9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра инфраструктурных энергетических систем

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
________________ О.Г. Локтионова
«_21_» ____03____ 2024 г.

Механика жидкости и газа с примерами решения задач

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Механика жидкости и газа» для студентов очной и очно-заочной форм обучения по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений»

Курск 2024

УДК 532.1; 532.2; 532.5

Составители: Т.В. Поливанова, Н.С. Перепелица

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент кафедры инфраструктурных энергетических систем Е.В. Умеренков

Механика жидкости и газа с примерами решения задач: методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Механика жидкости и газа» для студентов очной и очно-заочной форм обучения по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Т.В. Поливанова, Н.С. Перепелица. – Курск, 2024. – 68 с.: – Библиогр.: с. 68.

Изложены основные сведения, необходимые для проведения практических занятий по темам дисциплины «Механика жидкости и газа»: жидкости и их физические свойства, гидростатика, кинематика жидкости, динамика жидкости, режимы движения жидкости, потери напора, истечение жидкости, гидравлический расчет трубопроводов, основы гидропневмопривода.

Методические указания предназначены для студентов очной и очно-заочной форм обучения по направлениям подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60х84 1/16.
Усл.печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 3,58. Тираж 100 экз. Заказ . Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

Введение

Механика жидкости и газа – это дисциплина, изучающая законы равновесия и движения жидкостей, а также законы взаимодействия жидкостей с окружающими их граничными поверхностями и с твердыми или упругими телами, погруженными (частично или полностью) в жидкость.

Цель дисциплины – научить студентов использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и математического (компьютерного) моделирования теоретического и экспериментального исследования в области механики жидкости и газа, для усвоения профилирующих дисциплин направления подготовки, развития навыков практического использования гидравлических закономерностей при решении конкретных задач в области строительства.

В ходе изучения дисциплины у студентов должны сформироваться знания в области основных свойств жидкостей и газов, гидростатики, гидродинамики жидкости, режимов движения жидкости, потерь напора жидкости.

Основными видами аудиторной работы студента при изучении дисциплины «Механика жидкости и газа» являются лекции и практические занятия.

На лекциях излагаются и разъясняются основные понятия изучаемой темы, связанные с ней теоретические и практические проблемы, даются рекомендации для самостоятельной работы.

Изучение наиболее важных тем или разделов дисциплины завершают практические занятия, которые обеспечивают контроль подготовленности студента, закрепление учебного материала, приобретение опыта устных публичных выступлений, ведения дискуссии, в том числе аргументации и защиты выдвигаемых положений и тезисов.

Практическому занятию предшествует самостоятельная работа студента, связанная с освоением материала, полученного на лекциях, и материалов, изложенных в учебниках и учебных пособиях, а также литературе, рекомендованной преподавателем.

Качество учебной работы студентов преподаватель оценивает по результатам тестирования, собеседования, а также по результатам докладов, подготовленных студентами.

Данные методические указания предназначены для практических занятий, закрепления изученного материала и подготовке к промежуточному контролю знаний по изучаемой дисциплине.

1. Практическое занятие №1. Жидкости и их физические свойства

1.1 Жидкости

Все вещества в природе имеют молекулярное строение. По характеру молекулярных движений, а также по числовым значениям межмолекулярных сил жидкости занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами.

Молекулы жидкости находятся в непрерывном хаотичном тепловом движении, осуществляющемся в виде колебаний (10^{13} колебаний в секунду) относительно мгновенных центров и скачкообразных переходов от одного центра к другому. Тепловое движение молекул твердых тел – колебания относительно стабильных центров, тепловое движение молекул газа – непрерывные скачкообразные перемены мест.

Жидкими телами или жидкостями называют физические тела, легко изменяющие свою форму под действием самой незначительной по величине силы. Можно сказать, что жидкость – это физическое тело, обладающее текучестью, имеющее определенный объем и заполняющая часть пространства (сосуда), равного ее объему.

Различают два вида жидкостей:

- жидкости капельные (малосжимаемые);
- жидкости газообразные (сжимаемые).

Капельные жидкости отличаются большим сопротивлением сжатию и малым сопротивлением растягивающим и касательным усилиям, обусловленным незначительностью сил сцепления и сил трения между частицами жидкости. К капельным жидкостям относятся вода, нефть, керосин, бензин, ртуть и т.п.

Газообразные жидкости (газы) обладают большой сжимаемостью, не оказывают сопротивления ни растягивающим, ни касательным усилиям и имеют малую вязкость.

1.2 Плотность жидкости

Важнейшими характеристиками механических свойств жидкости являются ее плотность и удельный вес. Они определяют «весомость» жидкости.

Плотность ρ характеризует распределение массы Δm жидкости по объему ΔW. В произвольной точке a жидкости плотность распределения массы равна:

$$p_a = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta W}, \qquad (1.1)$$

где Δm –масса (кг), заключенная в объеме ΔW (м^3), стягиваемом в точку а.

Плотность однородной жидкости равна отношению массы m жидкости к ее объему:

$$p = \frac{m}{W} \qquad (1.2)$$

Плотность ρ во всех точках однородной жидкости одинакова. В общем случае плотность может изменяться в объеме жидкости от точки к точке и в каждой точке объема с течением времени. За единицу плотности в системе СИ принят 1 кг/м^3.

Вместо плотности в формулах может быть использован также удельный вес γ (Н/м^3), то есть вес жидкости G, приходящийся на единицу объема W:

$$\gamma = \frac{G}{W} = \frac{mg}{W} = \rho g \qquad (1.3)$$

1.3 Физические свойства жидкостей

Сжимаемость – это свойство жидкостей изменять объем при изменении давления. Характеризуется коэффициентом объемного сжатия (коэффициентом сжимаемости) β_p (Па$^{-1}$), представляющим собой относительное изменение объема жидкости W при изменении давления на единицу:

$$\beta_p = -\frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{d\text{p}}, \qquad (1.4)$$

где W – первоначальный объем жидкости (м^3);
dW – относительное изменение объема жидкости (м^3) при изменении давления на величину dp (Па).

Изменение плотности при изменении давления учитывается по следующей формуле:

$$\rho \approx \frac{\rho_1}{1 - \beta_p \, dp}, \qquad (1.5)$$

где ρ и ρ_1 – плотность жидкости (кг/м^3) при давлении p и p_1 соответственно;

dp –перепад давлений, Па ($dp = p - p_1$).

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия – модуль объемной упругости жидкости E_o, (Па):

$$E_0 = \frac{1}{\beta_p}. \qquad (1.6)$$

Температурное расширение – это свойство жидкостей изменять объем при изменении температуры; характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения β_t (1/°С), представляющим собой относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на единицу (1ºС) и при постоянном давлении:

$$\beta_t = \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dt}, \qquad (1.7)$$

где dW – относительное изменение объема жидкости при повышении температуры на dt.

В ряде случаев при больших перепадах температуры приходится учитывать изменение плотности жидкости:

$$\rho \approx \frac{\rho_1}{1 + \beta_t \, dt}, \qquad (1.8)$$

где ρ и ρ_1 – плотности при температурах t и t_1 ($\Delta t = t - t_1$).

Вязкость – это свойство жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу ее слоев.

Вязкость проявляется в том, что при относительном перемещении слоев жидкости на поверхностях их соприкосновения возникают силы сопротивления сдвигу, называемые силами внутреннего трения или силами вязкости. Благодаря этим силам слой жидкости, движущийся медленнее, «тормозит» соседний слой, движущийся быстрее. Силы внутреннего трения проявляются вследствие наличия межмолекулярных связей между движущимися слоями.

Растворение газов. Все жидкости в той или иной мере поглощают и растворяют газы. Относительное количество газа, которое может раствориться в жидкости до ее насыщения, прямо пропорционально давлению на поверхности раздела.

Объем растворенного газа вычисляется по формуле:

$$W_г = k_г W_ж \frac{p}{p_o}, \tag{1.9}$$

где $W_г$ – объем растворенного газа, отнесенный к нормальным условиям ($p_о$, $t_о$);

$W_ж$ – объем жидкости, м^3;

p – давление жидкости, Па;

$p_о$ – эталонное давление (например, атмосферное), Па;

$k_г$ – коэффициент растворимости газа в жидкости (объем газа, растворяющегося при атмосферном давлении в единице объема жидкости).

Испарение – это свойство капельной жидкости изменять свое агрегатное состояние, в частности превращаться в пар.

Интенсивность испарения (парообразования), происходящего на свободной поверхности жидкости, зависит от рода самой жидкости и условий, в которых она находится. Одним из показателей, характеризующих испаряемость жидкости, является температура ее кипения при нормальном атмосферном давлении – чем выше температура кипения, тем меньше испаряемость.

Кипение – это процесс перехода жидкости в газообразное состояние, происходящий внутри жидкости. Температура кипения с повышением давления на ее поверхности увеличивается.

Поверхностное натяжение. Является специфическим свойством жидкостей и связано с ее молекулярной структурой. В результате притяжения между молекулами жидкости возникают силы сцепления. Внутри жидкости эти силы уравновешиваются, однако находящиеся на границе раздела поверхности жидкости с газом, твердым телом или двумя несмешиваемыми жидкостями молекулы жидкости испытывают неуравновешенное извне воздействие (отсутствие притяжения со стороны молекул газа). Поэтому появляется сила, направленная внутрь объема жидкости, называемая силой молекулярного давления. Эта сила стремится придать объему жидкости форму с наименьшей поверхностью.

1.4 Примеры решения задач

Задача №1. Сосуд заполнен водой, занимающей объем W_1= 2 м^3. На сколько уменьшится и чему будет равен этот объем при увеличении давления на величину 200 бар при температуре 20ºС? Модуль объемной упругости для воды при данной температуре E_o = 2110 МПа.

Изменение объема жидкости определим из уравнения:

$$\Delta W = -\beta_p \cdot W \cdot \Delta \mathrm{p}$$

Коэффициент объемного сжатия определим из уравнения:

$$\beta_\mathrm{p} = \frac{1}{\mathrm{E_o}} = \frac{1}{2110 \cdot 10^6} = 4{,}74 \times 10^{-10}\,\frac{1}{\text{Па}}$$

Увеличение давления:

$$\Delta p = 200 \text{ бар} = 200 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Тогда изменение объема жидкости:

$$\Delta W = 4{,}74 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 200 \cdot 10^5 = 0{,}019 \text{ м}^3.$$

Искомый объем будет равен:

$$W_2 = W_1 - \Delta W = 2 - 0{,}019 = 1{,}981 \text{ м}^3.$$

Задача №2. Плотность масла АМГ-10 при температуре 20 ºС составляет 850 кг/м^3. Определить плотность масла при повышении температуры до 60 ºС и увеличении давления с атмосферного (p_1=0,1 МПа) до p_2=8,7 МПа. Модуль объемной упругости масла E_o =1305 МПа, температурный коэффициент β_t = 0,0008 1/^{0}С.

Плотность масла при повышении температуры до значения t = 60 ºС вычислим по формуле:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + \beta_t\ \Delta t} = \frac{850}{1 + 0{,}0008 \cdot (60 - 20)} = 823{,}6\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

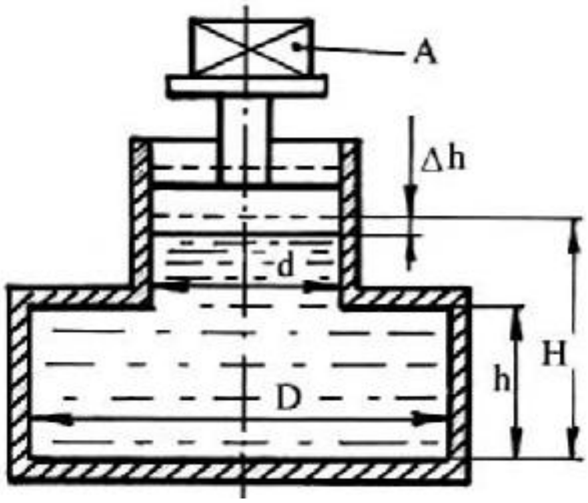
Плотность масла при повышении давления до значения p_2 = 8,7

МПа вычисляем по формулам:

$$\rho_3 = \frac{\rho_1}{1 - \beta_p \, dp} = \frac{\rho_1}{1 - (p_2 - p_1)/E_o}$$

$$\rho_3 = \frac{823{,}6}{1 - \dfrac{(8{,}7 - 0{,}1) \cdot 10^6}{1305 \cdot 10^6}} = 829{,}1 \, \frac{кг}{м^3}.$$

Задача №3. Определить объемный модуль упругости жидкости, если под действием груза А массой 250 кг поршень прошел расстояние Δh = 5 мм. Начальная высота положения поршня (без груза) H = 1,5 м; диаметр поршня d = 80 мм и резервуара D = 300 мм; высота резервуара h = 1,3 м. Весом поршня пренебречь. Резервуар считать абсолютно жестким.



Сила тяжести, создаваемая грузом А, будет равна:

F= mg = 250·9,8=2450 Н.

Давление, создаваемое этой силой (т.е. приращение давления d*p*), определим как:

$$dp = \frac{F}{S_n} = \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 2450}{3{,}14 \cdot 0{,}08^2} = 488 \text{ кПа}.$$

Первоначальный объем W жидкости равен:

$$W = S_1 h + S_2 (H - h) = \frac{\pi D^2}{4} h + \frac{\pi d^2}{4} (H - h)$$

$$W = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}3^2}{4} \cdot 1{,}3 + \frac{3{,}14 \cdot 0{,}08^2}{4} (1{,}5 - 1{,}3) = 0{,}093 м^3.$$

Изменение объема равно:

$$\mathrm{d}W = S_2 \Delta h = \frac{\pi d^2}{4} \Delta h$$

$$\mathrm{d}W = S_2 \Delta h = \frac{\pi d^2}{4} \Delta h = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}08^2}{4} \cdot 0{,}005 = 2{,}5 \cdot 10^{-5}\ \text{м}^3.$$

Модуль объемной упругости определим по формуле:

$$\mathrm{E_o} = W \frac{\mathrm{dp}}{\mathrm{d}W} = 0{,}093 \cdot \frac{488 \cdot 10^3}{2{,}5 \cdot 10^{-5}} = 18{,}23 \cdot 10^8 = 1815\ \text{МПа}.$$

Задача №4. Канистра, заполненная бензином и не содержащая воздуха, нагрелась на солнце до температуры 50 ºС. На сколько повысилось бы давление бензина внутри канистры, если бы она была абсолютно жесткой? Начальная температура бензина 20 ºС. Модуль объемной упругости бензина принять равным E_o = 1300 МПа, коэффициент температурного расширения $\beta_t = 8 \cdot 10^{-4}$ 1/град.

Из уравнения находим относительное изменение объема бензина при увеличении температуры Δt на 30 ºС ($\Delta t = t_2 - t_1 = 30$ ºС):

$$\frac{\Delta W}{W} = \beta_t \Delta t = 8 \cdot 10 - 4 \cdot 30 = 0{,}024.$$

Из уравнения находим изменение давления Δp при увеличении температуры Δt на 30 ºС:

$$\Delta \mathrm{p} = \frac{\Delta W}{W} \cdot \frac{1}{\beta_p} = \frac{\Delta W}{W} \cdot E_0 = 0{,}024 \cdot 1300 \cdot 10^6 = 31{,}2\ \text{МПа}.$$

1.5 Контрольные вопросы

1. В чем заключается гипотеза сплошности жидкости?
2. Что такое плотность жидкости, от чего она зависит?
3. Какие силы относятся к массовым и поверхностным? Какие виды напряжений действуют в жидкости?
4. В чем состоит физический смысл объемного модуля упругости?
5. Что такое вязкость жидкости?
6. Какова связь кинематической и динамической вязкости?

7. Поясните природу неньютоновских жидкостей.
8. Какие причины вызывают кавитацию?
9. Что такое «холодное» кипение?
10. Какова природа явления поверхностного натяжения?

2. Практическое занятие №2. Гидростатика

2.1 Гидростатическое давление и его свойства

Гидростатикой называется раздел гидравлики, в котором изучаются законы равновесия жидкостей и рассматриваются практические приложения этих законов.

Рассмотрим некоторый объем жидкости массой M, находящийся в состоянии относительного покоя (рис. 2.1).

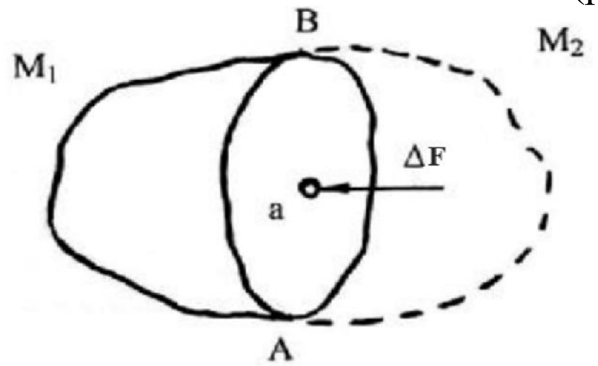


Рис. 2.1 – Схема для определения гидростатического давления

Рассечем объем, занимаемый жидкостью, произвольной плоскостью AB на две части, содержащие соответственно массы M_1 и M_2, и отбросим одну из них (например, правую). Чтобы сохранить равновесие оставшейся в левой части массы жидкости M_1, необходимо приложить силу, эквивалентную действию отброшенной массы M_2. Эта сила ΔF (Н) будет равномерно распределена по площади сечения ΔS (м^2). Тогда отношение

$$p_{ср} = \frac{\Delta F}{\Delta S} \qquad (2.1)$$

представляющее собой среднюю силу, действующую на единицу площади ΔS, будет называться средним гидростатическим давлением.

2.2 Основное уравнение гидростатики

Рассмотрим случай равновесия жидкости, когда на нее действует лишь одна массовая сила – сила тяжести, и получим уравнение, позволяющее находить гидростатическое давление в любой точке рассматриваемого объема жидкости.

Пусть на свободную поверхность жидкости, находящуюся в сосуде, действует давление p_o (рис.2.2).

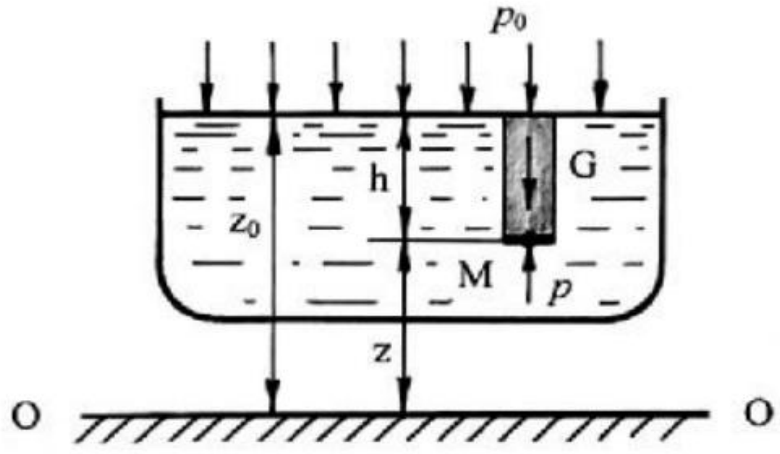


Рис 2.2 – Схема для вывода основного уравнения гидростатики

Определим давление p в произвольно выбранной точке M, которая находится на глубине h. Выделим около точки M элементарную (бесконечно малую) площадку dS, и построим на ней до свободной поверхности вертикальный цилиндрический объем высотой h. Вес жидкости в указанном объеме равен:

$$G = Mg = \rho \cdot g \cdot h \cdot dS \tag{2.2}$$

Давление жидкости p на нижнее основание цилиндра будет направлено по нормали вверх. Запишем сумму сил, действующих на выделенный объем в проекции на вертикальную ось:

$$pdS - p_0 dS - \rho ghdS = 0 \tag{2.3}$$

После сокращения выражения на dS и перегруппировки членов получим:

$$p = p_o + \rho gh = p_o + \gamma h \tag{2.4}$$

Полученное уравнение называют основным уравнением гидростатики, оно позволяет подсчитать давление в любой точке внутри покоящейся жидкости.

Из уравнения (2.4) видно, что давление p_o, действующее на свободной поверхности жидкости, будет передаваться в любую точку внутри жидкости по всем направлениям одинаково (последнее утверждение вытекает из свойства гидростатического давления). Это позволяет сформулировать закон Паскаля: давление, приложенное к жидкости, передается по всем направлениям без изменения.

Величину ρhg называют весовым давлением, т.к. она равна весу столба жидкости при единичной площади и высоте h.

Основное уравнение гидростатики для двух точек одного и того же объема покоящейся жидкости, находящихся на уровне z_0 и z, определяется по формуле:

$$z_o + \frac{p_o}{\rho g} = z + \frac{p}{\rho g} \tag{2.5}$$

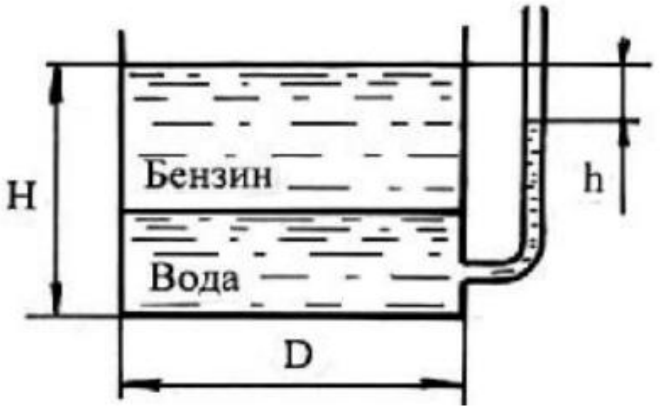
Поскольку точка М взята произвольно, то можно утверждать, что для всего рассматриваемого неподвижного объема жидкости:

$$z + \frac{p}{\rho g} = const \tag{2.6}$$

Таким образом, по формуле (2.4) в покоящейся жидкости в точке, находящейся на глубине h под свободной поверхностью, давление равно сумме внешнего давления $p_о$ и весового давления ρhg.

2.3 Примеры решения задач

Задача №1. В цилиндрический бак диаметром 1 м до уровня H = 1,5 м налиты вода и бензин. Уровень воды в пьезометре ниже уровня бензина на h = 300 мм. Определить вес находящегося в баке бензина, если $\rho_б$= 750 кг/м^3, плотность воды $\rho_в$ =1000 кг/м^3.



Весовое (избыточное) давление воды и бензина в баке будет равно весовому давлению воды в пьезометре:

$$\rho_в g h_в + \rho_б g h_б = \rho_в g\ (H - h).$$

Поскольку в этом уравнении есть два неизвестных, выразим $h_в = H - h_б$, и подставим:

$$\rho_в g\ (H - h_б) + \rho_б g h_б = \rho_в g\ (H - h).$$

После сокращения получим:

$$h_б\ (\rho_в - \rho_б) = \rho_в h.$$

Высота бензина в баке:

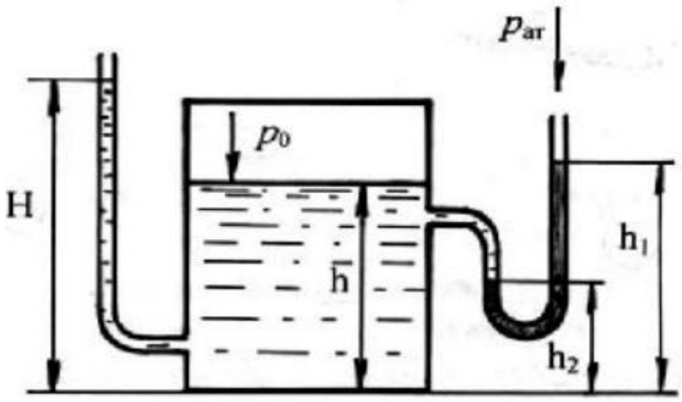
$$h_б = \frac{\rho_в h}{\rho_в - p_б} = \frac{1000 \times 0{,}3}{1000 - 750} = 1{,}2 \text{ м}$$

Вес находящегося в баке бензина:

$$G = Mg = \rho_б \cdot g \cdot S \cdot h_б = \rho б \cdot g \cdot \pi \cdot D^2/4 \cdot h_б$$

$$G = 750 \cdot 9{,}8 \cdot 3{,}14 \cdot 1^2 \cdot 1{,}2/4 = 6{,}92 \text{ кН}.$$

Задача №2. Определить давление $p_о$ воздуха в напорном баке по показанию ртутного манометра. Какой высоты H должен быть пьезометр для измерения того же давления $p_о$? Высоты h=2,6 м; h_1=1,8 м; h_2=0,6 м. Плотность ртути $\rho_{рт}$= 13600 кг/м^3, воды $\rho_в$= 1000 кг/м^3, атмосферное давление $p_{ат}$=110 кПа.



Абсолютное давление в баке на уровне высоты h_2 будет равно абсолютному давлению в ртутном манометре на том же уровне:

$$p_а = p_о + \rho_в g\ (h - h_2) = p_{ат} + \rho_{рт} g\ (h_1 - h_2)$$

$$p_о = p_{ат} + \rho_{рт} g\ (h_1 - h_2) - \rho_в g\ (h - h_2)$$

$$p_о = 110000 + 13600 \cdot 9{,}8 \cdot (1{,}8\text{-}0{,}6) - 1000 \cdot 9{,}8 \cdot (2{,}6\text{-}0{,}6) = 250{,}336 \text{ кПа}.$$

Для нахождения высоты H рассуждения аналогичны:

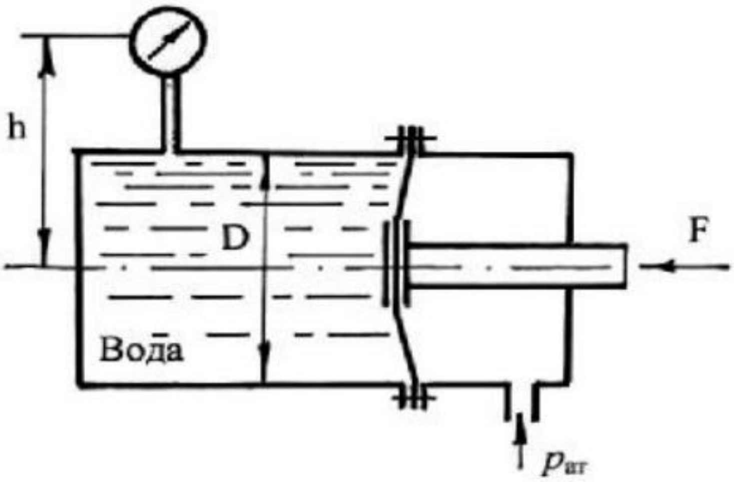
$$p_{ат} + \rho_в g H = p_о + \rho_в g h,$$

откуда:

$$H = \frac{p_0 + \rho_в g h - p_{ат}}{\rho_в g}$$

$$H = \frac{250336 + 1000 \cdot 9{,}8 \cdot 2{,}6 - 110\ 000}{1000 \cdot 9{,}8} = 16{,}92 \text{ м.}$$

Задача №3. Определить силу F, действующую на шток гибкой диафрагмы, если ее диаметр D = 150 мм, показания вакуумметра $p_{вак}$ = 0,05 МПа, высота h = 1,2 м. Площадью штока пренебречь. Найти абсолютное давление в левой полости, если $h_а$ = 740 мм. рт. ст. Плотность воды $\rho_в$= 1000 кг/м^3.



Действующее на шток диафрагмы давление вакуума определяется по показанию вакуумметра с учетом высоты столба воды h:

$$p_{вак.д.} = \rho_в g h - p_{вак} = 1000 \cdot 9{,}8 \cdot 1{,}2 - 50000 = -38240 \text{ Па.}$$

Знак «–» указывает на то, что давление в левой полости гидроцилиндра по оси штока ниже атмосферного (давление вакуума).

Атмосферное давление составляет:

$$p_{ат} = h_а \cdot 133{,}3 = 740 \cdot 133{,}3 = 98642 \text{ Па.}$$

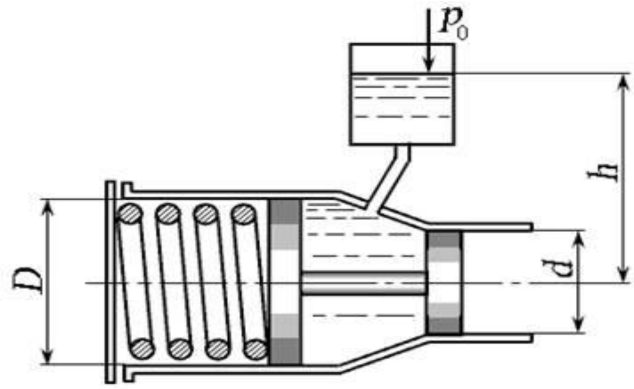
Абсолютное давление в левой полости (давление с учетом атмосферного давления):

$$p_{аб} = p_{ат} - |p_{вак.д}| = 98642 - 38240 = 60402 \text{ Па}.$$

Сила, действующая на шток диафрагмы, равна:

$$F = |p_{вак.д}| \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 38240 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}15^2}{4} = 0{,}675 \text{ кН}.$$

Задача №4. Система из двух поршней, соединенных штоком, находится в равновесии. Определить силу, сжимающую пружину. Жидкость, находящаяся между поршнями и в бачке – масло с плотностью ρ = 850 кг/м^3. Диаметры D =80 мм; d = 30 мм; высота h = 1000 мм; избыточное давление p_0 = 12 кПа.



Избыточное давление, действующее на кольцевую поверхность поршней, будет равно:

$$p_{изб} = p_0 + \rho gh = 12000 + 850 \cdot 9{,}8 \cdot 1 = 20{,}33 \text{ кПа}.$$

Силы, действующие на кольцевые площади поршней с диаметрами D =80 мм и d = 30 мм, будут равны:

$$F_1 = p_{изб} \frac{\pi}{4} (D^2 - d_ш^2).$$

$$F_1 = p_{изб} \frac{\pi}{4} (d^2 - d_ш^2).$$

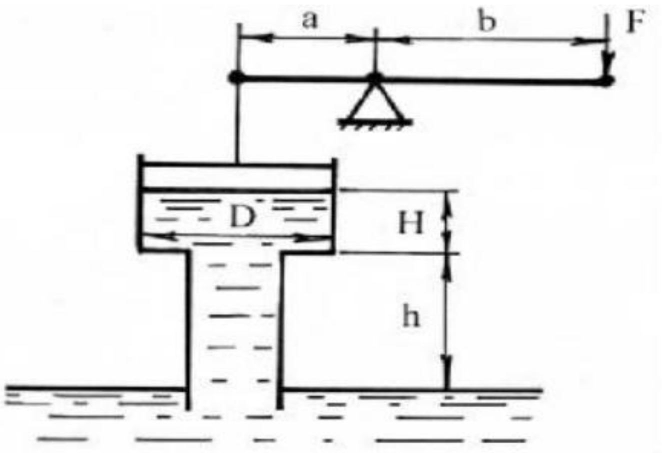
где $d_ш$ - диаметр штока, м.

Сила, сжимающая пружину, будет равна:

$$F = F_1 - F_2 = p_{изб} \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

$$F = 20330 \cdot \frac{3{,}14}{4} \cdot (0{,}08^2 - 0{,}03^2) = 87{,}77 \text{ Н}.$$

Задача №5. Определить силу F, необходимую для удержания в равновесии поршня, если труба под поршнем заполнена водой, а размеры трубы: D =100 мм; H = 0,7 м; h = 3 м. Длины рычага: a = 0,4 м и b =1,3 м. Собственным весом поршня пренебречь. Плотность воды $\rho_в$=1000 кг/м^3.



Логично предположить, что сила F, необходимая для удержания поршня в равновесии, должна соответствовать давлению под ним, то есть весовому давлению столба жидкости:

$$p = \rho_в g\,(H + h) = 1000 \cdot 9{,}8 \cdot (0{,}7 + 3) = 36{,}26 \text{ кПа}.$$

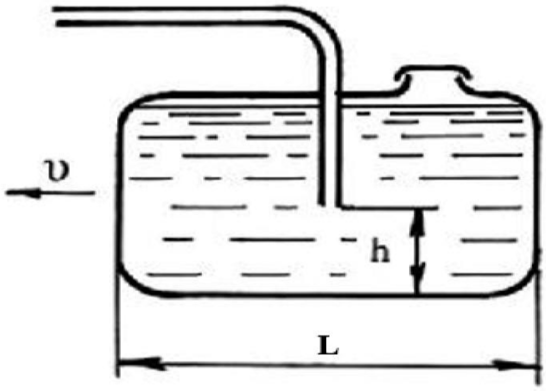
Условие равновесия в соответствии с длинами плеч рычага:

$$F \cdot a = p \cdot S \cdot b$$

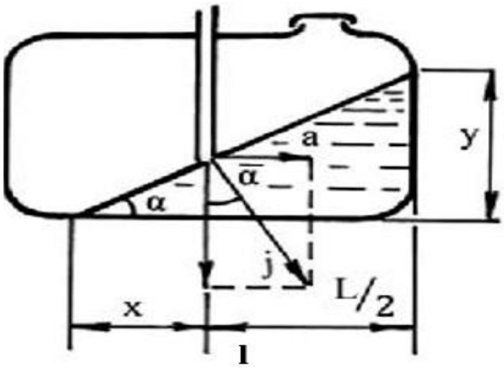
Тогда сила F в соответствии с длинами плеч рычага равна:

$$F = \frac{a}{b} p \frac{\pi D^2}{4} = \frac{0{,}4}{1{,}3} \cdot 36260 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}1^2}{4} = 87{,}58 \text{ Н}.$$

Задача №6. Топливный бак автомобиля длиной L = 0,8 м, шириной b = 0,5 м и высотой H = 0,2 м движется с ускорением a = 3,27 м/с^2. Определить минимальное количество топлива в баке, обеспечивающее его подачу без подсоса воздуха. Считать, что бензопровод установлен в центре горизонтальной проекции бака, его диаметр мал по сравнению с длиной бака, высота h = 10 мм.



Изобразим положение бензина в баке с минимальным объемом.



Обозначим стороны прямоугольного треугольника как ℓ и y. Тогда:

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{a}{g} = \frac{3{,}27}{9{,}8} = 0{,}33367.$$

$$x = \frac{h}{\mathrm{tg}\,\alpha} = \frac{0{,}01}{0{,}33367} = 0{,}03 \text{ м}.$$

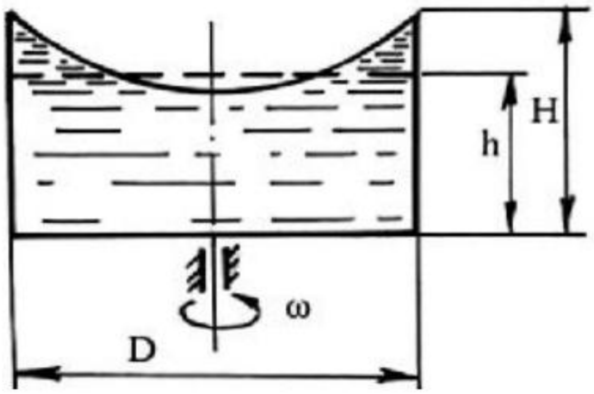
$$\ell = x + \frac{L}{2} = 0{,}03 + \frac{0{,}8}{2} = 0{,}43 \text{ м}.$$

$$y = \ell\ \mathrm{tg}\,\alpha = 0{,}43 \cdot 0{,}33367 = 0{,}14 \text{ м}.$$

Объем минимального количества бензина в баке, обеспечивающего его подачу без подсоса, будет равно:

$$W = Sb = \frac{\ell y}{2} b = \frac{0{,}43 \cdot 0{,}14}{2} \cdot 0{,}5 = 15{,}05 \text{ л}.$$

Задача №7. В сосуд высотой H = 0,4 м залита жидкость до уровня h = 0,3 м. Определить, до какой угловой скорости можно раскрутить сосуд, с тем, чтобы жидкость не выплеснулась из него, если диаметр сосуда D = 100 мм.



Уравнение свободной поверхности жидкости имеет вид:

$$H = z_o + \frac{\omega^2 r^2}{2g}$$

где z_0 – вертикальная координата вершины параболоида, м;
ω – угловая скорость, рад/с.

Объем параболоида вращения $W_П$ равен:

$$W_п = \frac{1}{2}\pi R^2 (H - z_o).$$

Выразим объем жидкости $W_ж$, находящейся в сосуде объемом $W_С$, учитывая объем параболоида $W_п$:

$$W_ж = W_с - W_п = H\frac{\pi D^2}{4} - \frac{1}{2}\pi R^2 (H - z_o) = \frac{1}{2}\frac{\pi D^2}{4}(H + z_o).$$

Поскольку можно вычислить объем жидкости $W_ж$ в сосуде, находящегося в состоянии покоя, то можно записать:

$$h\frac{\pi D^2}{4} = \frac{1}{2}\frac{\pi D^2}{4}(H + z_o)$$

$$h = \frac{1}{2}(H + z_o).$$

$$z_o = 2h - H = 2 \cdot 0{,}3 - 0{,}4 = 0{,}2м.$$

Угловую скорость ω можно выразить из уравнения свободной поверхности жидкости в сосуде:

$$\omega = \sqrt{\frac{(H - z_o)2g}{r^2}} = \sqrt{\frac{(0{,}4 - 0{,}2) \times 2 \times 9{,}8}{0{,}05^2}} = 39{,}6\,\frac{рад}{с}.$$

2.4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение гидростатического давления.

2. Почему гидростатическое давление является функцией координат $p = f$(x,y,z)?

3. Что такое весовое давление жидкости?

4. Может ли давление в жидкости быть меньше нуля, равно нулю?

5. В каких случаях плоскость пъезометрического напора располагается выше или ниже свободной поверхности покоящейся жидкости?

6. Что такое абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление?

7. Как можно измерить атмосферное давление? В чем разница между физической и технической атмосферой?

8. Может ли движущаяся жидкость находиться в состоянии покоя? Если может, то при каких условиях?

3. Практическое занятие №3. Кинематика жидкости

Кинематика жидкости – это раздел гидромеханики (механики жидкости), в котором изучают виды и кинематические характеристики движений жидкости, но не рассматривают силы, под действием которых происходит движение.

3.1 Основные понятия и определения

Жидкость рассматривают как сплошную среду, непрерывно заполняющую пространство без пустот и разрывов. Кроме того, для упрощения изучения движения жидкости используется так называемая «идеальная» жидкость. Ее считают абсолютно несжимаемой, она обладает полным отсутствием температурного расширения и не оказывает сопротивления сдвигающим и растягивающим усилиям. Идеальная жидкость – жидкость фиктивная. Но сжимаемость, температурное расширение и сопротивление растяжению для реальных жидкостей ничтожно малы и обычно не учитываются. Таким образом, основной и единственной особенностью, отличающую реальную жидкость от идеальной, является наличие у реальной жидкости сил сопротивления сдвигу, определяемых особым свойством жидкости – вязкостью. Поэтому идеальную жидкость иногда называют невязкой, а реальную - вязкой жидкостью. Происходящие явления исследуют применительно к идеальной жидкости, а затем полученные закономерности переносятся с введением корректирующих поправок на потоки реальных жидкостей.

Движение жидкости можно считать определенным, если известны законы движения всех частиц.

Выделим в некоторой области жидкости произвольную частицу, которая с течением времени пройдет через ряд точек пространства, обладая при этом различными скоростями (рис. 3.1).

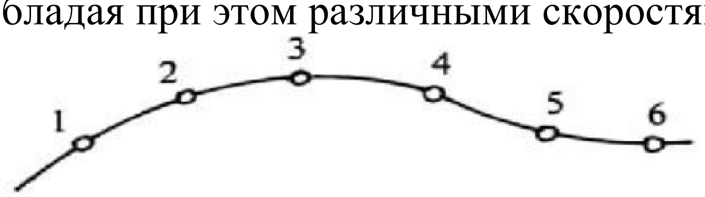


Рис 3.1 – Траектория движения частицы жидкости

Геометрическая линия, соединяющая последовательные положения движущейся частицы жидкости, представляет собой ее траекторию.

3.2 Расход. Уравнение расхода

Расходом Q струйки называют объем жидкости, проходящий через данное живое сечение в единицу времени. Для элементарной струйки с равномерным распределением местных скоростей u по живому сечению площадью dS:

$$dQ = u \cdot dS \tag{3.1}$$

Расход потока равен сумме расходов элементарных струек, составляющих поток:

$$Q = \int_0^S u \cdot dS \tag{3.2}$$

Для потока реальной жидкости местные скорости в различных точках живого сечения будут различны. Вследствие наличия сил внутреннего трения скорость частиц жидкости в живом сечении потока будет возрастать по мере удаления от ограничивающей твердой поверхности.

Пусть существует условный поток, все точки живого сечения которого характеризуются одними и теми же местными скоростями, равными средней скорости в данном живом сечении. Тогда, умножив площадь живого сечения S ($м^2$) на среднюю скорость ($м/с^2$) в данном живом сечении, получим действительный расход жидкости, проходящий через это живое сечение:

$$Q = \upsilon_{ср} \cdot S \tag{3.3}$$

Расход можно измерять в единицах объема, массы или веса. Поэтому различают объемный Q ($м^3/с$), массовый Q_m (кг/с), и весовой Q_G (Н/с) расходы. Между этими расходами существует такая же связь, как и между объемом, массой и весом. При расчете гидравлических систем обычно пользуются объемным расходом Q.

Массовый расход при установившемся движении одинаков во всех сечениях элементарной струйки.

3.3 Потоки жидкости

Классификация потоков по характеру границ. В гидравлике потоком жидкости называют движущуюся массу жидкости, ограниченную направляющими твердыми поверхностями, поверхностями раздела жидкостей или свободными поверхностями. В зависимости от характера и сочетания ограничивающих поток поверхностей потоки делят на безнапорные, напорные и гидравлические струи.

Безнапорные потоки ограничены частично твердой, частично свободной поверхностью. Примером таких потоков может служить поток в реке или канале, а также в трубе, работающей неполным сечением.

Напорные потоки ограничены твердыми поверхностями по всему сечению, и гидродинамическое давление в любой точке потока отлично от атмосферного.

Гидравлические струи ограничены только жидкостью или газовой средой. Например, струя воды, вытекающая из сосуда через отверстие в атмосферу.

Гидравлические элементы потока. К ним относятся смоченный периметр и гидравлический радиус.

Смоченный периметр χ представляет собой длину линии, по которой жидкость в живом сечении соприкасается с твердыми поверхностями, ограничивающими поток. В напорных потоках длина смоченного периметра равна длине всего периметра сечения, а в безнапорных потоках – составляет некоторую часть полного периметра.

Гидравлическим радиусом R называют отношение площади живого сечения потока (м^2) к смоченному периметру (м) в этом сечении:

$$R = \frac{S}{\chi} \tag{3.4}$$

В напорном потоке для круглого сечения диаметром d и радиусом r имеем:

$$R = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4} = \frac{r}{2} \tag{3.5}$$

В безнапорном потоке для прямоугольного живого сечения с шириной b и глубиной жидкости h гидравлический радиус равен:

$$R = \frac{bh}{b + 2h} \qquad (3.6)$$

В достаточно широких потоках при малом значении отношения h/b гидравлический радиус часто принимают равным глубине наполнения.

3.4 Примеры решения задач

Задача №1. Труба, по которой течет вода, имеет переменное сечение. Определить скорость во втором сечении, если скорость в первом сечении υ_1=0,08 м/с; d_1=0,3 м; d_2=0,2м.

Из уравнения неразрывности потока следует:

$$\upsilon_2 = \upsilon_1 \frac{S_1}{S_2} = \upsilon_1 \frac{d_1^2}{d_2^2} = 0{,}07 \cdot \frac{0{,}3^2}{0{,}2^2} = 0{,}18 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Задача №2. По трубопроводу диаметром D = 170 мм перекачивается нефть плотностью ρ = 800 кг/м^3 в количестве 1400 т. в сутки. Определить секундный объемный расход нефти Q и среднюю скорость ее течения υ.

Предварительно находим секундный массовый расход:

$$Q_m = \frac{1400 \cdot 10^3}{24 \cdot 3600} = 16{,}2 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Следовательно, секундный объемный расход равен:

$$Q_V = \frac{Q_m}{p} = \frac{16{,}2}{800} = 0{,}02025 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Далее по уравнению расхода находим среднюю скорость течения:

$$\upsilon = \frac{Q_V}{S} = \frac{4 \cdot Q_V}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 0{,}02025}{3{,}14 \cdot 0{,}17^2} = 0{,}89 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Задача №3. По полностью затопленному трубопроводу перекачивается жидкость со скоростью υ = 0,3 м/с. Определить расход жидкости Q, если гидравлический радиус R = 0,02 м.

Гидравлический радиус равен отношению площади живого сечения $S = \pi r^2$ и смоченного периметра $\chi = 2\pi r$:

$$R = \frac{S}{\chi} = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2}.$$

Отсюда диаметр трубопровода d = 2r = 4R = 0,08 м. Тогда расход жидкости:

$$Q = \upsilon \cdot S = \upsilon \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 0{,}3 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}08^2}{4} = 1{,}5\,\frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

3.5 Контрольные вопросы

1. В чем разница между линией тока и траекторией? Могут ли они совпадать?
2. В чем различие установившегося и неустановившегося движения?
3. Что такое трубка тока, элементарная струйка жидкости?
4. Дайте определение живого сечения струйки, расхода жидкости и средней по живому сечению скорости.
5. Какой физический закон применительно к жидкости отражает уравнение неразрывности?
6. Каковы особенности безнапорных потоков, напорных потоков и гидравлических струй?
7. Что такое смоченный периметр и гидравлический радиус?

4. Практическое занятие №4. Динамика жидкости

Динамика жидкости – это раздел, который изучает законы движения жидкостей в зависимости от приложенных к ним сил.

При заданных внешних силах задача динамики жидкости сводится к определению напряжений и кинематических параметров движения в каждой точке жидкости в любой момент времени, а также к определению гидродинамических сил воздействия потока на тела.

4.1 Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости

Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной несжимаемой жидкости:

$$\frac{p_2}{\rho g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \qquad (4.1)$$

В любом поперечном сечении струйки, взятом по ее длине, уравнение Бернулли можно представить в следующем виде:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = H = const \qquad (4.2)$$

Сумма трех слагаемых, входящих в уравнение (4.2), называется полным напором в данном сечении струйки. Различают геометрический напор z, пьезометрический напор $\frac{p}{\rho g}$ и скоростной напор $\frac{u^2}{2g}$.

В соответствии с этим уравнение Бернулли можно сформулировать следующим образом: для элементарной струйки идеальной жидкости полный напор, то есть сумма геометрического, пъезометрического и скоростного напоров есть величина постоянная во всех сечениях струйки.

4.2 Основные правила, применяемые при решении задач

При применении уравнения Бернулли важно правильно выбрать те два сечения, для которых оно записывается. В качестве сечений рекомендуется брать:

- свободную поверхность жидкости в резервуаре (баке), где скорость $\upsilon = 0$;
- выход в атмосферу, где $p_{изб} = 0$; $p_{абс} = p_{ат}$;
- сечение, где присоединен тот или иной манометр, пъезометр или вакуумметр;
- неподвижный воздух вдалеке от входа в трубу, в которую происходит всасывание из атмосферы;

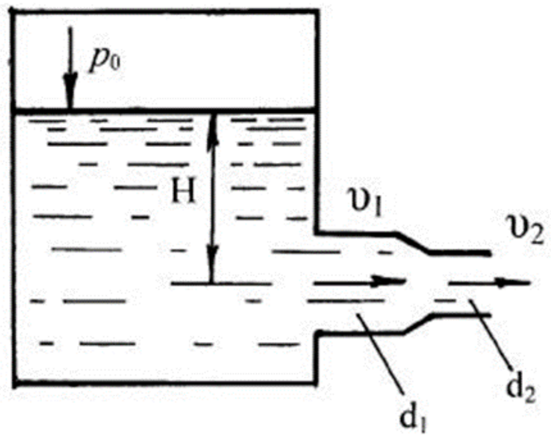
Уравнение Бернулли рекомендуется сначала записать в общем виде, а затем переписать с заменой его членов, заданными буквенными величинами и исключить члены, равные нулю.

При этом необходимо помнить, что:

- вертикальная ордината z всегда отсчитывается от произвольно выбранной плоскости вверх;
- давление p, входящее в правую и левую части уравнения, должно быть задано в одной системе отсчета.

4.3 Примеры решения задач

Задача №1. Из напорного бака вода течет по трубе диаметром d_1 = 20 мм, и затем вытекает в атмосферу через насадок с диаметром выходного отверстия d_2 = 10 мм. Избыточное давление воздуха в баке p_0 = 0,16 МПа; высота H = 1,4 м. Пренебрегая потерями энергии, определить скорости течения воды в трубе υ_1 и на выходе из насадка. Плотность воды р=1000 кг/м^3.



В качестве сечений, для которых составим уравнение Бернулли, выберем свободную поверхность в резервуаре и сечение на выходе из насадка диаметром d_2. Тогда:

$$H + \frac{p_o + p_{ат}}{\rho g} + \frac{\upsilon_0^2}{2g} = 0 + \frac{p_{ат}}{\rho g} + \frac{\upsilon_2^2}{2g}$$

Ввиду значительных размеров сосуда по сравнению с поперечными размерами трубопровода скорость $\upsilon 0$ будет весьма мала и ею можно пренебречь, то есть $\upsilon_0 = 0$.

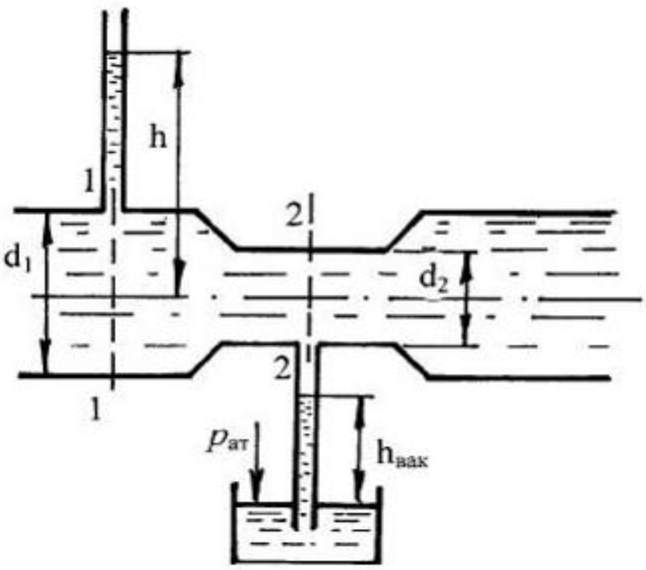
$$\upsilon_2^2 = (H + \frac{p_0}{\rho g}) \cdot 2g, \text{ откуда } \upsilon_2 = \sqrt{2gH + \frac{2p_0}{\rho}}$$

$$\upsilon_2 = \sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 1{,}4 + \frac{2 \cdot 160\,000}{1000}} = 18{,}6 \frac{м}{с}$$

Из уравнения расхода находим скорость $\upsilon 1$:

$$\upsilon_1 = \frac{\upsilon_2 S_2}{S_1} = \frac{\upsilon_2 d_2^2}{d_1^2} = \frac{18{,}6 \cdot 0{,}01^2}{0{,}02^2} = 4{,}66 \frac{м}{с}.$$

Задача №2. Определить, на какую высоту поднимется вода в трубке, один конец которой присоединен к суженному сечению трубопровода, а другой конец опущен в воду. Расход воды в трубе Q = 0,03 $м^3/с$; избыточное давление p_1 = 50 кПа; диаметры d_1 = 100 мм и d_2 = 50 мм. Потерями напора пренебречь. Плотность воды p=1000 $кг/м^3$.



Уравнение Бернулли для сечений 1 и 2 относительно оси трубы при $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ имеет вид:

$$\frac{p_1}{p \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_2}{p \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

Учитывая, что, $h_{вак} = \frac{p_2}{\rho g}$, $\upsilon_1 = \frac{4Q}{\pi \cdot d_1^2}$ и $\upsilon_2 = \frac{4Q}{\pi \cdot d_2^2}$, то получим:

$$h_{вак.} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{4^2 Q^2}{2g\pi^2}\left(\frac{1}{d_1^4} - \frac{1}{d_2^4}\right)$$

$$h_{вак.} = \frac{50 \cdot 10^3}{1000 \cdot 9{,}8} + \frac{16 \cdot 0{,}03^2}{2 \cdot 9{,}8 \cdot 3{,}14^2}\left(\frac{1}{0{,}1^4} - \frac{1}{0{,}05^4}\right) = -6{,}1 \text{ м.}$$

Полученная высота – вакуумметрическая высота. На эту высоту $h_{вак} = 6{,}1$ м и поднимется вода в трубке.

4.4 Контрольные вопросы

1. Что такое пъезометрический, скоростной и гидродинамический напор? Как они изменяются по длине (по направлению движения жидкости)?
2. Как ориентирована напорная линия при установившемся движении вязкой жидкости?
3. Почему уравнение Бернулли выражает закон сохранения механической энергии в жидкости?
4. Что называется полной удельной энергией потока?
5. Чем отличается уравнение Бернулли для идеальной жидкости от того же уравнения для реальной жидкости?
6. Поясните смысл коэффициента Кариолиса в уравнении Бернулли.
7. За счет чего происходит уменьшение удельной энергии потока?
8. Что такое пъезометрический и гидравлический уклон?
9. В каких измерительных приборах используются закономерности уравнения Бернулли?
10. В чем разница между трубкой Пито и трубкой Пито - Прандтля?

5. Практическое занятие №5. Режимы движения жидкости

5.1 Режимы течения жидкости

Для напорных потоков наиболее важное значение имеют силы внутреннего трения, характеризуемые числом Рейнольдса Re. Этот критерий характеризует режимы течения жидкости в напорном трубопроводе.

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что потери энергии при движении жидкости существенно зависят от особенностей движения частиц жидкости в потоке, то есть от режима движения жидкости.

Наглядно особенности режимов движения можно наблюдать на специальной опытной установке, схема которой изображена на рис. 5.1.

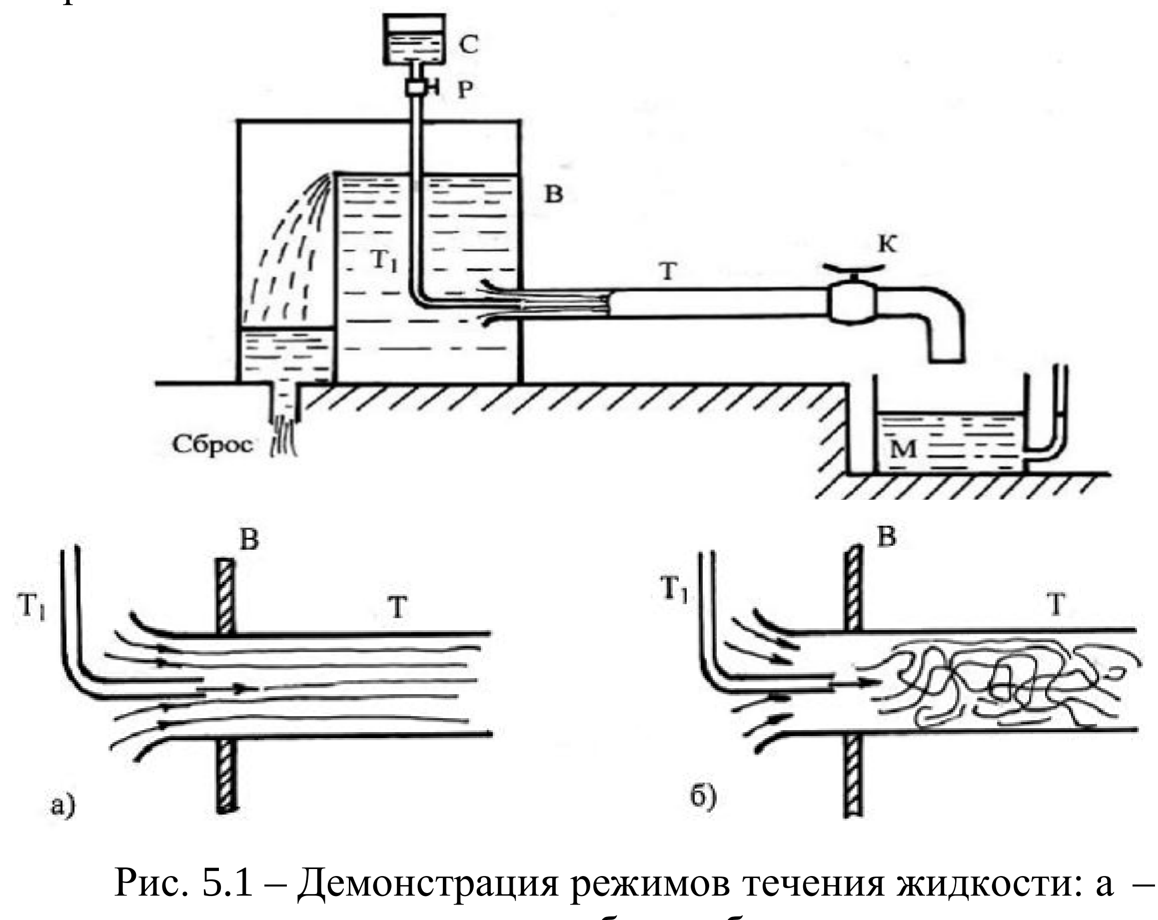


Рис. 5.1 – Демонстрация режимов течения жидкости: а – ламинарное течение; б – турбулентное течение

К баку Б достаточно больших размеров присоединена стеклянная труба Т, ее вход сделан плавным, в конце установлен кран К для регулирования расхода потока. Расход измеряют с помощью мерного бака М и секундомера (объемный способ измерения расхода).

Над баком Б расположен сосуд С, наполненный раствором краски, плотность которой близка к плотности жидкости в потоке. По трубке $Т_1$ краска вводится в жидкость, движущуюся по трубке Т. Расход краски регулируют краном Р.

При открытом кране К в трубе Т установится некоторая скорость потока (высота уровня жидкости в баке Б поддерживается постоянной). При открытии крана Р в трубу Т начнет поступать подкрашенная жидкость. При малой скорости потока υ в трубе Т краска образует прямолинейную и резко выделяющуюся, не смешивающуюся с движущимся потоком струйку жидкости. Это свидетельствует о том, что в прямой стеклянной трубе Т при данном открытии крана К жидкость движется отдельными, не перемешивающимися между собой слоями. Линии тока при этом прямолинейны и устойчивы (рис. 5.1, а).

При некотором большем открытии крана К происходит увеличение скорости движения жидкости в трубе Т, струйка подкрашенной жидкости начинает искривляться и становится волнообразной. Это может происходить только в результате пульсации (изменении во времени) векторов местных скоростей в потоке.

При дальнейшем увеличении скорости потока в трубе Т струйка распадается на отдельные, хорошо видные вихри и перемешивается со всей массой текущей жидкости (рис. 5.1, б).

Движение жидкости, при котором отсутствуют изменения (пульсации) местных скоростей, называют ламинарным (от латинского слова «lamina» – слой), а изменения (пульсации) местных скоростей, приводящие к перемешиванию жидкости – турбулентным (от латинского слова «turbulentus» – беспорядочный).

Основными факторами, определяющими характер режима течения жидкости, являются:

- средняя скорость движения жидкости $\upsilon_{ср}$;
- диаметр трубопровода d;
- плотность жидкости ρ;
- динамическая вязкость жидкости μ.

Результаты экспериментов показали, что разрушение ламинарного режима движения жидкости в круглых трубах начинается приблизительно при Re = 2300. Таким образом, при Re < 2300 наблюдается устойчивое ламинарное течение жидкости, при Re > 2300 – устойчивое турбулентное течение.

Скорость потока, при которой меняется режим движения жидкости, называют критической.

Рейнольдсом было обнаружено существование двух критических скоростей:

- верхняя критическая скорость $\upsilon_{кр.в}$ (при переходе ламинарного ре-жима в турбулентный);
- нижняя критическая скорость $\upsilon_{кр.н}$ (при переходе турбулентного режима в ламинарный).

В опытах самого Рейнольдса $R_{кр.н} = 2000$, $R_{кр.в} = 12000$, то есть при $R_{кр.н} < Re < R_{кр.в}$, наблюдается неустойчивое состояние потока.

В настоящее время при практических расчетах обычно принято исходить из значения Re = 2300, то есть при меньших значениях числа Рейнольдса наблюдается ламинарный режим, при больших – турбулентный.

Число Рейнольдса определяется по следующей формуле:

$$Re = \frac{\upsilon d}{\nu} \qquad (5.1)$$

где υ — характерная скорость, м/с;

d — внутренний диаметр трубопровода, м;

ν — кинематическая вязкость среды, $м^2/с$.

В природе и технике турбулентное движение жидкости наблюдается чаще, чем ламинарное. Турбулентное течение встречается в потоках маловязких жидкостей и в трубах с большими проходными сечениями. К ним относятся потоки в гидравлических системах для перекачки воды или жидкостей на водяной основе, бензина, керосина, а также потоки различных газов.

Области ламинарного движения – движение вязких жидкостей типа масел по трубам и в механизмах, движение грунтовых вод (но он может быть и турбулентным), движение в капиллярах (в том числе и движение крови в живых организмах).

5.2 Примеры решения задач

Задача №1. Определить число Рейнольдса и режим движения воды в водопроводной трубе диаметром d = 500 мм, если расход Q = 0,11 м/с. Температура воды t=17°С.

Таблица 5.1 – Значения кинематической вязкости для воды при различных температурах

Температура °С	Кинематическая вязкость $м^2/с\ [\times 10^{-6}]$
0	1,787
5	1,519
10	1,307
20	1,004
30	0,801
40	0,658
50	0,658
60	0,475
70	0,413
80	0,365
90	0,326
100	0,294

Коэффициент кинематической вязкости для воды определяем по таблице (при t = 17 ºС), ν = 1,095*10^{-6} м^2/с.

Живое сечение потока:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}5^2}{4} = 0{,}19\ м^2$$

Средняя скорость движения воды в трубе:

$$\upsilon = \frac{Q}{S} = \frac{0{,}11}{0{,}19} = 0{,}58\,\frac{м}{с}.$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\upsilon d}{\nu} = \frac{0{,}58 \cdot 0{,}5}{1{,}095 \cdot 10^{-6}} = 264840.$$

Так как полученное Re > $Re_{кр}$=2300, следовательно, движение воды будет турбулентным.

Задача №2. По трубопроводу диаметром d = 150 мм транспортируется нефть. Определить критическую скорость, соответствующую переходу ламинарного движения жидкости в турбулентное. Коэффициент кинематической вязкости принять равным $\nu = 6{,}7 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Критическое число Рейнольдса равно:

$$Re_{кр} = \frac{d\upsilon_{кр}}{\nu} = 2300.$$

Из предыдущей формулы выражаем и находим $\upsilon_{кр}$:

$$\upsilon_{кр} = \frac{\nu Re_{кр}}{d} = \frac{2300 \cdot 6{,}7 \cdot 10^{-6}}{0{,}15} = 0{,}1\,\frac{м}{с}.$$

Задача №3. Как и во сколько раз изменится значение числа Рейнольдса при уменьшении диаметра трубопровода в 4 раза при сохранении постоянства расхода (Q = const)?

Скорость движения жидкости из уравнения расхода равна:

$$\upsilon = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2}$$

Подставив значение скорости в уравнение Рейнольдса, получим:

$$R_e = \frac{4Q}{\pi d \nu}$$

Следовательно, число Рейнольдса увеличится в 4 раза.

5.3 Контрольные вопросы

1. В чем смысл коэффициентов гидродинамического подобия?
2. В зависимости от чего применяется тот или иной коэффициент подобия?
3. Каковы факторы, определяющие режим движения жидкости?

4. Каковы особенности ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости?

5. Что такое осредненная скорость при турбулентном режиме движения?

6. Приведите примеры особенности ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости.

6. Практическое занятие №6. Потери напора

6.1. Общие сведения о гидравлических сопротивлениях

Все элементы гидравлических систем оказывают различное сопротивление движению жидкости. Это приводит к энергетическим потерям, которые оценивают в виде потерь полного напора, то есть потерь полной удельной энергии жидкости. Такие потери принято называть гидравлическими потерями.

Потери удельной энергии, затрачиваемой на преодоление гидравлических сопротивлений движением вязкой жидкости, складываются из потерь двух видов:

- потерь по длине $h_{дл}$ участка русла или трубы, по которым движется жидкость;
- местных потерь напора $h_м$ (краны, задвижки, поворот трубы, сужение – расширение трубы и т. д.).

Общие потери принимают равными сумме потерь напора по длине отдельных участков и всех местных потерь напора:

$$h_{тр} = \sum h_{дл} + \sum h_м \qquad (6.1)$$

В общем случае (как для потерь по длине, так и для местных потерь напора) уравнение для определения потерь напора имеет вид:

$$h_{тр} = \zeta \frac{\upsilon^2}{2g} \qquad (6.2)$$

где ζ – коэффициент сопротивления (коэффициент потерь), показывающий, какому числу скоростных напоров (или долей скоростного напора) соответствует потеря напора, затрачиваемого на преодоление данного сопротивления.

Формулу (6.2) называют формулой Вейсбаха.

6.2 Примеры решения задач

Задача №1. Вентиляционная труба d = 0,1 м имеет длину ℓ = 150 м. Определить потери давления, если расход воздуха, подаваемый по трубе, равен Q = 0,09 $м^3/с$. Давление на выходе равно атмосферному ($p_{ат}$ = 0,1 МПа). Местные сопротивления по пути движения воздуха отсутствуют. Температура воздуха $t_в$ = 25 ºC. Средняя шероховатость выступов Δ=0,2 мм, плотность воздуха ρ = 1,18 $кг/м^3$.

Таблица 6.1 – Значения динамической и кинематической вязкости воздуха при различных температурах

t, °C	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, $м^2/с$
-50	14,6	9,23
-45	14,9	9,64
-40	15,2	10,04
-35	15,5	10,42
-30	15,7	10,8
-25	16	11,21
-20	16,2	11,61
-15	16,5	12,02
-10	16,7	12,43
-5	17	12,86
0	17,2	13,28
10	17,6	14,16
15	17,9	14,61
20	18,1	15,06
30	18,6	16
40	19,1	16,96
50	19,6	17,95
60	20,1	18,97

Скорость воздуха в трубе равна:

$$\upsilon = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0{,}09}{3{,}14 \cdot 0{,}1^2} = 11{,}5\,\frac{м}{с}.$$

Число Рейнольдса:

$$R_e = \frac{\upsilon d}{\nu} = \frac{11{,}5 \times 0{,}1}{15{,}53 \times 10^{-6}} = 74\,050.$$

Режим течения жидкости – турбулентный (Re>2300), поэтому коэффициент гидравлического трения определим по формуле Альтшуля:

$$\lambda_т = 0{,}11 \cdot (\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{R_e})^{0{,}25} = 0{,}11 \cdot (\frac{0{,}2}{100} + \frac{68}{74050})^{0{,}25} = 0{,}025.$$

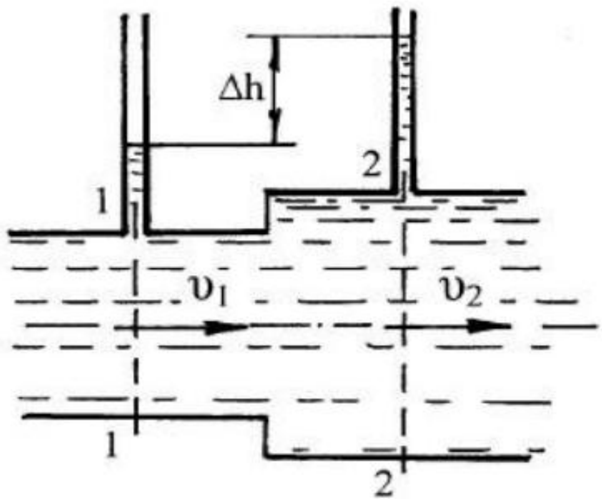
Потери давления на трение по длине определим по формуле Дарси–Вейсбаха:

$$h_{тр} = \frac{\Delta p}{\rho g} = \lambda \frac{l}{d}\frac{\upsilon^2}{2g}$$

Откуда:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d}\frac{\upsilon^2}{2}\rho = 0{,}025 \cdot \frac{150}{0{,}1} \cdot \frac{11{,}5^2}{2} \cdot 1{,}18 = 2926 \text{ Па} = 2{,}9 \text{ кПа}.$$

Задача №2. При внезапном расширении трубы от d = 40 мм до D = 120 мм происходит увеличение давления, которому соответствует разность показаний пъезометров Δh = 60 мм. Определить скорости υ_1 и υ_2 и расход жидкости. Учесть потери на внезапное расширение.



Составим уравнение Бернулли для сечений 1 и 2 (z_1=z_2= 0):

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\upsilon_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\upsilon_2^2}{2g} + h_м.$$

Потери на внезапное расширение определим по формуле:

$$h_м = (1 - \frac{S_1}{S_2})^2 \frac{\upsilon_1^2}{2g}.$$

Учтем также, что:

$$\Delta h = \frac{p_2}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g}$$

Выразим скорость из уравнения расхода:

$$\upsilon_2 = \upsilon_1 \frac{d^2}{D^2}$$

С учетом вышеизложенного уравнение Бернулли примет вид:

$$\Delta h = \frac{\upsilon_1^2}{2g} - \frac{\upsilon_2^2}{2g} - h_м = \frac{\upsilon_1^2}{2g} - \frac{\upsilon_1^2\left(\frac{d^2}{D^2}\right)^2}{2g} - \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \frac{\upsilon_1^2}{2g}.$$

Откуда скорость υ_1 будет равна:

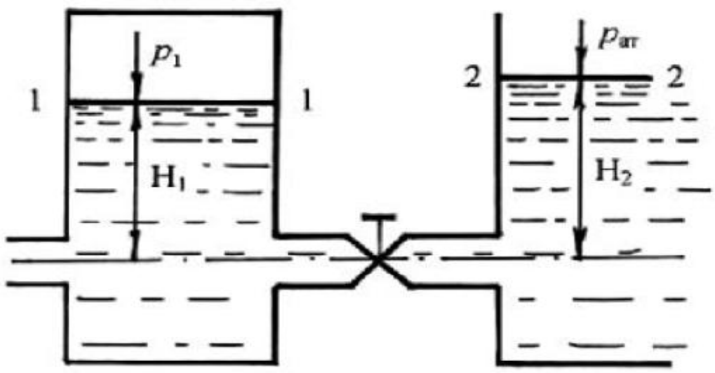
$$\upsilon_1 = \sqrt{\frac{\Delta h \times 2g}{1 - (\frac{d^2}{D^2})^2 - (1 - \frac{d^2}{D^2})^2}}$$

$$\upsilon_1 = \sqrt{\frac{0{,}06 \times 2 \times 9{,}8}{1 - (\frac{40^2}{120^2})^2 - (1 - \frac{40^2}{120^2})^2}} = 2{,}49\frac{м}{с}.$$

Расход жидкости определим из уравнения расхода:

$$\upsilon_2 = \upsilon_1 \frac{d^2}{D^2} = 2{,}49 \cdot \frac{40^2}{120^2} = 0{,}27 \text{ м/с}.$$

Задача №3. Вода перетекает из напорного бака, где избыточное давление воздуха p_1 = 0,15 МПа, в открытый резервуар по короткой трубе диаметром d =50 мм, на которой установлен кран. Чему должен быть равен коэффициент сопротивления крана для того, чтобы расход воды составлял Q = 9,3 л/с. Высоты уровней H_1 = 1,5 м, H_2 = 2,7 м. Учесть потери напора на входе в трубу ($\zeta_{вх}$ = 0,7) и на выходе из трубы (внезапное расширение). Плотность воды ρ=1000 кг/м^3.



Скорость в трубе из уравнения расхода:

$$\upsilon = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0{,}0093}{3{,}14 \cdot 0{,}05^2} = 4{,}7\frac{м}{с}.$$

Составим уравнение Бернулли по избыточному давлению для сечений 1 и 2 относительно плоскости сравнения, совпадающей с осью трубы:

$$H_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\upsilon_1^2}{2g} = H_2 + \frac{\upsilon_2^2}{2g} + \sum h_{тр}$$

Скоростями υ_1 и υ_2 можно пренебречь, то есть $\upsilon_1=\upsilon_2=0$.

Потери напора равны:

$$\sum h_{тр} = h_{суж} + h_{м} + h_{расш}.$$

Потери напора при сужении:

$$h_{суж} = \zeta_{вх} \cdot \frac{\upsilon^2}{2g}$$

где υ - скорость течения жидкости в трубе (м/с).

Потери напора при расширении по формуле:

$$h_{расш} = (1 - \frac{S_1}{S_2})^2 \frac{\upsilon^2}{2g}.$$

Поскольку $S_2 \gg S_1$, то:

$$h_{расш} = \frac{\upsilon^2}{2g}.$$

Местные потери напора:

$$h_{м} = \zeta_{к} \cdot \frac{\upsilon^2}{2g}$$

Тогда уравнение Бернулли примет вид:

$$H_1 + \frac{p_1}{\rho g} = H_2 + \zeta_{вх} \times \frac{\upsilon^2}{2g} + \zeta_{к} \times \frac{\upsilon^2}{2g} + \frac{\upsilon^2}{2g}.$$

Перегруппировав члены уравнения и выразив $\zeta_{К}$, получим:

$$\zeta_{к} = \frac{\left[H_1 - H_2 + \frac{p_1}{\rho g} - \frac{\upsilon^2}{2g}(\zeta_{вх} + 1)\right] \cdot 2g}{\upsilon^2}$$

$$\zeta_{к} = \frac{2g(H_1 - H_2) + \frac{2p_1}{\rho}}{\upsilon^2} - (\zeta_{вх} + 1)$$

$$\zeta_{к} = \frac{2 \cdot 9{,}8 \cdot (1{,}5 - 2{,}7) + \frac{2 \cdot 150\,000}{1000}}{4{,}7^2} - 1{,}7 = 10{,}8.$$

6.3 Контрольные вопросы

1. Из чего складываются потери напора?

2. От чего зависит коэффициент местного сопротивления?

3. Чем объясняются потери по длине трубопровода?

4. Как влияет режим течения жидкости на потери напора по длине и в местных сопротивлениях?

5. Почему на зависимость гидравлических потерь напора от расхода при ламинарном течении влияет изменение температуры жидкости?

6. Почему существуют понятия «гидравлически гладкие трубы» и «гидравлически шероховатые трубы»?

7. Почему толщина вязкого подслоя жидкости влияет на потери напора при турбулентном движении?

8. В чем разница между линейными потерями и квадратичными?

7. Практическое занятие №7. Истечение жидкости

7.1 Истечение через отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре

Задача об истечении жидкости из отверстий является одной из основных задач гидравлики, отправной точкой ее развития. Основное уравнение гидродинамики (уравнение Бернулли) – было получено в результате одного из подобных решений.

Задача об истечении сводится к определению скорости истечения и расхода вытекающей жидкости.

Истечение может происходить в газообразную среду (свободное истечение) или в жидкость (затопленное истечение) при постоянном или переменном напоре. Истечение жидкости через затопленное отверстие называют также истечением под уровень. Наиболее простым случаем истечения жидкости является истечение при постоянном напоре.

При постоянном напоре скорости истечения будут неизменны во времени, то есть движение будет установившееся. При этом линии тока и траектории частиц будут совпадать (рис.7.1).

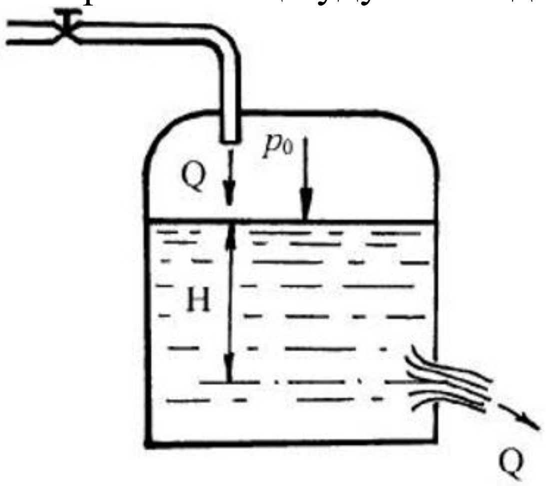


Рис. 7.1 – Схема истечение жидкости через отверстие при постоянном напоре в газовую среду

Скорости истечения на верхней и нижней границах вытекающей из отверстия струи можно считать одинаковыми, если истечение происходит из малого отверстия. Малое отверстие – это отверстие, у которого наибольший вертикальный размер d не превышает 0,1Н.

Отношение площади струи в сжатом сечении d_c к площади отверстия d называется коэффициентом сжатия струи:

$$\varepsilon = \left(\frac{d_c}{d}\right)^2 = \frac{S_c}{S}, \tag{7.1}$$

где S и S_c - площади отверстий в тонкой стенке и в сжатом сечении струи соответственно (рис.7.2).

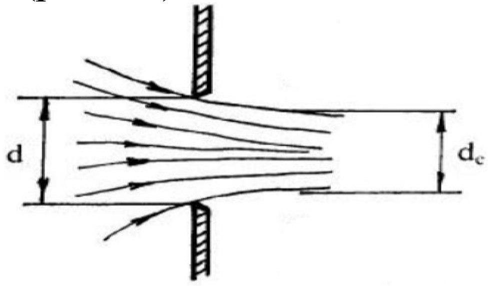


Рис. 7.2 – Схема деформирования струи при истечении

7.2 Скорость и расход жидкости при истечении

Средняя скорость в сжатом сечении определяется по формуле:

$$\upsilon_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \zeta_{о.к.}}}\sqrt{2gHp} = \varphi\sqrt{2gHp}, \tag{7.2}$$

где α_c – коэффициент Кариолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению;

$\zeta_{о.к.}$ – коэффициент потерь при истечении через отверстие с острой кромкой или тонкой стенкой;

φ – коэффициент скорости (безразмерная величина), определяемая по формуле:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \zeta_{о.к.}}}. \tag{7.3}$$

Коэффициент скорости φ отражает влияние распределения скоростей в сжатом сечении α_c и потерь напора $\zeta_{о.к.}$

В случае истечения идеальной жидкости (α_c = 1; $\zeta_{о.к}$ = 0) из формулы (7.3) следует, что φ = 1, то есть скорость истечения идеальной жидкости равна:

$$\upsilon_c = \sqrt{2gHp}. \tag{7.4}$$

Расход при истечении жидкости через отверстие определяется по формуле:

$$Q = \mu S\sqrt{2g\text{Hp}}, \qquad (7.5)$$

где μ – коэффициент расхода.

Расход жидкости при истечении также определяется по формуле:

$$Q = \mu S\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}. \qquad (7.6)$$

7.3 Примеры решения задач

7.3.1. Определить расход и скорость вытекания воды из малого круглого отверстия диаметром d = 2 см в боковой стенке резервуара больших размеров. Напор над центром отверстия H = 1,5 м, температура воды t = 25 ºC.

Коэффициент кинематической вязкости для воды определяем по таблице 5.1 (при t = 25 ºC), ν = 0,9*10^{-6} $м^2$/с.

Определяем число Рейнольдса, характеризующее истечение без учета коэффициента скорости φ:

$$R_e = \frac{\upsilon d}{\nu} = \frac{d\sqrt{2g\text{H}}}{\nu} = \frac{0{,}02\sqrt{2\cdot 9{,}8\cdot 1{,}5}}{0{,}9\cdot 10^{-6}} = 120444.$$

Из рис. 7.1 при Re = 120444 определяем коэффициенты скорости φ и расхода μ: φ = 0,97; μ = 0,6.

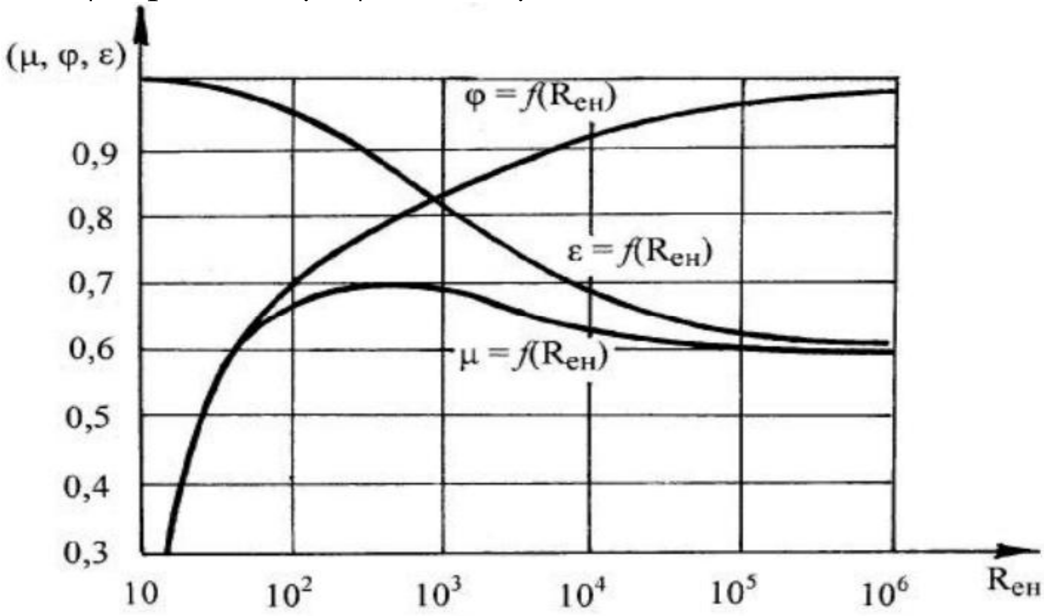


Рис. 7.1 – Зависимость ε, φ и μ от Reн для круглого отверстия в тонкой стенке

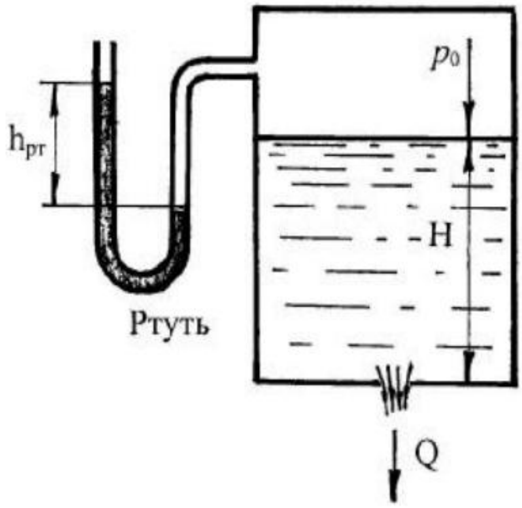
Тогда скорость истечения воды из отверстия будет равна:

$$\upsilon_C = \varphi\sqrt{2g\text{H}} = 0{,}97\sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 1{,}5} = 5{,}3\,\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Расход вытекающей из отверстия воды будет равен:

$$\text{Q} = \mu S\sqrt{2gH} = 0{,}6 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}02^2}{4}\sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 1{,}5} = 1{,}02\,\frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Задача №2. Определить расход жидкости ($\rho_ж$ = 900 кг/м^3), вытекающей из бака через отверстие площадью S=1 см^2. Показание ртутного манометра h = 350 мм, высота H = 2,3 м, коэффициент расхода μ отверстия μ = 0,60. Атмосферное давление $p_{ат}$=10^5 Па, плотность ртути $\rho_{рт}$=13600 кг/м³.



Расход жидкости определяем по формуле: $\text{Q} = \mu S\sqrt{\frac{2}{\rho_ж}\Delta\,p}$.

Перепад давления Δp с верхней и нижней стороны отверстия будет равен разности давления на дне сосуда (сумма p_0 и весового давления ρgH) и атмосферного давления, то есть $\Delta p = p_0 + \rho g H - p_{ат}$.

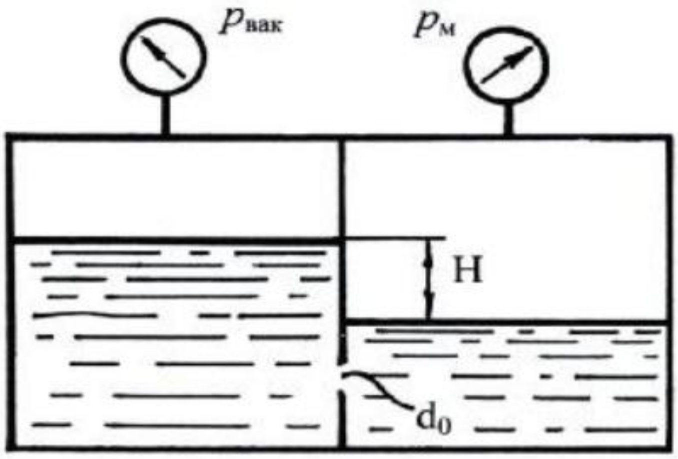
Давление p_0 (абсолютное давление) определяется как:

$$p_0 = p_{ат} + \rho_{рт} gh = 100000 + 13600 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}35 = 146648 \text{ Па}.$$

$$\Delta p = p_0 + \rho_ж gH - p_{ат} = 146648 + 900 \cdot 9{,}8 \cdot 2{,}3 - 100000 = 66934 \text{ Па}.$$

$$Q = 0{,}6 \times 0{,}0001\sqrt{\frac{2}{900} \cdot 66934} = 0{,}73\,\frac{л}{с}.$$

Задача №3. Определить направление истечения жидкости с плотностью $\rho_ж$ = 900 кг/м^3 через отверстие d_0 = 3 мм и расход, если разность уровней H = 2,5 м, показание вакуумметра соответствует 120 мм. рт. ст., показание манометра $p_м$=0,2 МПа, коэффициент расхода μ = 0,7.



Разность давлений между баками равна:

$$\Delta p = p_м - (\rho g_ж H - p_{вак})$$

$$\Delta p = 200000 - (900 \cdot 9{,}8 \cdot 2{,}5 - 120 \cdot 133{,}3) = 193946 \text{ Па}.$$

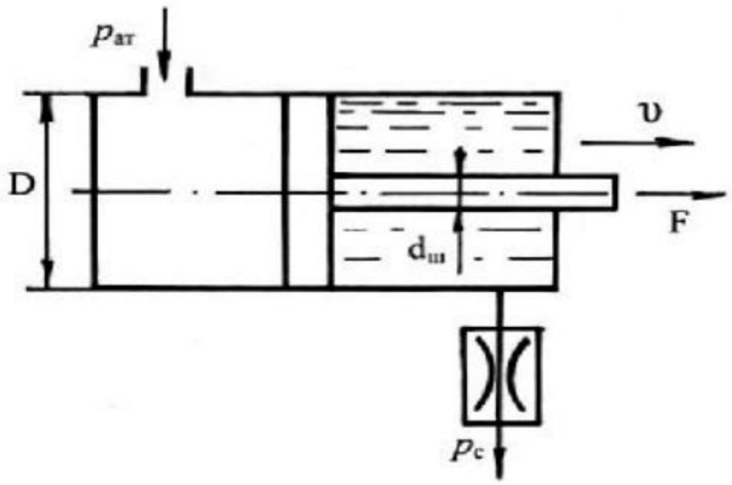
Поскольку давление в правой части больше, то направление течения жидкости будет направлено в левую часть двойной емкости.

Тогда расход жидкости через отверстие с диаметром d_0 будет равен:

$$Q = \mu S\sqrt{\frac{2}{\rho_ж}\Delta p}$$

$$Q = 0{,}7 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}003^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{900} \cdot 193946} = 0{,}1\,\frac{л}{с}.$$

Задача №4. Определить диаметр отверстия дросселя, установленного на сливе из гидроцилиндра, при условии движения штока цилиндра под действием внешней нагрузки F= 45 кН со скоростью υ = 400 мм/с. Диаметры: штока $d_ш$ = 30 мм, цилиндра D =90мм, коэффициент расхода дросселя μ = 0,65, плотность жидкости ρ = 1000 кг/м^3, давление на сливе $p_с$ = 0,3 МПа.



Определим давление, которое создает сила F в правой части гидроцилиндра:

$$p = \frac{4F}{\pi(D^2 - d_ш^2)} = \frac{4 \cdot 45000}{3{,}14(0{,}09^2 - 0{,}03^2)} = 7961783 \text{ Па}$$

Перепад давлений на дросселе Δp будет равен:

$$\Delta p = p - p_с = 7961783\text{-}300000\text{=}7661783 \text{ Па.}$$

Расход жидкости, протекающей через дроссель:

$$Q = \upsilon S = \upsilon \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = 0{,}4 \cdot \frac{3{,}14 \cdot (0{,}09^2 - 0{,}03^2)}{4} = 2{,}26 \frac{л}{с}.$$

Площадь сечения дросселя S будет равна:

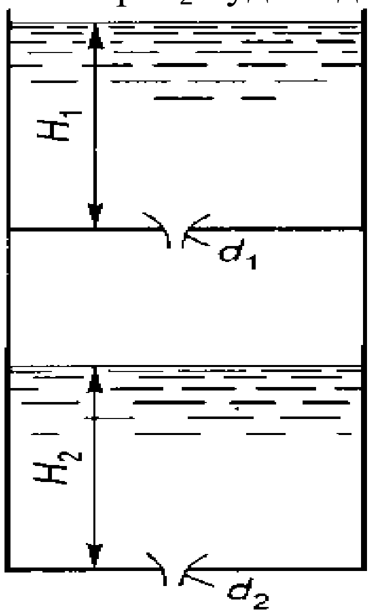
$$S = \frac{Q}{\mu\sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta p}} = \frac{0{,}00226}{0{,}65 \cdot \sqrt{\frac{2}{1000} \cdot 7661783}} = 2{,}8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Тогда диаметр отверстия дросселя:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}8 \cdot 10^{-5}}{3{,}14}} = 5{,}9 \text{ мм.}$$

Задача №5. В первый сосуд поступает вода с расходом Q = 0,46 л/с, которая затем перетекает через малое отверстие в дне диаметром d_1= 12 мм во второй сосуд, имеющий также малое отверстие в дне диаметром d_2= 17 мм. Коэффициент расхода μ = 0,75.

Определить:
а) напоры H_1 и H_2 в обоих сосудах;
б) при каком диаметре d` напор H_2 будет вдвое меньше, чем H_1.



а) Определим в обоих сосудах напоры H_1 и H_2, при которых расходы Q_1 и Q_2 станут равными притоку воды Q = 0,46 л/с:

$$Q_1 = \mu \cdot S_1 \cdot \sqrt{2gH_1}$$

$$Q_2 = \mu \cdot S_2 \cdot \sqrt{2gH_2}$$

Тогда:

$$H_1 = \frac{Q_1^2}{(\mu \cdot S_1)^2 \cdot 2g} = \frac{(0{,}46 \cdot 10^{-3})^2}{\left(0{,}75 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}012^2}{4}\right)^2 \cdot 2 \cdot 9{,}8} = 153 \text{ см.}$$

$$H_2 = \frac{Q_1^2}{(\mu \cdot S_2)^2 \cdot 2g} = \frac{(0{,}46 \cdot 10^{-3})^2}{\left(0{,}75 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}017^2}{4}\right)^2 \cdot 2 \cdot 9{,}8} = 37 \text{ см.}$$

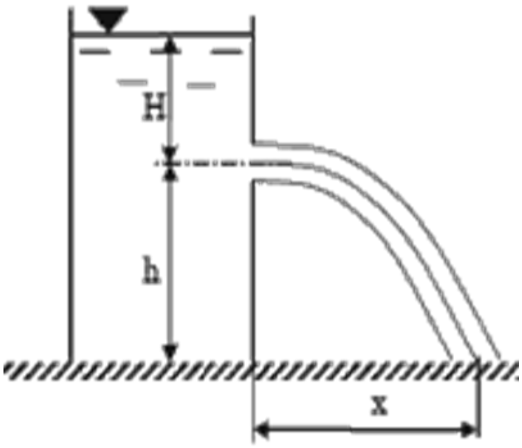
б) Находим диаметр d`, при котором H_2 = 0,5 H_1 = 0,5*152 = 76 см.

$$S_2 = \frac{Q}{\mu\sqrt{2gH_2}} = \frac{0{,}46 \cdot 10^{-3}}{0{,}75 \cdot \sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}76}} = 1{,}6\ \text{см}^2.$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d`^2}{4}$$

$$d` = \sqrt{\frac{4 \cdot S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}6}{3{,}14}} = 1{,}43\ \text{см}.$$

Задача №6. Из отверстия диаметром d=5 см в тонкой стенке резервуара вытекает вода, имеющая температуру t=15 ℃. Отверстие расположено на высоте h=10 м над поверхностью земли. Постоянный напор воды в резервуаре H=4,5 м. Определить расход и скорость истечения, а также расстояния x, на котором струя коснется поверхности земли.



Коэффициент кинематической вязкости для воды определяем по таблице 5.1 (при t = 15 °C), $\nu = 1{,}16 \cdot 10^{-6}$ м^2/с.

Определяем число Рейнольдса, характеризующее истечение без учета коэффициента скорости φ:

$$R_e = \frac{\text{v}d}{\nu} = \frac{d\sqrt{2g\text{H}}}{\nu} = \frac{0{,}05\sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 4{,}5}}{1{,}16 \cdot 10^{-6}} = 404741.$$

Коэффициент расхода через малое отверстие в тонкой стенке при числах Рейнольдса Re>10000, определим по формуле:

$$\mu = 0{,}592 + \frac{5{,}5}{\sqrt{Re}} = 0{,}592 + \frac{5{,}5}{\sqrt{404741}} = 0{,}6.$$

Расход воды через отверстие:

$$\mathrm{Q} = \mu S\sqrt{2gH} = 0{,}6 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}05^2}{4}\sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 4{,}5} = 11{,}06\,\frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Скорость истечения воды через отверстие:

$$\mathrm{v} = \frac{4Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0{,}01106}{3{,}14 \cdot 0{,}05^2} = 5{,}6\,\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Коэффициент скорости истечения через отверстие:

$$\varphi = \frac{\mathrm{v}}{\sqrt{2gH}} = \frac{5{,}6}{\sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot 4{,}5}} = 0{,}59.$$

Дальность полета струи:

$$\mathrm{x} = \sqrt{4h\varphi^2 H} = \sqrt{4 \cdot 10 \cdot 0{,}59^2 \cdot 4{,}5} = 7{,}9\text{м}.$$

7.4 Контрольные вопросы

1. При выполнении какого условия отверстие называют малым?

2. В чем физический смысл коэффициента скорости?

3. Какова зависимость коэффициентов сжатия, скорости и расхода от числа Рейнольдса?

4. Чем отличается формула расхода жидкости для незатопленного и затопленного отверстия?

8. Практическое занятие №8. Гидравлический расчет трубопроводов

8.1 Тип трубопроводов и их классификация

Все трубопроводы можно разделить на гидравлически длинные и гидравлически короткие в зависимости от величины местных потерь.

Трубопроводы, у которых основными потерями являются потери по длине, а местными потерями и скоростным напором можно пренебречь, называются гидравлически длинными трубопроводами. В отдельных случаях местные потери, составляющие 10 – 15 % потерь напора по длине, могут быть учтены соответствующим коэффициентом. При расчетах длинных трубопроводов находят потери напора по длине $h_{дл}$, а местные потери напора учитывают, увеличивая $h_{дл}$ на 5 – 10 %.

Трубопроводы, у которых местные потери напора и скоростной напор соизмеримы с потерями напора по длине (более 10 %), называются гидравлически короткими трубопроводами.

Водопроводные сети рассчитываются как гидравлически длинные трубопроводы, а всасывающие линии насосов (сифоны) – как гидравлически короткие.

Кроме этого трубопроводы делятся на простые и сложные. Простые трубопроводы не имеют ответвлений и состоят из труб одинакового диаметра, выполненных из одного материала. Они могут соединяться между собой как последовательно (простой трубопровод переменного сечения), так и параллельно. Трубопровод, содержащий как последовательные, так и параллельные соединения труб, называется сложным.

Жидкость движется по трубопроводу благодаря тому, что ее энергия в начале трубопровода больше, чем в конце. Эта разность энергий достигается тем или иным способом: работой насоса, давлением газа или благодаря разности уровней жидкости.

В общем случае при расчете трубопровода определению подлежат диаметр трубопровода и напор в его начальном сечении.

8.2 Расчет простых трубопроводов

По определяемым параметрам и методике расчета простых трубопроводов задачи делят на три группы:

- при известном диаметре d, длине ℓ и заданном расходе Q требуется определить напор;
- определить расход Q, зная действующий напор H и параметры трубопровода;
- определить диаметр трубопровода, если известен действующий напор H, расход Q и длина водопровода ℓ.

Во всех трех случаях известны плотность жидкости, кинематическая вязкость и шероховатость стенок трубопровода.

Рассмотрим расчет простого трубопровода при установившемся истечении жидкости в атмосферу (рис. 8.1).

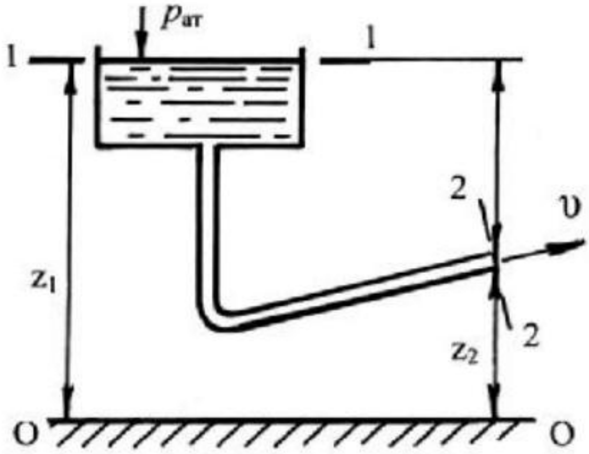


Рис. 8.1 – Схема истечения жидкости в атмосферу

Составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 \times \upsilon_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \times \upsilon_2^2}{2g} + h_{тр} \qquad (8.1)$$

Напор, который нужно создать для течения жидкости самотеком, будет равен разности геометрических высот z_1 и z_2. Будем называть его действующим напором $H_{дейст}$.:

$H_{дейст.} = z_1 - z_2 = \Delta z$.

Скорость υ_1 в сечении 1-1 очень мала, поэтому примем ее равной нулю.

Тогда:

$$\text{H}_{\text{действ.}} = \frac{\alpha_2 \times v_2^2}{2g} + h_{\text{тр}} \qquad 8.2)$$

Сумма потерь напора $h_{\text{тр}}$ по длине трубопровода при ламинарном режиме движения жидкости будет определяться по формуле Пуазейля:

$$h_{\text{тр.}} = \frac{128\nu l}{\pi g d^4} Q \qquad 8.3)$$

Формула (8.3) отражает только потери по длине. Дело в том, что местные потери напора при ламинарном режиме невелики, и их заменяют эквивалентными длинами сопротивлений по длине потока.

При турбулентном режиме движения потери напора будут равны сумме потерь напора по длине потока и потерь напора в местных сопротивлениях:

$$h_{\text{тр.}} = \Sigma h_{\text{дл}} + \Sigma h_{\text{м}} = \lambda_{\text{т}} \frac{l}{d}\frac{v^2}{2} + \zeta_{\text{м}} \frac{v^2}{2g} = (\lambda_{\text{т}} \frac{l}{d} + \zeta_{\text{м}}) \frac{\alpha v^2}{2g} \qquad (8.4)$$

Подставим в уравнение (8.4) скорость, выраженную из уравнения расхода:

$$h_{\text{тр.}} = (\lambda_{\text{т}} \frac{l}{d} + \zeta_{\text{м}}) \frac{8Q^2}{\text{п}\pi^2 d^4} \qquad 8.5)$$

Данная задача сводится к определению расхода жидкости Q, поскольку остальные члены уравнений (8.1) или (8.5) известны и имеют численное значение. Обозначим их буквой К. Тогда при любом режиме движения при истечении жидкости самотеком в атмосферу действующий напор $\text{H}_{\text{действ.}}$ будет равен сумме скоростного напора и суммарных потерь напора:

$$\text{H}_{\text{действ.}} = \frac{\alpha \times v^2}{2g} + KQ^m \qquad 8.6)$$

где К и m – величины, зависящие от режима течения жидкости в трубопроводе и характеристик местных сопротивлений.

Степень m при ламинарном течении равна единице (m = 1), а при турбулентном – двум (m = 2). Поэтому говорят, что при ламинарном течении жидкости потери напора носят линейный характер, а при турбулентном – квадратичный.

Итак, действующий напор при истечении в атмосферу расходуется на создание кинетической энергии потока на выходе (которую можно использовать, например, в турбинах), и на преодоление потерь напора.

8.3 Примеры решения задач

Задача №1. По трубопроводу диаметром d = 20 мм и длиной ℓ = 30 м подается жидкость с вязкостью ν = 0,0001 м^2/с под действием перепада давления Δр = 3,2 МПа; плотность ρ=900 кг/м^3. Определить режим течения жидкости в трубопроводе.

Определим расход жидкости в трубопроводе. Поскольку потери в трубопроводе будут равны разности пьезометрических высот, то с учётом формулы Пуазейля:

$$h_{\text{дл}} = \frac{128 \cdot \nu \cdot L \cdot Q}{\pi \cdot g \cdot d^4} = \frac{\text{p}_1 - \text{p}_2}{\rho \cdot g} = \frac{\Delta\text{p}}{\rho g}$$

откуда:

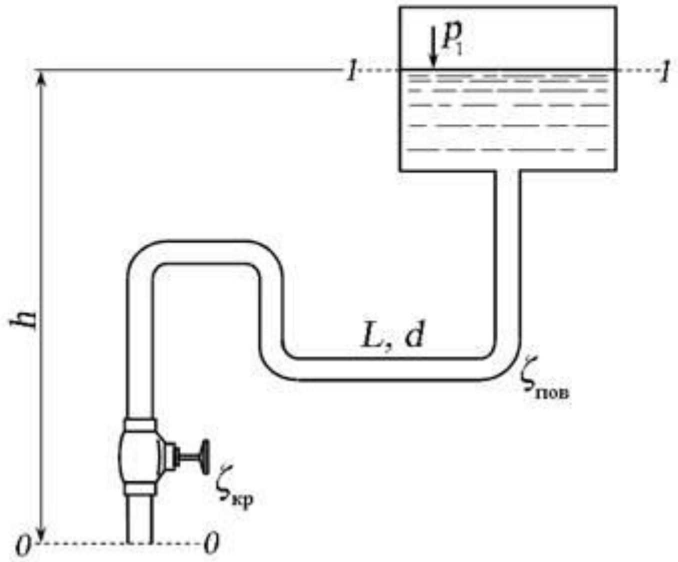
$$Q = \frac{\Delta\text{p} \cdot \pi \cdot d^4}{128 \cdot \nu \cdot L \cdot \rho} = \frac{3200000 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}02^4}{128 \cdot 0{,}0001 \cdot 30 \cdot 900} = 4{,}7\,\frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Теперь определим критический расход $Q_{\text{кр}}$ при критическом значении числа Рейнольдса Re = 2300:

$$Q_{\text{кр}} = \frac{\pi \cdot d \cdot \nu \cdot Re_{\text{кр}}}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}02 \cdot 0{,}0001 \cdot 2300}{4} = 3{,}6\,\frac{\text{л}}{\text{с}}.$$

Поскольку $Q>Q_{\text{кр}}$, значит, режим течения жидкости - турбулентный.

Задача №2. Определить потребный напор, который необходимо создать в сечении О-О для подачи в бак жидкости с вязкостью ν = 0,008 Ст, если длина трубопровода ℓ=60 м; его диаметр d=70 мм; расход жидкости Q=10 л/с; высота h=40 м; давление в баке p_1=0,3 МПа; коэффициент сопротивления крана $\zeta_{\text{кр}}$=5; колена $\zeta_{\text{пов}}$=0,8; поток жидкости при истечении в бак претерпевает внезапное расширение ($\zeta_{\text{расш}}$=1), шероховатость стенок трубы Δ=0,04 мм. Плотность жидкости ρ=900 кг/м^3.



Составим уравнение Бернулли для сечений *0 - 0* и *1 - 1* относительно плоскости сравнения, совпадающего с сечением *0 - 0*:

$$0+\frac{p_0}{\rho g}+\alpha_0\cdot\frac{v_0^2}{2g}=h+\frac{p_1}{\rho g}+0+h_{пот}$$

$$H_{потр}=\frac{p_0}{\rho g}$$

$$H_{потр}=h+\frac{p_1}{\rho g}-\alpha_0\cdot\frac{v_0^2}{2g}+h_{пот}$$

Определим число Рейнольдса:

$$Re=\frac{v_0\cdot d}{\nu}=\frac{4Q}{\pi d\nu}=\frac{4\cdot 10\cdot 10^{-3}}{3{,}14\cdot 0{,}07\cdot 0{,}008\cdot 10^{-4}}=227479$$

Поскольку режим течения турбулентный ($\alpha_0=1$), то потери напора по длине определим по формуле Дарси - Вейсбаха:

$$h_{дл}=\lambda\frac{L}{d}\cdot\frac{v_0^2}{2g}$$

Для определения потерь напора по длине определим скорость v_0 течения жидкости и коэффициент гидравлического трения λ:

- скорость течения жидкости

$$v_0=\frac{4Q}{\pi d^2}=\frac{4\cdot 10\cdot 10^{-3}}{3{,}14\cdot 0{,}07^2}=2{,}6\text{ м/с}.$$

- коэффициент λ по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0{,}11 \cdot (\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\mathrm{R_e}})^{0{,}25}$$

$$\lambda = 0{,}11 \cdot \left(\frac{0{,}04}{70} + \frac{68}{227479}\right)^{0{,}25} = 0{,}02.$$

Тогда потери по длине:

$$h_{дл} = 0{,}02 \cdot \frac{60}{0{,}07} \cdot \frac{2{,}6^2}{2 \cdot 9{,}8} = 5{,}9 \text{ м.}$$

Местные потери напора (с учетом внезапного расширения $\zeta_{расш}$=1) будут равны:

$$\sum h_{м} = \left(\xi_{кр} + 4\xi_{пов} + \xi_{расш}\right)\frac{\upsilon_0^2}{2g}$$

$$\sum h_{м} = (5 + 4 \cdot 0{,}8 + 1) \cdot \frac{2{,}6^2}{2 \cdot 9{,}8} = 3{,}17 \text{ м.}$$

Общие потери напора:

$$h_{пот} = h_{дл} + \sum h_{м} = 5{,}9 + 3{,}17 = 9{,}07\text{м.}$$

Тогда потребный напор равен:

$$H_{потр} = 40 + \frac{300000}{900 \cdot 9{,}8} - 1 \cdot \frac{2{,}6^2}{2 \cdot 9{,}8} + 9{,}07 = 82{,}7\text{м.}$$

8.4 Контрольные вопросы

1. В чем разница между простым и сложным трубопроводом?
2. Сформулируйте три задачи при расчете установившегося напорного движения в простых трубопроводах.
3. На основе каких уравнений решаются указанные основные задачи?
4. Как выражается напор при истечении в атмосферу и под уровень?
5. Что такое характеристика потребного напора?
6. В чем отличие характеристики потребного напора при ламинарном и турбулентном режимах движения жидкости?
7. В чем отличие определения расхода и потерь напора при различных соединениях простых трубопроводов?

8. По какому методу рассчитывают сложные трубопроводы?
9. Определите цель расчета трубопровода с насосной подачей.
10. Что такое рабочая точка насосного трубопровода?

9. Практическое занятие №9. Основы гидропневмопривода

9.1 Общие сведения

Гидравлическим (пневматическим) приводом называется совокупность гидравлических (пневматических) машин, аппаратов и линий, служащих для передачи энергии и преобразовании движения выходного звена посредством рабочей среды (жидкости в гидроприводе и сжатого воздуха в пневмоприводе).

Основная функция гидропривода, как и механической передачи, — преобразование механической характеристики приводного двигателя в соответствии с требованиями нагрузки (преобразование вида движения выходного звена двигателя, его параметров, а также регулирование, защита от перегрузок и др.). Другая функция гидропривода – это передача мощности от приводного двигателя к рабочим органам машины.

Практически нет такой области деятельности человека, где бы не использовались гидравлические или пневматические системы. Это станкостроение, строительное и дорожное машиностроение, судостроение, металлургия и автомобилестроение, пищевая промышленность и т. д. Современное развитие техники позволяет более широко внедрять гидравлические и пневматические приводы. Например, если до недавнего времени в автомобилестроении применение гидро- и пневмосистем ограничивалось в основном тормозной системой, системой охлаждения, системами смазки и подачи топлива, то в настоящее время появился целый ряд гидропневмосистем. Это гидравлическое переключение скоростей в механической коробке передач, регулирование уровня дорожного просвета, гидравлическая регулировка света фар, гидроусилитель руля, система экстренного торможения и т. д.

9.2 Гидравлический привод

Широкое применение гидроприводов объясняется рядом их существенных преимуществ перед другими типами приводов.

К основным преимуществам гидропривода относятся:

- возможность универсального преобразования механической характеристики приводного двигателя в соответствии с требованиями нагрузки;
- простота управления и автоматизации;
- простота предохранения приводного двигателя и исполнительных органов машин от перегрузок;
- надёжность эксплуатации;
- широкий диапазон бесступенчатого регулирования скорости выходного звена;
- большая передаваемая мощность на единицу массы привода;
- возможность получения больших сил и мощностей при малых размерах и весе передаточного механизма;
- простота осуществления различных видов движения — поступательного, вращательного, поворотного;
- возможность частых и быстрых переключений при возвратно-поступательных и вращательных прямых и реверсивных движениях;
- возможность равномерного распределения усилий при одновременной передаче на несколько приводов;
- упрощённость компоновки основных узлов гидропривода внутри машин и агрегатов, в сравнении с другими видами приводов.

К недостаткам гидропривода относятся:

- утечки рабочей жидкости через уплотнения и зазоры, особенно при высоких значениях давления в гидросистеме, что требует высокой точности изготовления деталей гидрооборудования;
- нагрев рабочей жидкости при работе, что приводит к уменьшению вязкости рабочей жидкости и увеличению утечек, поэтому в ряде случаев необходимо применение специальных охладительных устройств и средств тепловой защиты;
- более низкий КПД чем у сопоставимых механических передач;
- необходимость обеспечения в процессе эксплуатации чистоты рабочей жидкости, поскольку наличие большого количества абразивных частиц в рабочей жидкости приводит к быстрому износу деталей гидрооборудования, увеличению зазоров и утечек через

них, и, как следствие, к снижению объёмного КПД;

- необходимость защиты гидросистемы от проникновения в неё воздуха, наличие которого приводит к нестабильной работе гидропривода, большим гидравлическим потерям и нагреву рабочей жидкости;
- пожароопасность в случае применения горючих рабочих жидкостей, что налагает ограничения;
- зависимость вязкости рабочей жидкости, а значит и рабочих параметров гидропривода, от температуры окружающей среды;
- в сравнении с пневмо- и электроприводом — невозможность эффективной передачи гидравлической энергии на большие расстояния вследствие больших потерь напора в гидролиниях на единицу длины.

Гидравлические приводы реализуют свою работу за счет энергии потока рабочей жидкости. Удельная энергия потока жидкости (энергия единицы веса объема жидкости) определяется уравнением Бернулли. Передачу энергии жидкостью можно осуществлять путем изменения любого из членов этого уравнения.

В зависимости от вида используемой в гидромашинах энергии гидравлические приводы делят на гидростатические (объемные) и гидродинамические.

- В гидродинамических приводах используется в основном кинетическая энергия потока жидкости (и соответственно скорости движения жидкостей в гидродинамических приводах велики в сравнении со скоростями движения в объёмном гидроприводе).
- В объёмных гидроприводах используется потенциальная энергия давления рабочей жидкости (в объёмных гидроприводах скорости движения жидкостей невелики — порядка 0,5–6 м/с).

Объёмный гидропривод – это гидропривод, в котором используются объёмные гидромашины (насосы и гидродвигатели). Объёмной называется гидромашина, рабочий процесс которой основан на попеременном заполнении рабочей камеры жидкостью и вытеснении её из рабочей камеры.

Одна из особенностей, отличающая объёмный гидропривод от гидродинамического, – большие давления в гидросистемах. Так, номинальные давления в гидросистемах экскаваторов могут достигать 32 МПа, а в некоторых случаях рабочее давление может быть более 300 МПа, в то время как гидродинамические машины работают обычно при давлениях, не превышающих 1,5—2 МПа.

Объёмный гидропривод намного более компактен и меньше по массе, чем гидродинамический, и поэтому он получил наибольшее распространение.

9.3 Примеры решения задач

Задача №1. Рассчитать параметры и выбрать гидроцилиндр при следующих исходных данных: цилиндр работает на растяжение; R = 7 кН; v = 0,2 м/с.

Мощность гидроцилиндра определяется по формуле:

$$N_{ц} = R \cdot v = 7000 \cdot 0{,}2 = 1400 \text{ Вт}.$$

где $N_{ц}$ – мощность гидроцилиндра, Вт;

R – усилие на штоке, Н;

v – максимальная скорость перемещения штока, м/с.

Для определения оптимального давления можно воспользоваться табл. 9.1, устанавливающей зависимость рабочего давления от мощности гидропривода. При этом следует учитывать, что величина рабочего давления может быть взята только из ряда номинальных давлений (см. табл. 9.2).

Таблица 9.1 – Зависимость рабочего давления от мощности гидропривода

Мощность *N*, кВт	до 0,1	0,1 - 1	1 - 5	5 - 20	свыше 20
Давление *P*, МПа	1	1 - 6,3	6,3 - 10	10 - 16	16 - 25

Таблица 9.2 – Ряд номинальных давлений (МПа) гидроцилиндров общего назначения по ГОСТ 6540-68

2,5; 6,3; 10,0; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63

По данным табл. 9.1 и 9.2 принимаем $P_{ц}' = 6{,}3$ МПа.

Определяем расчетный диаметр цилиндра по формуле:

$$D^{`} = \sqrt{\frac{4k \cdot R}{\pi \cdot P_{ц}^{`}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}2 \cdot 7000}{3{,}14 \cdot 6300000}} = 0{,}041\text{м.}$$

где k — коэффициент запаса, учитывающий потери на трение в гидроцилиндре (k = 1,2);

По данным табл. 9.3 принимаем стандартный диаметр цилиндра D = 40 мм.

Таблица 9.3 – Стандартные диаметры цилиндров (мм) по ГОСТ 6540-68

10;12;16;20;25;32;36;40;45;50;56;63;70;80;90;100;110;125;140;160; 180; 200;220;250;280;320;360;400

Назначается стандартный диаметр штока (табл.9.4), который должен удовлетворять условию d/D = (0,6 – 0,4).

Таблица 9.4 – Стандартные диаметры штоков (мм) по ГОСТ 6540-68

4;5;6;8;10;12;14;16;18;20;22;25;28;32;36;40;45;50;56;63;70;80;90;100;110;125;140;160;180;200;220;250

По данным табл. 9.4 принимаем стандартный диаметр штока d =20 мм.

Уточняем рабочее давление гидроцилиндра по формуле:

$$P_{ц} = \frac{4k \cdot R}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 1{,}2 \cdot 7000}{3{,}14 \cdot 0{,}04^2} = 6687898\text{Па.}$$

Определяем расход жидкости, необходимый для перемещения штока с заданной скоростью, по формуле:

$$Q_{ц1} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot v}{4 \cdot \eta_{оц}} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}04^2 \cdot 0{,}2}{4 \cdot 0{,}9} = 2{,}79 \cdot 10^{-4}\text{м}^3/\text{с.}$$

где $\eta_{оц}$ – объёмный КПД гидроцилиндра. Для современных гидроцилиндров можно принять $\eta_{оц}$ = 0,90 – 0,99.

Задача №2. Рассчитать параметры и выбрать гидромотор (поршневой) при следующих исходных данных: М = 40 Н·м; n = 23 с$^{-1}$.

Определяем мощность гидромотора по формуле:

$$N_м = М \cdot 2\pi \cdot n = 40 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 23 = 5780 Вт.$$

где М — максимальный момент на валу гидромотора, Н·м;
n —максимальная частота вращения вала, об/с.
По данным табл. 9.1 и 9.5 принимаем $Р_м' = 10$ МПа.

Таблица 9.5 – Ряды номинальных давлений гидромоторов (МПа)

Поршневых по ГОСТ 14062-68	6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40
Шестерённых по ГОСТ 14060-68	2,5; 6,3; 10; 16; 20

Рассчитываем предварительный рабочий объем гидромотора по формуле (см^3):

$$q_м^` = \frac{2\pi \cdot M \cdot 10^6}{P_м^` \cdot \eta_{мм}} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 40 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6 \cdot 0{,}9} = 27{,}9 \text{ см}^3.$$

где $q_м'$ – предварительный рабочий объем гидромотора, см^3;
М — максимальный момент на валу гидромотора, Н·м;
$Р_м'$ – предварительный перепад давления на гидромоторе, Па;
$\eta_{мм}$ – механический КПД гидромотора. Предварительно $\eta_{мм}$ можно принять равным $\eta_{мм} = 0{,}8 – 0{,}96$.

Полученное значение $q_м'$ округляется до ближайшего стандартного $q_м$=28 см^3 из табл. 9.6.

Таблица 9.6 – Номинальный рабочий объем $q_м$ (см^3) гидромоторов по ГОСТ 14060-68 и 14062-62

1,00; 1,25; 1,60; 2,00; 2,50; 3,20; 4,00; 5,00; 6,30; 8,00; 9,00; 10,0; 11,2; 12,5; 14,0; 16,0; 18,0; 20,0; 22,4; 25,0; 28,0; 32,0; 36,0; 40,0; 45,0; 50,0; 56,0; 63,0; 70,0; 80,0; 90,0; 100; 112; 125; 140; 160; 180; 200; 224; 250; 280; 320; 360; 400; 450; 500

Уточняем перепад давления на гидромоторе по формуле:

$$P_м = \frac{2\pi \cdot M \cdot 10^6}{q_м \cdot \eta_м} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 40 \cdot 10^6}{28 \cdot 0{,}8} = 11214286 Па.$$

где $\eta_м$ - полный КПД гидромотора. Можно принять $\eta_м = 0{,}80 – 0{,}85$.

Рассчитываем расход жидкости, поступающий в гидромотор, по формуле:

$$Q_м = \frac{q_м \cdot n}{\eta_{ом} \cdot 10^6} = \frac{28 \cdot 23}{0{,}9 \cdot 10^6} = 7{,}16 \cdot 10^{-4} м^3/с.$$

где $\eta_{ом}$ - объёмный КПД гидромотора. Можно принять $\eta_{ом}$ = 0,90 – 0,95.

9.4 Контрольные вопросы

1. Перечислите преимущества и недостатки объемного гидропривода.
2. В чем отличие объемного и гидродинамического приводов?
3. Почему увеличение мощности объемного гидропривода осуществляется только за счет увеличения давления?
4. Что такое напор насоса?
5. Расскажите принцип работы гидродинамической передачи.
6. Когда кинетическая энергия потока жидкости в гидродинамической передаче используется полностью?
7. Расскажите о достоинствах пневматического привода.
8. Как определяется энергия сжатого воздуха в резервуаре?
9. Что такое политропный процесс изменения состояния газа (воздуха)?

Библиографический список

1. Башта М. и др. Гидравлика, гидромашины, гидроприводы, - М.: Машиностроение, 1982 г. - 423 с.

2. Стесин С. П. и др. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод, - М.: Академия, 2005 г. – 336 с.

3. Лепешкин А. В. Гидравлические и пневматические системы, - М.: Академия, 2005 г. – 336 с.

4. Некрасов Б. Б. и др. Задачник по гидравлике, гидромашинам и гидроприводу, - М.: Высшая школа, 1989 г. – 192 с.

5. Гидравлика с примерами решения задач. Ч. 1 [Текст]: учебно-методическое пособие / О. В. Ворожцов; М-во образования и науки Российской Федерации, Псковский гос. ун-т. - Псков: Псковский гос. ун-т, 2015. - 95 с.

6. Чугаев, Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник для вузов / Р. Р. Чучаев. – Изд. 6-е, репринтное. – Москва: Бастет, 2013. – 672 с. – Текст: непосредственный.

7. Лапшев, Н. Н. Гидравлика: учебник / Н. Н. Лапшев. – 3-е изд., стер. – М.: Академия, 2010. – 272 с. – Текст: непосредственный.

8. Калицун, В. И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: учебное пособие / В. И. Калицун, В. С. Кедров, Ю. М. Ласков. – 4-е изд, перераб, и доп. – М.: Стройиздат, 2003. – 397 с. – Текст: непосредственный.

9. Механика жидкости и газа: спецглавы: учебное пособие / В. Е. Щерба, В. В. Шалай, Е. А. Павлюченко, Е. Ю. Носов; Омский государственный технический университет. – Омск: Омский государственный технический университет (ОмГТУ), 2020. – 92 с. – URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=682341 (дата обращения: 03.09.2021). – Режим доступа: по подписке. – Текст: электронный.

10. Метревели, В. Н. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями: учебное пособие / В. Н. Метревели. – М.: Высшая школа, 2007. – 192 с. – Текст: непосредственный.

11. Альтшуль, А. Д. Примеры расчетов по гидравлике: учебное пособие / А. Д. Альтшуль, В. И. Колицун, Ф. Г.

Майоровский и др. – М.: Стройиздат, 1976. - 255 с. – Текст: непосредственный.

12. Механика жидкости и газа: методические указания к выполнению практических работ для студентов по направлению подготовки 08.03.01 – Строительство / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. Т. В. Поливанова. - Курск: ЮЗГУ, 2022. - 30 с.

13. Полищук, В. Г. Механика жидкостей и газа: учебное пособие: [для студентов, обучающихся по направлению 08.03.01] / В. Г. Полищук, А. И. Поздняков; Юго - Зап. гос. ун-т. - Курск: 2017. - 123 с. – Текст: электронный.