м, в трубопроводе установлена арматура: один тройник на проход и один проходной кран. Кинематическая вязкость воды $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Варианты заданий:

Номер варианта	Производительность насоса, л/мин	Длина трубопровода, м	Набор арматуры
2	10	50	2 вентиля, 1 тройник
3	12	45	2 вентиля, 2 тройника
4	14	40	1 вентиль, 1 тройник
5	16	35	1 вентиль, 2 тройника
6	18	30	2 вентиля, 1 тройник
7	20	50	2 вентиля, 2 тройника
8	10	45	1 вентиль, 1 тройник
9	12	40	1 вентиль, 2 тройника
10	14	35	2 вентиля, 1 тройник
11	16	30	2 вентиля, 2 тройника
12	18	50	1 вентиль, 1 тройник
13	20	45	1 вентиль, 2 тройника
14	10	40	2 вентиля, 1 тройник
15	12	35	2 вентиля, 2 тройника
16	14	30	1 вентиль, 1 тройник
17	16	50	1 вентиль, 2 тройника
18	18	45	2 вентиля, 2 тройника
19	20	40	1 вентиль, 1 тройник
20	10	35	1 вентиль, 2 тройника

6 Расчет трубопроводов

Трубопроводы делят на короткие и длинные. В длинных трубопроводах ($l > 50$ метров) потери напора на трение по длине значительно превышают местные потери, в коротких трубопроводах ($l < 50$ метров) местные потери сопоставимы с потерями на трение.

Короткие трубопроводы рассчитывают по уравнению Бернулли, представленном в виде:

$$H_n + B_n Q^2 = H_k + B_k Q^2 + \sum S_{0\text{ кв}} Q^2 l + \sum B \xi Q^2.$$

Здесь H_n , H_k – пьезометрические (статические) напоры в начале и конце трубопровода, определяемые по формуле:

$$H = z + \frac{p}{\rho g},$$

где:

z – геодезическая отметка (высота на местности) данной точки трубопровода;

p – избыточное давление в трубопроводе в этой точке;

$\frac{p}{\rho g}$ – пьезометрическая высота (свободный напор).

B_n , B_k – табличные значения коэффициентов, зависящие от расчетного диаметра и материала трубы;

$S_{0\text{ кв}}$ – табличное значение удельного сопротивления данной трубы.

Решая приведенное выше уравнение, находят, в зависимости от условий задачи, расход Q , необходимый напор в начале трубопровода H_n , или его диаметр и т.д.

Длинные трубопроводы рассчитывают аналогично коротким, но местными потерями напора и скоростными напорами в них пренебрегают, вследствие их относительной малости. С учетом этого расчетное уравнение приобретает вид:

$$H_n - H_k = \Sigma S_{0\text{ кв}} Q^2 l.$$

Знак Σ в формуле означает, что если трубопровод состоит из нескольких последовательных участков, то потери в них складываются. Для одиночного трубопровода:

$$H_n - H_k = S_{0\text{ кв}} Q^2 l.$$

Для большей надежности местные потери напора учитывают, увеличивая расчетную длину трубопровода на 5-10%.

При проектировании новых трубопроводов могут быть неизвестны две величины – напор в начальной точке и диаметр трубы. В этом случае задаются диаметром трубопровода и рекомендуемыми из экономических соображений предельными скоростями $v_{пр}$:

$$d = 1,13 \sqrt{\frac{Q}{v_{пр}}}$$

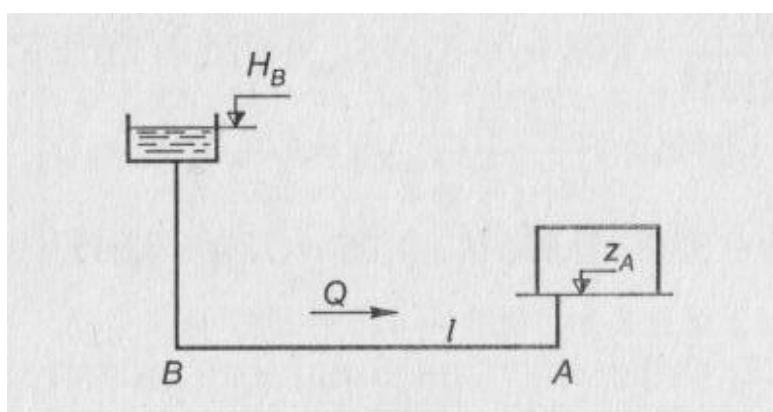
Экономически выгодным диаметром считается диаметр трубопровода, обеспечивающий скорость движения жидкости $v=1\text{ м/с}$. Транспортировка с меньшими скоростями увеличивает строительные затраты (применения более толстых труб) с большими эксплуатационные затраты (перекачка под большим давлением). При применении экономически выгодной скорости

$$d = 1,13 \sqrt{Q}.$$

К определению коэффициентов B и $S_{0\text{кв}}$ в уравнении Бернулли

Диаметр условного прохода d , мм	Стальные трубы			Чугунные трубы		
	Расчетный внутренний диаметр d_p , мм	B , $\text{с}^2/\text{м}^5$	$S_{0\text{кв}}$, $\text{с}^2/\text{м}^6$	Расчетный внутренний диаметр d_p , мм	B , $\text{с}^2/\text{м}^5$	$S_{0\text{кв}}$, $\text{с}^2/\text{м}^6$
50	64	4920	3686	51,6	11 690	11 540
60	70	3440	2292	—	—	—
75	83	1741	929	—	—	—
80	95	1014	454	82,6	1178	953
100	114	506,5	173	102	754,7	312
125	133	264,2	76,4	127,2	316,2	96,7
150	158	132,7	30,7	152,4	153,25	37,1
175	170	98,9	20,8	—	—	—
200	209	43,3	6,96	202,6	49,23	8,09
250	260	18,07	2,19	253	20,2	2,53
300	311	8,84	0,85	304,4	9,62	0,95
350	363	4,76	0,373	352,4	5,37	0,437
400	414	2,81	0,186	401,4	3,2	0,219
450	466	1,753	0,099	450,6	2	0,199
500	516	1,15	0,058	500,8	1,315	0,0678
600	616	0,574	0,0226	600,2	0,637	0,026
700	706	0,332	0,011	699,4	0,346	0,0115
800	804	0,197	0,00551	799,8	0,202	0,00567
900	904	0,124	0,00296	899,2	0,127	0,00305
1000	1004	0,0812	0,0017	998,4	0,0832	0,00175
1200	1202	0,0397	0,00654	1199,2	0,0399	0,000663
1400	1400	0,0215	0,000292	—	—	—
1500	1500	0,0163	0,000202	—	—	—
1600	1600	0,0126	0,000144	—	—	—

Пример 6.1



Определить диаметр трубопровода для подачи расхода $Q=15$ л/с от водонапорной башни В до предприятия А при длине стального трубопровода $l=1000$ м, отметке уровня воды в башне $H_B=28$ м, геодезической отметке в конце трубопровода $Z_A=2$ м, и необходимом напоре на предприятии $H_{\text{пр}} > 12$ м.

Решение:

1. Т.к. длина трубопровода 1000 м, и местные потери не заданы – трубопровод длинный. Местные потери учтем путем увеличения длины трубопровода на 5% .

$$l = 1,05 \cdot 1000 = 1050 \text{ м}$$

2. Необходимый напор в конце трубопровода (на предприятии):

$$H_A = H_{\text{пр}} + Z_a = 2 + 12 = 14 \text{ м.}$$

3. Находим удельное сопротивление трубы, обеспечивающее заданный расход:

$$S_0 = \frac{H_B - H_A}{Q^2 \cdot l} = \frac{28 - 14}{0,015^2 \cdot 1050} = 59,2 \frac{\text{с}^2}{\text{м}^6}$$

4. В таблице коэффициентов В и S_0 находим ближайшее меньшее значение $S_0=30,7$ и соответствующее ему значение диаметра условного прохода трубы $d=150$ мм.

5. Уточняем напор в конце трубопровода при выбранных по таблице d и S_0 :

$$H_A = H_B - S_0 Q^2 l = 28 - 30,7 \cdot 0,015^2 \cdot 1050 = 20,74 \text{ м}$$

6. $20,74 > 12$ - необходимый напор в конце трубопровода обеспечен.

Ответ: условный диаметр трубопровода 150 мм.

Задача 6.1

Определить необходимый диаметр участка трубопровода длиной 200 м для пропуска расхода $Q=10$ л/с при напоре в начале трубопровода 10 м и напоре в конце трубопровода 6 м. После выбора стандартной трубы произвести проверку обеспечения заданной разности напоров.

Варианты заданий

Номер варианта	Расход, л/с	Напор в конце трубопровода, м
2	12	4
3	14	6
4	16	5
5	18	4
6	20	3
7	22	4
8	24	6
9	12	5
10	14	4
11	16	3
12	18	4
13	20	6

14	22	5
15	24	4
16	12	3
17	14	4
18	16	3
19	18	4
20	20	6

7 Гидравлический удар

Гидравлическим ударом (гидроударом) называется резкое повышение давления в трубопроводе при внезапной остановке движущейся жидкости. Скачок давления вызывает внезапная преграда на пути потока жидкости, и последствия этого явления зависят от энергии, которой обладает поток.

Гидроудар может иметь место при быстром закрывании различных запорных устройств (задвижек, кранов), при внезапной остановке насоса, перекачивающего жидкость, и т.д. Подобное нередко приводит к разрушению трубопроводов, арматуры и гидромашин, поскольку массивы подвижной жидкости, перемещающиеся в напорном режиме, могут нести в себе значительную кинетическую энергию.

Давление жидкости при гидравлическом ударе определяется по формуле Н.Е. Жуковского:

$$\Delta p = \rho u C,$$

где:

C – скорость звука в среде (жидкости), м/с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

u – скорость движения жидкости в трубопроводе, м/с.

В чугунных и стальных водопроводных трубах скорость звука в жидкости (скорость распространения ударной волны) принимается $C=1000...1400$ м/с.

Гидравлический удар особенно опасен для длинных трубопроводов, в которых движутся значительные массы жидкости с большими скоростями, и внезапное уменьшение скорости (или резкая остановка) этой массы приводит к деформации трубопроводов и их разрушению.

Для предотвращения разрушения гидравлических систем применяются различные конструктивные устройства. Основными из них являются винтовые запорные устройства, предохранительные клапаны и воздушные колпаки, основная цель которых – увеличить время

срабатывания запорного устройства с целью плавности остановки потока жидкости.

Пример 7.1

Определить на какую величину повысится давление в водопроводе при гидроударе, образовавшейся при резком перекрытии сечения трубопровода. До гидравлического удара средняя скорость потока равна 2 м/с, плотность воды 1000 кг/м³, скорость звука в воде равнее 1300 м/с.

Решение:

Повышение давления при гидравлическом ударе:

$$\Delta p = C_{pu} = 1300 \cdot 1000 \cdot 2 = 2600000 \text{ Па.}$$

Ответ: Повышение давления при гидроударе составит 2 600 000 Па=2,6МПа.

Задача 7.1

На стальном водопроводе установлено запорное устройство. Трубопровод выдержит без разрушения давление не более 2 МПа. С какой скоростью должна двигаться по водопроводу жидкость, чтобы в случае гидравлического удара не произошло разрушение трубопровода?

Варианты заданий:

Номер варианта	Предельное давление, МПа
2	2,2
3	2,4
4	2,6
5	2,8
6	3,0
7	3,2
8	3,4
9	3,6
10	3,8
11	4,0
12	4,2
13	4,4
14	4,6
15	4,8
16	5,0
17	5,2
18	5,4
19	5,6
20	5,8

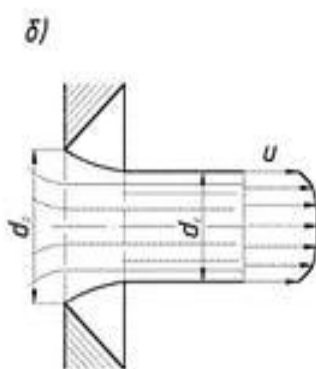
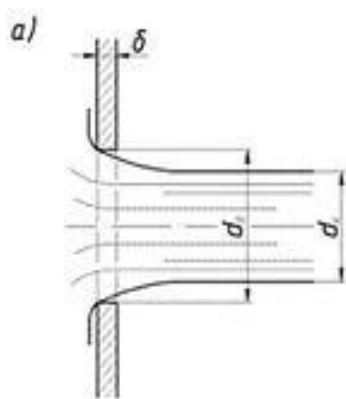
8 Истечение жидкостей из отверстий и насадок

Отверстия и насадки, через которые вытекают жидкости, предназначены для определенных практических целей. В зависимости от назначения им придают нужную форму.

Задачей многих технических расчетов является определение скорости истечения и расхода для различных отверстий и насадок.

Малым отверстием в тонкой стенке называется отверстие с фаской или заостренными кромками в стенке, толщина которой не влияет на условие истечения жидкости и форму струйки.

Жидкость изливается свободно, не тормозя о стенки отверстия. Истечение всегда происходит так: струя жидкости отрывается от стенки у кромки



отверстия, а затем сжимается. Сжатие происходит потому, что струйки жидкости обладают инерцией и не могут повернуть сразу на 90° а огибают кромку по кривой. Струя принимает цилиндрическую форму на расстоянии $\approx 0,5 d$.

Рис. 6.2. Схемы выполнения малого отверстия в стенке

Расход жидкости определяется по формуле:

$$Q = \omega v,$$

где

v – скорость жидкости,

ω – сечение потока после сужения.

В зависимости от места расположения сечения в струйке сжатие будет различным. Наибольшее сжатие наблюдается на расстоянии $0,5d$ от стенки.

$$\varepsilon = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}.$$

Отношение ε называют степенью сжатия струи.

Истечение реальной жидкости характеризуется, как мы знаем, коэффициентом α , характеризующим неравномерность скорости по сечению потока. Кроме того, при истечении через отверстие жидкость преодолевает местное сопротивление, характеризуемое коэффициентом местного сопротивления ξ . Коэффициент φ называют коэффициентом скорости, а коэффициент μ - коэффициентом расхода.

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}};$$

$$\mu = \varepsilon \varphi.$$

Тогда скорость и расход жидкости через отверстие определяется по формуле Торричелли:

$$v = \varphi \sqrt{2gH},$$

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}.$$

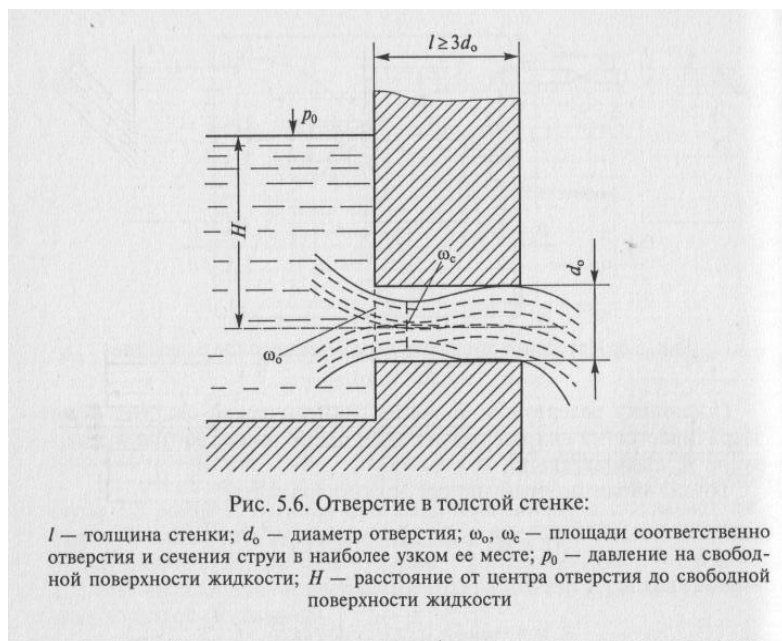
При истечении под уровень (в этом случае отверстие называется затопленным) скорость и расход выражаются следующими зависимостями:

$$v = \varphi \sqrt{2g\Delta H},$$

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g\Delta H},$$

где Δh – разность уровней жидкости.

Стенка, толщина которой в месте расположения отверстия второе больше утроенного диаметра отверстия, в гидравлическом смысле является толстой стенкой. При истечении струя жидкости сначала



сужается до минимального размера ω_0 на некотором расстоянии от стенки, а затем расширяется, выходя полным сечением в окружающую среду. В области сжатого сечения между струей и стенкой создается вакуум, отчего жидкость подсасывается в отверстие и пропускная способность отверстия

становится больше по сравнению с истечением жидкости через отверстие в тонкой стенке. Величина вакуума в насадке зависит от напора H и может быть определена по формуле:

$$p_{\text{вак}} = 0,75H \text{ (м)}.$$

Если при истечении воды напор H превысит 10м, то произойдет срыв вакуума, и жидкость будет вытекать как через отверстие в тонкой стенке.

Данный эффект подсоса используется в использовании насадок.

Выбор типа насадка зависит от того, для чего намечено его применение. Если нужно получить струю большой дальностью (брандспойты, гидромониторы), то применяют сужающиеся коноидальные или тороидальные насадки, если нужно увеличить пропускание жидкости – цилиндрические и конические расходящиеся насадки (отсасывающие трубы, сливные устройства).

Тип насадки (отверстия)	Коэффициенты		
	ε	φ	μ
Малое отверстие в тонкой стенке	0,64	0,97	0,62
Затопленное отверстие	-	-	0,6
Донное отверстие	-	-	0,7
Внешний цилиндрический	1	0,82	0,82
Внутренний цилиндрический	1	0,71	0,71
Конический сходящийся (угол конусности 12...15°)	0,98	0,96	0,94
Конический расходящийся (угол конусности 5...7°)	1	0,5	0,5
Коноидальный	1	0,97	0,97

Пример 8.1

Через малое отверстие $d_{\text{отв}} = 5$ мм в тонкой стенке открытого сосуда в атмосферу истекает вода, при этом над отверстием находится столб воды высотой $H = 0,6$ м. Определить скорость истечения жидкости из отверстия, расход жидкости и диаметр струи.

Решение:

1. Скорость истечения жидкости из отверстия:

$$v = \varphi \sqrt{2gH} = 0,97 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,6} = 3,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2. Диаметр струи определяем, зная, что:

$$\varepsilon = \frac{\omega_{\text{стр}}}{\omega_{\text{отв}}} = \frac{d_{\text{стр}}^2}{d_{\text{отв}}^2},$$

отсюда:

$$d_{\text{стр}} = \sqrt{\varepsilon d_{\text{отв}}^2} = \sqrt{0,64 \cdot 5^2} = 3,9 \text{ мм}.$$

3. Расход жидкости:

$$Q = \omega_{\text{стр}} \cdot v = \frac{\pi d_{\text{стр}}^2}{4} \cdot v = \frac{3,14 \cdot 0,0039^2}{4} \cdot 3,3 = 0,000039 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 0,039 \frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Ответ: скорость истечения жидкости 3 м/с, диаметр струи 3,9 мм, расход 0,039 л/с.

Пример 8.2

В сосуде создан постоянный напор воды 100м. Определить расход через внешний цилиндрический насадок диаметром $d=20$ мм.

Решение:

1. Коэффициент расхода цилиндрической насадки (из таблицы)
 $\mu = 0,82$.
2. Расход воды из насадка:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH} = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2gH} = 0,82 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 100} = 0,01 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 10 \frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Ответ: расход воды из насадка составит 100 литров в секунду.

Задача 8.1

По горизонтально расположенному трубопроводу, на конце которого расположен конoidalный насадок диаметром выходного сечения 20 мм движется вода под избыточным давлением 0,1 МПа.

1. Определить расход жидкости через насадок.
2. Каким будет расход и во сколько раз он изменится, если конoidalный насадок заменить:
 - на внешний цилиндрический такого же диаметра?

– на отверстие в тонкой стенке?

Варианты заданий:

Номер варианта	Диаметр выходного сечения, мм	Избыточное давление, МПа
2	22	0,12
3	24	0,14
4	26	0,16
5	28	0,18
6	30	2,00
7	22	2,22
8	24	2,24
9	26	2,26
10	28	2,28
11	30	0,12
12	22	0,14
13	24	0,16
14	26	0,18
15	28	2,00
16	30	2,22
17	22	2,24
18	24	2,26
19	26	2,28
20	28	0,12

9 Динамические насосы

Насосом называется гидравлическая машина, преобразующая механическую работу привода насоса в механическую энергию потока жидкости. По принципу действия насосы классифицируют на динамические и объемные.

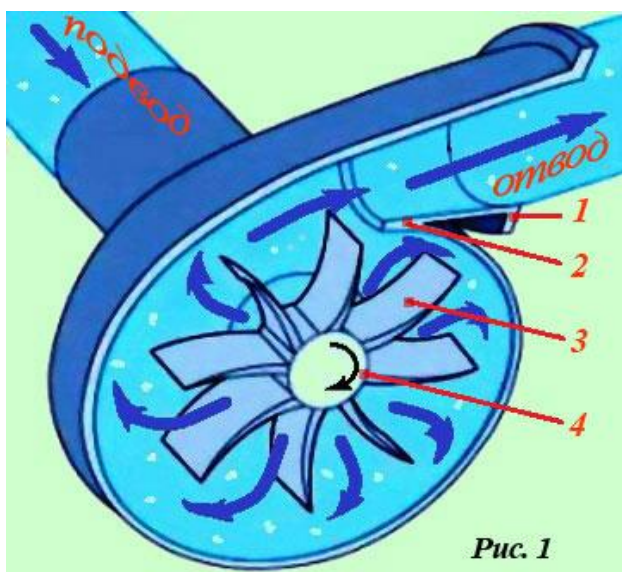
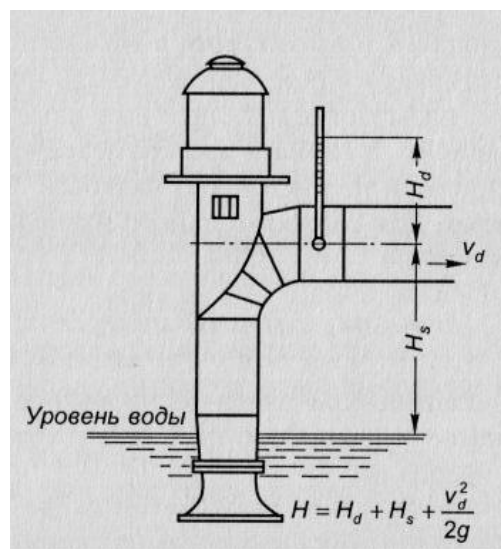
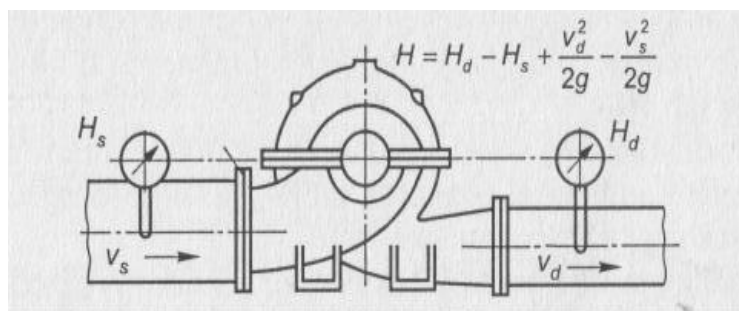


Рис. 1

Динамические насосы работают по принципу силового воздействия на жидкость. К ним относятся, например, центробежные насосы.

Жидкость, подводимая к рабочему колесу 4 по входному патрубку, приводится в движение лопатками 3, центробежной силой отбрасывается к стенкам корпуса 2 и вытесняется в отвод 1. В результате силового воздействия рабочего колеса жидкость выходит в отвод с

большей скоростью и давлением, чем в подводе.



К основным техническим характеристикам насоса относятся подача, напор и коэффициент полезного действия.

Подачей называется объем перекачиваемой за единицу времени жидкости. Подача обычно измеряется в м³/час или в л/с.

Напор насоса является разницей статического и скоростного напоров на выходе и входе насоса.

Для насосов горизонтального и вертикального исполнений напор определяется по формулам:

$$H = H_d - H_s + \frac{v_d^2}{2g} - \frac{v_s^2}{2g},$$

$$H = H_d + H_s + \frac{v_d^2}{2g}.$$

Здесь:

H_s и H_d – гидростатическое давление на входе и выходе насоса;

v_s и v_d – скорость потока жидкости на входе и выходе насоса.

Вакууметрическая высота всасывания, создаваемого насосом расходуется на подъем жидкости на высоту H_s , создание скоростного напора во всасывающей линии $\frac{v_s^2}{2g}$ и на преодоление потерь напора во всасывающей линии $h_{вс}$:

$$H_{\text{вак}} = H_s + \frac{v_s^2}{2g} + h_{\text{вс}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_1}{\gamma}.$$

Здесь:

$p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па;

p_1 – абсолютное давление жидкости на входе в насос, Па;

$\gamma = \rho g$ – удельный вес жидкости, Н\м³;

H_s – геометрическая высота всасывания, м;

v_s – скорость жидкости во входном патрубке насоса, м/с;

$h_{вс}$ – потери напора во входном патрубке насоса, м.

Полезная мощность насоса равна полному количеству энергии, сообщаемой насосом потоку жидкости, имеющему расход Q и напор H .

$$N = \rho g Q H.$$

где:

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения м²/с;

Q – подача насоса, м³/с;

H – напор насоса, м;

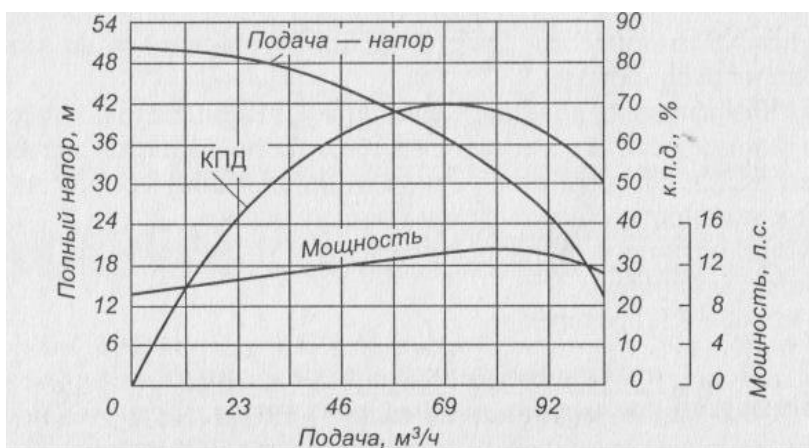
N – мощность на валу, Вт.

Коэффициент полезного действия η определяет степень гидравлического и механического совершенства насоса и равен отношению полезной мощности насоса к мощности, подведенной к валу насоса.

$$\eta = \frac{\text{полезная мощность насоса}}{\text{мощность, подведенная к валу насоса}} = \frac{\rho g Q H}{N},$$

С учётом коэффициента полезного действия мощность насоса равна:

$$N = \rho g Q H \eta.$$



Характеристикой насоса называется зависимость напора H , потребляемой мощности N и КПД насоса η от подачи Q . Для снятия характеристики насос включают в работу и дросселируют выход, уменьшая тем самым расход. Произведя серию замеров, получают

зависимости $H = f(Q)$, $N = f(Q)$ и $\eta = f(Q)$. Номинальным режимом работы насоса называют режим, при котором величина к.п.д. имеет максимальное значение. Для насоса, характеристики которого приведены на рисунке

номинальная подача равна 70 м³/час, номинальный напор – 42 м, номинальная мощность – 13 л.с.

Современные центробежные насосы нередко снабжаются приводными электродвигателями с частотным регулированием частоты вращения ротора. Изменение частоты вращения применяется для плавного регулирования напора и подачи. Для пересчета подачи, напора и мощности насоса при изменении частоты вращения ротора n применяют формулы:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} ;$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 ;$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 .$$

Таким образом, при изменении частоты вращения вала насоса изменение подачи насоса прямо пропорционально отношению частот вращения, изменение напора пропорционально квадрату отношения частот вращения, а изменение полезной мощности – кубу отношения частот вращения.

Пример 9.1

Определить геометрическую высоту всасывания центробежного насоса, если его подача $Q = 40$ л/с, диаметр всасывающего трубопровода $d = 200$ мм, потери напора во всасывающем трубопроводе $h_{\text{вс}} = 1,2$ м, а допустимая вакуумметрическая высота всасывания $H_{\text{вак}} = 4,8$ м.

Решение:

1. Приведем исходные данные к системе СИ:

$$Q = 0,040 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$d = 0,2 \text{ м};$$

$$h_{\text{вс}} = 1,2 \text{ м};$$

$$H_{\text{вак}} = 4,8 \text{ м}.$$

2. Вычислим скорость жидкости во всасывающем трубопроводе:

$$v_s = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,04}{3,14 \cdot 0,2^2} = 1,27 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

3. Найдем геометрическую величину всасывания:

Известно, что:

$$H_{\text{вак}} = H_s + \frac{v_s^2}{2g} + h_{\text{вс.}}$$

Отсюда:

$$H_s = H_{\text{вак}} - \frac{v_s^2}{2g} - h_{\text{вс}} = 4,8 + \frac{1,27^2}{2 \cdot 9,81} = 3,52 \text{ м.}$$

Ответ: Геометрическая высота всасывания насоса равна 3,52 м.

Пример 9.2

Центробежный насос при частоте вращения вала $n=2900$ об/мин и подаче $Q=60$ л/с потребляет мощность $N=100$ Вт. Определить напор насоса, если частоте вращения вала снизится до 960 об/мин.

Решение:

Напор насоса равен:

$$H_2 = H_1 \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 = 90 \left(\frac{960}{2900} \right)^2 = 9,9 \text{ м.}$$

Ответ: Напор насоса станет равным 9,9 м.

Задача 9.1

Определить полный напор горизонтального центробежного насоса, если его подача 15 л/с, диаметр всасывающего трубопровода $d_s=150$ мм, диаметр нагнетательного трубопровода $d_d=100$ мм, показания манометра на выходе насоса $H_d=42$ м, показания вакуумметра на входе насоса равны $H_s=5$ м, всасывающий и напорный трубопровод располагаются на одной высоте.

Варианты заданий:

Номер варианта	Подача, л/с	d_s , мм	d_d , мм
2	16	155	110
3	17	160	120
4	18	170	130
5	19	155	110
6	20	160	120
7	21	170	130
8	22	155	110
9	16	160	120
10	17	170	130
11	18	155	110
12	19	160	120
13	20	170	130
14	21	155	110
15	22	160	120
16	16	170	130
17	17	155	110

18	18	160	120
19	19	170	130
20	20	155	110

Задача 9.2

Центробежный насос развивает напор $H=50$ м, подачу $Q=50$ л/с и мощность $N=100$ Вт при частоте вращения вала 1460 об/мин. Рассчитать параметры насоса H , Q и N при изменении частоты вращения до 3200 об/мин.

Варианты заданий

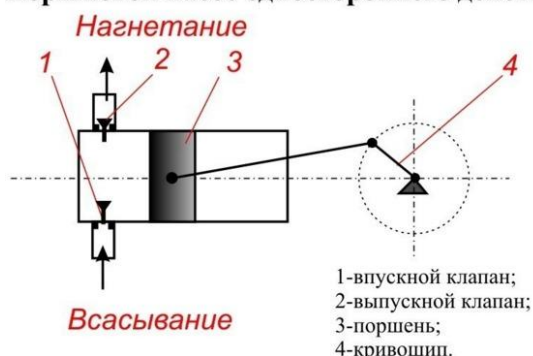
Номер варианта	Частота вращения, об/мин
2	3100
3	3000
4	2900
5	2800
6	2700
7	2600
8	2500
9	2400
10	2300
11	2200
12	2100
13	2000
14	1900
15	1800
16	1700
17	1600
18	1500
19	1300
20	1200

10 Объемные насосы

Объемные насосы работают по принципу вытеснения. За один рабочий ход насос вытесняет количество жидкости, определяемое его геометрическими размерами. Этот объем называется объемной постоянной насоса. Давление перемещаемой жидкости повышается в результате сжатия.

К объемным насосам относятся насосы возвратно-поступательного действия (например, поршневой) и роторные (например, шестеренный).

Поршневой насос одностороннего действия



Поршневой насос одностороннего действия состоит из цилиндра, в котором располагается поршень 3 приводящийся в движение кривошипом 4. Насос содержит также впускной 1 и выпускной 2 клапаны. Вращательное движение кривошипа

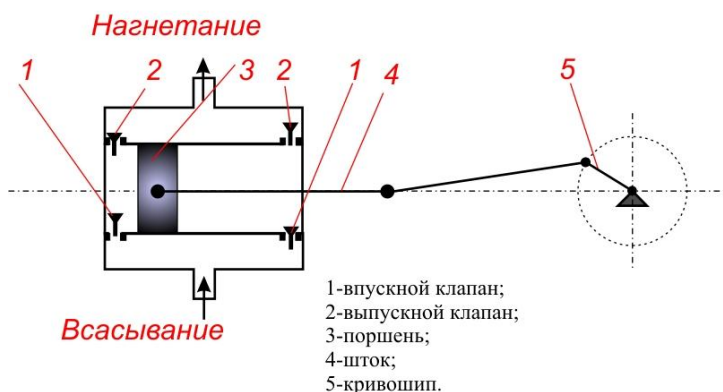
преобразуется в возвратно-поступательное движение поршня.

При вращении кривошипа по часовой стрелке поршень перемещается вправо и в пространстве над поршнем создается разрежение, благодаря которому впускной клапан открывается, выпускной клапан закрывается, и цилиндр через впускной клапан из всасывающего трубопровода заполняется жидкостью. По достижении крайнего правого положения цилиндр оказывается заполненным жидкостью полностью. При дальнейшем вращении кривошипа поршень меняет направление движения и перемещается влево, сжимая жидкость над собой. Силой давления жидкости впускной клапан закрывается, выпускной клапан открывается и жидкость из пространства над поршнем вытесняется в напорный трубопровод. За один оборот кривошипа насос перекачивает из всасывающего трубопровода в напорный объем жидкости, равный произведению площади поршня $\frac{\pi d^2}{4}$ на полный ход поршня S . (Ход поршня равен удвоенному радиусу кривошипа $S=2R$).

$$V_n = \frac{\pi d^2}{4} S.$$

Этот объем называется объемной постоянной насоса.

Поршневой насос двустороннего действия



Объемную постоянную поршневого насоса можно увеличить, применяя насос двустороннего действия. Этот насос перемещает жидкость из всасывающего трубопровода в напорный как при ходе поршня вправо, так и при ходе поршня влево. Объемная постоянная насоса

двустороннего действия будет практически вдвое выше, чем одностороннего:

$$V_n = 2 \frac{\pi d^2}{4} S - V_{ш} \text{ или } = \frac{\pi(2d^2 - d_{ш}^2)}{4} S.$$

Где $V_{ш}$ – объем, занимаемый внутри цилиндра штоком;

$d_{ш}$ – диаметр штока.

Объемная постоянная поршневых насосов может быть также увеличена числом поршней.

Зная частоту вращения шатуна n , можно определить подачу насоса в единицу времени. Например, для одноцилиндрового насоса одностороннего действия подача насоса равна:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} S \cdot n.$$

Потребляемая мощность насоса равна мощности потока жидкости на выходе насоса, деленной на коэффициент полезного действия.

$$N_{\pi} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot h}{\eta}.$$

Пример 10.1

Определить минутную подачу одноцилиндрового поршневого насоса одностороннего действия (л/мин), если известны: диаметр цилиндра $d=2$ см, радиус кривошипа $R=2$ см, частота вращения кривошипа $n=1400$ об/мин.

Решение:

Минутная подача насоса:

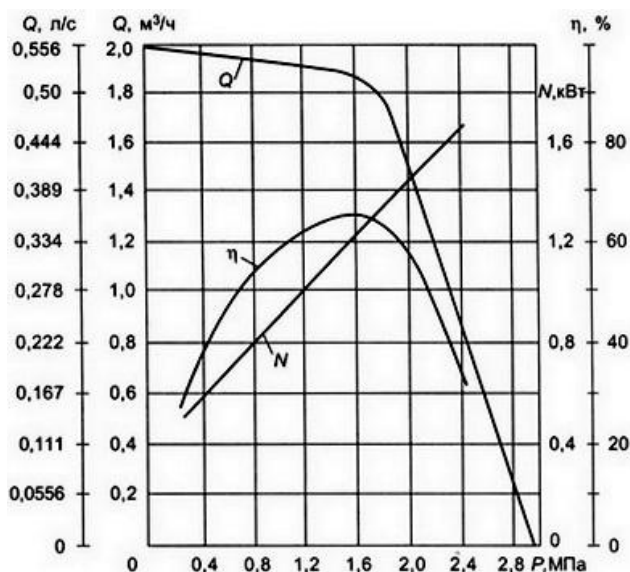
$$Q = \frac{\pi d^2}{4} S \cdot n = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} 2 \cdot 2 \cdot 1400 = 17584 \frac{\text{см}^3}{\text{мин}} = 17,584 \frac{\text{л}}{\text{мин}}.$$

Ответ: минутная подача насоса 17,584 л/мин.

Пример 10.2

По приведенной здесь графической характеристике поршневого насоса определить, какова будет потребляемая им мощность и полный КПД, если подача равна 0,52 л/с. Какое давление в системе при этом насос развивает?

Решение: При подаче $Q = 0,52$ л/с насос потребляет мощность примерно равную 1,2 кВт, его КПД составляет 0,65 (максимальное значение). Давление при этом равно 1,6 МПа.



Задача 10.1

Определить объемную подачу двухцилиндрового поршневого насоса одностороннего действия, если диаметр его поршней $d = 100$ мм, рабочий ход поршней $S = 100$ мм, частота вращения вала приводного электродвигателя $n = 960$ мин⁻¹.

Варианты заданий:

Номер варианта	Диаметр поршня d, мм	Ход поршня S, мм	Частота вращения n, об/мин
2	120	50	960
3	130	60	1200
4	140	70	1420
5	150	80	2200
6	160	90	960
7	170	100	1200
8	120	50	1420
9	130	60	2200
10	140	70	960
11	150	80	1200
12	160	90	1420
13	170	100	2200
14	120	50	960
15	130	60	1200
16	140	70	1420
17	150	80	2200
18	160	90	960
19	170	100	1200
20	120	50	1420

Задача 10.2

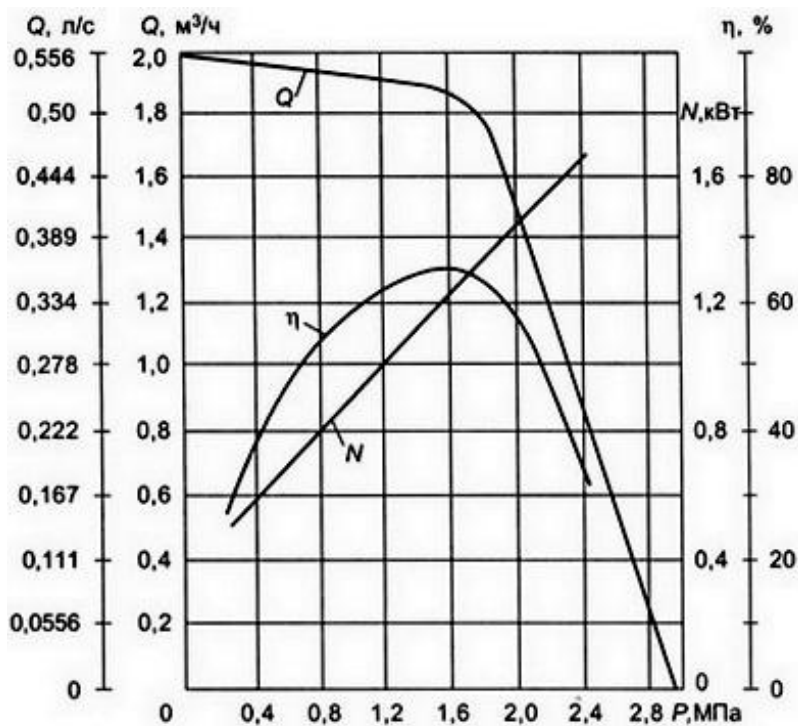
Определить, какую мощность должен иметь электродвигатель привода водяного насоса, если насос при подаче $Q = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ создает напор $H = 40 \text{ м}$, а его полный КПД $\eta = 0,6$. Плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Варианты заданий:

Номер варианта	Подача, $\text{м}^3/\text{с}$	Напор, м	η
2	0,01	50	0,4
3	0,02	60	0,5
4	0,03	70	0,7
5	0,04	80	0,8
6	0,01	80	0,4
7	0,02	70	0,5
8	0,03	60	0,7
9	0,04	50	0,8
10	0,01	50	0,4
11	0,02	60	0,5
12	0,03	70	0,7
13	0,04	80	0,8
14	0,01	80	0,4
15	0,02	70	0,5
16	0,03	60	0,7
17	0,04	50	0,8
18	0,01	50	0,4
19	0,02	60	0,5
20	0,03	70	0,7

Задача 10.3

По приведенной здесь графической характеристике поршневого насоса определить значение параметра насоса, указанного в задании.



Номер варианта	Определяемый параметр
1	Номинальный расход
2	Номинальная мощность
3	Номинальное давление
4	Номинальное давление
5	Номинальный расход
6	Номинальная мощность
7	Номинальное давление
8	Номинальный расход
9	Номинальная мощность
10	Номинальное давление
11	Номинальный расход
12	Номинальная мощность
13	Номинальное давление
14	Номинальный расход
15	Номинальная мощность
16	Номинальное давление
17	Номинальный расход
18	Номинальная мощность
19	Номинальное давление
20	Номинальный расход

Литература:

О.Н.Брюханов, А.Т.Мелик-Аракелян, В.И.Коробко. Основы гидравлики и теплотехники. 2-е издание. Москва. 2006

А.Б.Лепешкин, А.А.Михайлин Гидравлические и пневматические системы. Москва, 2005