

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич
Должность: ректор
Дата подписания: 05.00.2023 10:30:26
Уникальный программный ключ:
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

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

Кафедра теплогазоснабжения

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
« 20 » 05 2022 г.



Механика жидкости и газа

Методические указания к выполнению практических работ
для студентов по направлению подготовки 08.03.01 –
Строительство

Курск 2022

УДК 696/2/(075/8)

Составитель: Т.В. Поливанова

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Е.В. Умеренков

Механика жидкости и газа методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Механика жидкости и газа» для студентов очной, очно-заочной и заочной форм обучения направления подготовки 08.03.01 – Строительство / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. Т.В. Поливанова - Курск, 2022 - 30 с. - Библиогр.: с. 30.

Методические указания содержат материалы для проведения практических занятий по темам дисциплины «Механика жидкости и газа»: гидростатика; гидродинамика; потери напора; Режимы движения жидкостей.

Методические указания предназначены для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 08.03.01 Строительство.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 2022 г. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд.л. 1,1 Тираж 30 экз. Заказ 1894. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

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.

Тема 1. Свойства жидкостей

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).

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 т. a жидкости плотность распределения массы равна:

$$\rho_a = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta W}, \quad (1.1)$$

где Δm – масса, заключенная в объеме ΔW , стягиваемом в точку a .

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

$$\rho = m/W \quad (1.2)$$

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 :

$$\gamma = \frac{G}{W} = \frac{mg}{W} = \rho g.$$

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:

$$\beta_p = -\frac{1}{W} \times \frac{dW}{dp}. \quad (1.3)$$

где W – первоначальный объем жидкости; dW – относительное изменение объема жидкости при изменении давления на величину dp .

Температурное расширение. Это свойство жидкостей изменять объем при изменении температуры; характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения β_t ($1/^\circ\text{C}$), представляющим собой относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на единицу (1°C) и при постоянном давлении:

$$\beta_t = \frac{1}{W} \times \frac{dW}{dt}, \quad (1.4)$$

где W – первоначальный объем жидкости; dW – относительное изменение объема жидкости при повышении температуры на dt .

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:

$$W_{\Gamma} = k_{\Gamma} W_{\text{ж}} \frac{p}{p_0}, \quad (1.5)$$

где W_{Γ} – объем растворенного газа, отнесенный к нормальным условиям (p_0 , t_0); $W_{\text{ж}}$ - объем жидкости; p - давление жидкости; p_0 - эталонное давление (например, атмосферное); k_{Γ} - 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 уравниваются, 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.

Примеры решения задач

1. Сосуд заполнен водой, занимающей объем $W_1 = 2 \text{ м}^3$. На сколько уменьшится и чему будет равен этот объем при увеличении давления на величину на величину 200 бар при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$? Модуль объемной упругости для воды при данной температуре $E_0 = 2110 \text{ МПа}$.

Изменение объема жидкости определим по формуле:

$$\Delta W = -\beta_p W \Delta p.$$

Коэффициент объемного сжатия определим из уравнения:

$$\beta_p = \frac{1}{E_0} = \frac{1}{2110 \times 10^6} = 4,74 \times 10^{-10} \text{ 1/Па}$$

Увеличение давления $\Delta p = 200 \text{ бар} = 20 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

Тогда: $\Delta W = 4,74 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 20 \cdot 10^6 = 0,019 \text{ м}^3$.

Искомый объем будет равен:

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

2. Плотность масла АМГ-10 при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет 850 кг/м^3 . Определить плотность масла при повышении температуры до $60 \text{ }^\circ\text{C}$ и увеличении давления с атмосферного ($p_1 = 0,1 \text{ МПа}$) до $p_2 = 8,7 \text{ МПа}$. Модуль объемной упругости масла $E_0 = 1305 \text{ МПа}$, температурный коэффициент $\beta_t = 0,0008 \text{ 1/град}$.

Плотность масла при повышении температуры до значения $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ вычислим по формуле:

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

Плотность масла при повышении давления до значения $p_2 = 8,7 \text{ МПа}$ вычисляем по формулам:

$$\rho_{II} = \frac{\rho_1}{1 - \beta_p \Delta p} = \frac{\rho_1}{1 - (p_2 - p_1)/E_0} = \frac{823,6}{1 - 8,6 \times 10^6 / 1305 \times 10^6} = 823,6 \text{ кг/м}^3$$

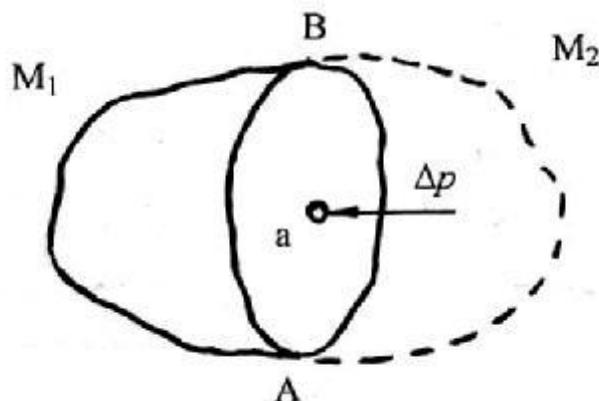
Контрольные вопросы.

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?

Тема 2. Гидростатическое давление

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).



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 Δp будет равномерно распределена по площади сечения ΔS . Тогда отношение

$$p_{\text{ср}} = \Delta p / \Delta S, \quad (2.1)$$

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

2.1. 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_0 (рис.2.1).

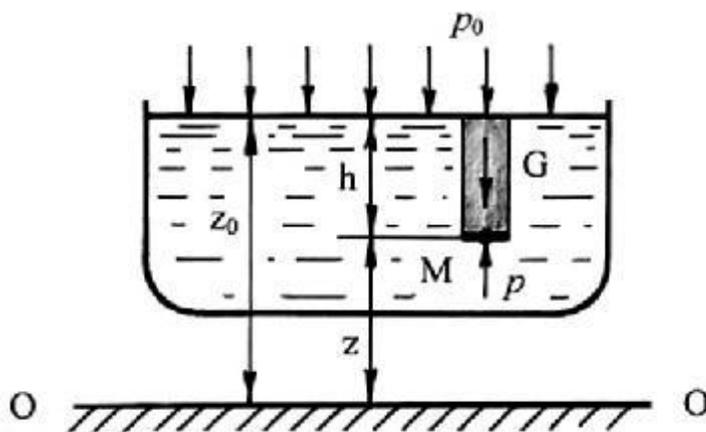


Рис 2.1 Схема для вывода основного уравнения гидростатики

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:

$$G = Mg = \rho \cdot g \cdot h \cdot dS. \quad (2.1)$$

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

$$pdS - p_0 dS - \rho gh dS = 0$$

После сокращения выражения на dS и перегруппировки членов получим:

$$p = p_0 + \rho gh = p_0 + \gamma h. \quad (2.2)$$

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

Из уравнения (2.4) видно, что давление p_0 , 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.

После несложных преобразований получим основное уравнение

гидростатики для двух точек одного и того же объема покоящейся жидкости:

$$z_0 + \frac{\rho_0}{\rho g} = z + \frac{\rho}{\rho g}. \quad (2.3)$$

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

$$z + \frac{\rho}{\rho g} = \text{const} \quad (2.4)$$

Таким образом, по формуле (2.4) в покоящейся жидкости в точке, находящейся на глубине h под свободной поверхностью, давление равно сумме внешнего давления p_0 и весового давления ρhg .

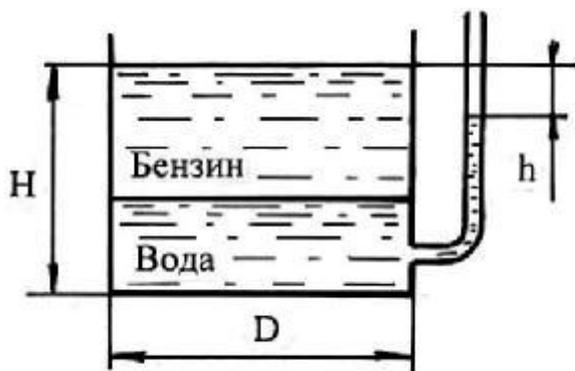
Примеры решения задач

При решении задач по гидростатике необходимо различать такие понятия, как давление p и сила F .

Применяя основное уравнение гидростатики нужно помнить, что второй член в правой части уравнения может быть как положительным, так и отрицательным. Необходимо также твердо различать давления абсолютное, избыточное и вакуумметрическое, а также весовое давление жидкости.

При решении задач, в которых даны поршни или системы поршней, следует писать уравнение равновесия, то есть равенство нулю суммы всех сил, действующих на поршень или систему поршней. В задачах на относительный покой жидкости следует учитывать повышение давления за счет силы инерции переносного движения.

1. В цилиндрический бак диаметром 2 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 $\rho_6 = 700 \text{ кг/м}^3$.



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

$$\rho_{\text{в}}gh_{\text{в}} + \rho_{\text{б}}gh_{\text{б}} = \rho_{\text{в}}g(H - h).$$

Поскольку в этом уравнении есть два неизвестных, выразим $h_{\text{в}} = H - h_{\text{б}}$, и подставим:

$$\rho_{\text{в}}g(H - h_{\text{б}}) + \rho_{\text{б}}gh_{\text{б}} = \rho_{\text{в}}g(H - h).$$

После сокращения получим:

$$h_{\text{б}}(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{б}}) = \rho_{\text{в}}h.$$

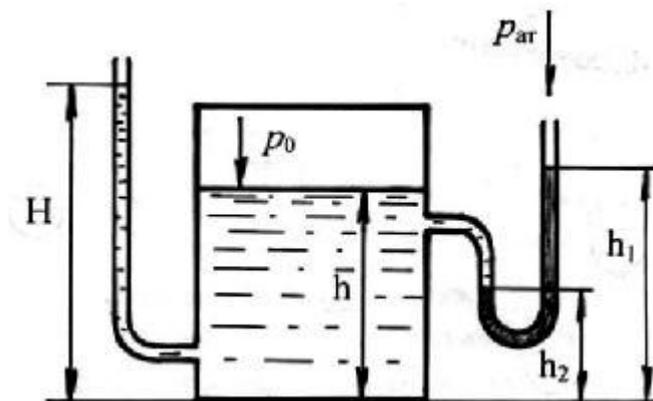
Высота бензина в баке:

$$h_{\text{б}} = \frac{\rho_{\text{в}}h}{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{б}}} = \frac{1000 \times 0,3}{1000 - 700} = 1 \text{ м.}$$

Вес находящегося в баке бензина:

$$G = Mg = \rho_{\text{б}} \cdot g \cdot S \cdot h_{\text{б}} = \rho_{\text{б}} \cdot g \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h_{\text{б}} = 700 \cdot 9,8 \cdot 3,14 \cdot 1^2 \cdot 1 = 21,54 \text{ кН.}$$

2. Определить давление p_0 воздуха в напорном баке по показанию ртутного манометра. Какой высоты H должен быть пьезометр для измерения того же давления p_0 ? Высоты $h=2,6$ м; $h_1=1,8$ м; $h_2=0,6$ м. Плотность ртути $\rho = 13600$ кг/м³, воды $\rho = 1000$ кг/м³.



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

$$p_a = p_0 + \rho_{\text{в}}g(h - h_2) = p_{\text{ат}} + \rho_{\text{рт}}g(h_1 - h_2).$$

$$p_0 = p_{\text{ат}} + \rho_{\text{рт}}g(h_1 - h_2) - \rho_{\text{в}}g(h - h_2) = 100000 + 13600 \cdot 9,8 \cdot 1,2 - 1000 \cdot 9,8 \cdot 2 = 240,3 \text{ кПа.}$$

Для нахождения высоты H рассуждения аналогичны:

$$p_{\text{ат}} + \rho_{\text{в}}gH = p_0 + \rho_{\text{в}}gh,$$

откуда
$$H = \frac{\rho_0 + \rho_0 g h - p_{\text{ат}}}{\rho_{\text{в}} g} = \frac{240\,000 + 1000 \times 9,8 \times 2,6 - 100\,000}{1000 \times 9,8} = 16,92 \text{ м.}$$

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 пьезометрического 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?

Тема 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 (п. 1.3). 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).

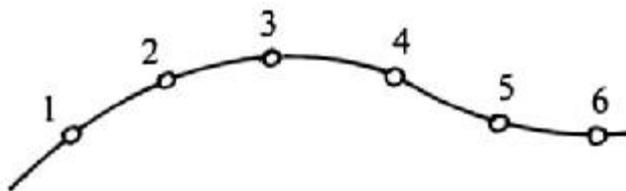


Рис. 3.1. Траектория движения частицы жидкости

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 :

$$dQ = u \cdot dS. \quad (3.1)$$

Расход потока равен сумме расходов элементарных струек, составляющих поток:

$$Q = \int_{\sigma} u \cdot dS. \quad (3.2)$$

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 на среднюю скорость в данном живом сечении, получим действительный расход жидкости, проходящий через это живое сечение:

$$Q = v_{cp} \cdot S. \quad (3.3)$$

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 без-напорных потоках – составляет некоторую часть полного периметра.

Гидравлическим радиусом R называют отношение площади живого сечения потока к смоченному периметру в этом сечении:

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

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

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

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

$$R = \frac{bh}{b+2h}$$

В достаточно широких потоках при малом значении отношения $\frac{h}{b}$ гидравлический радиус часто принимают равным глубине наполнения.

Примеры решения задач

1. Труба, по которой течет вода, имеет переменное сечение. Определить скорость во втором сечении, если скорость в первом сечении $v_1=0,05$ м/с; $d_1=0,2$ м; $d_2=0,1$ м.

Из уравнения неразрывности потока следует:

$$v_2 = v_1 \frac{S_1}{S_2} = v_1 \frac{d_1^2}{d_2^2} = 0,05 \times \frac{0,2^2}{0,1^2} = 0,2 \text{ м/с}$$

2. По трубопроводу диаметром $d = 150$ мм перекачивается нефть плотностью $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ в количестве 1200 т. в сутки. Определить секундный объемный расход нефти Q и среднюю скорость ее течения v .

Предварительно находим секундный массовый расход.

$$Q_m = \frac{1200 \times 10^3}{24 \times 3600} = 13,9 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Следовательно, секундный объемный расход равен:

$$Q = \frac{Q_m}{\rho} = \frac{13,8}{800} = 17,37 \text{ л/с}$$

Далее по уравнению расхода (3.5):

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4 \times 0,01737}{3,14 \times 0,15^2} = 0,98 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Контрольные вопросы.

1. В чем разница между линией тока и траекторией? Могут ли они совпадать?
2. В чем различие установившегося и неустойчивого 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?

Тема 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:

$$\frac{p_2}{\rho g} + z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad 4.1.$$

Сумма трех слагаемых, входящих в уравнение (4.8), называется *полным напором* в данном сечении струйки. Различают геометрический напор z , пьезометрический напор $\frac{p}{\rho g}$ и скоростной напор

$$u \frac{u^2}{2g}.$$

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

Примеры решения 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 $v = 0$;

- выход в атмосферу, где $p_{изб} = 0$; $p_{абс} = p_{ат.}$;

- сечение, где присоединен тот или иной манометр, пьезометр или вакуумметр;

- неподвижный воздух вдалеке от входа в трубу, в которую про-

исходит всасывание из атмосферы;

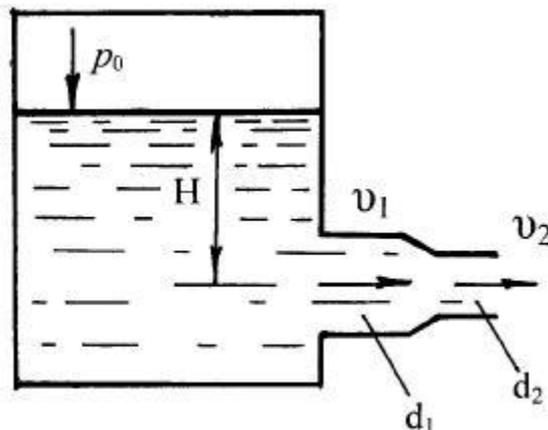
Уравнение Бернулли рекомендуется сначала записать в общем виде, а затем переписать с заменой его членов заданными буквенными величинами и исключить члены, равные нулю.

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.

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 $p_0 = 0,18$ МПа; высота $H = 1,6$ м. Пренебрегая потерями энергии, определить скорости течения воды в трубе v_1 и на выходе из насадка.



Учитывая, что, $h_{\text{вак}} = \frac{p_2}{\rho g}$, $v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2}$ и $v_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2}$, то получим:

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

$$h_{\text{вак.}} = \frac{49 \times 10^3}{1000 \times 9,8} + \frac{16 \times 0,025^2}{2 \times 9,8 \times 3,14^2} \left(\frac{1}{0,1^4} - \frac{1}{0,05^4} \right) = -2,76 \text{ м.}$$

Полученная высота – вакуумметрическая высота. На эту высоту $h_{\text{вак.}} = 2,76$ м и поднимется вода в трубке.

Контрольные вопросы.

1. Что такое пьезометрический, 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 Карриолиса в уравнении Бернулли.
7. За счет чего происходит уменьшение удельной энергии потока?
8. Что такое пьезометрический и гидравлический уклон?
9. В каких измерительных приборах используются закономерности уравнения Бернулли?
10. В чем разница между трубкой Пито и трубкой Пито - Прандтля?

Тема 5. Режимы движения жидкости

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).

Безразмерный критерий Re для характеристики режима движения жидкости ввел английский ученый О. Рейнольдс в 1883 г., позднее названный его именем.

Основными факторами, определяющими характер режима течения жидкости, как это видно из уравнения Рейнольдса (5.5), являются:

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

Результаты экспериментов показали, что разрушение лами-

нарного режима движения жидкости в круглых трубах начинается приблизительно при $Re = 2300$. Таким образом, при $Re < 2300$ наблю-

дается 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 $v_{кр.в}$ (при переходе ламинарного режима в турбулентный);

- нижняя критическая скорость $v_{кр.н}$ (при переходе турбулентного режима в ламинарный).

Примеры решения задач

1. Определить число Рейнольдса и режим движения воды в водопроводной трубе диаметром $d = 300$ мм, если расход $Q = 0,136$ м³/с. Коэффициент кинематической вязкости для воды (при $t = 10$ °C) $\nu = 1,306 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Живое сечение потока:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \times 0,3^2}{4} = 0,071 \text{ м}^2.$$

Средняя скорость движения воды в трубе:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{0,136}{0,071} = 1,92 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{1,92 \times 0,3}{1,306 \times 10^{-6}} = 441\,000.$$

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

2. По трубопроводу диаметром $d = 100$ мм транспортируется нефть. Определить критическую скорость, соответствующую переходу ламинарного движения жидкости в турбулентное. Коэффициент кинематической вязкости принять равным $\nu = 8,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Критическое число Рейнольдса равно:

$$R_{e.кр} = \frac{dv_{кр}}{\nu} = 2300.$$

Откуда

Тема 6. Потери напора (удельной энергии)

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 $h_{\text{дл}}$ участка русла или трубы, по которым движется жидкость;
- местных потерь напора $h_{\text{м}}$ (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:

$$h_{\text{тр}} = \sum h_{\text{дл}} + \sum h_{\text{м}} \quad (6.1)$$

Примеры решения задач

1. Вентиляционная труба $d = 0,1$ м имеет длину $\ell = 100$ м. Определить потери давления, если расход воздуха, подаваемый по трубе, равен $Q = 0,078$ м³/с. Давление на выходе равно атмосферному ($p_{\text{ат}} = 0,1$ МПа). Местные сопротивления по пути движения воздуха отсутствуют. Кинематическая вязкость воздуха при $t = 20$ °С составляет $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Средняя шероховатость выступов $\Delta = 0,2$ мм, плотность воздуха $\rho = 1,18$ кг/м³.

Скорость воздуха в трубе равна:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \times 0,078}{3,14 \times 0,2^2} = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{10 \times 0,1}{15,7 \times 10^{-6}} = 69\,000$$

Режим течения жидкости – турбулентный ($Re > 2300$), поэтому коэффициент гидравлического трения определим по формуле Альтшуля (6.12):

$$\lambda_{\text{т}} = 0,11 \times \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,11 \times \left(\frac{0,2}{100} + \frac{68}{69000} \right)^{0,25} = 0,0257.$$

Потери давления на трение по длине определим по формуле Дарси–Вейсбаха (6.6):

$$h_{\text{тр}} = \frac{\Delta p}{\rho g} = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}, \text{ откуда}$$
$$\Delta p = \lambda \frac{l v^2}{d 2} \rho = 0,0257 \times \frac{100}{0,1} + \frac{10^2}{2} \times 1,18 = 1,5 \text{ кПа.}$$

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?

Тема 7. Истечение жидкости

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.

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 $0,1H$.

Примеры решения задач

1. Определить расход и скорость вытекания воды из малого круглого отверстия диаметром $d = 3$ см в боковой стенке резервуара больших размеров. Напор над центром отверстия $H = 1$ м, кинематическая вязкость воды при $t = 20$ °С составляет $\nu = 10^{-6}$ м²/с.

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

$$R_e = \frac{vd}{\nu} = \frac{d\sqrt{2gH}}{\nu} = \frac{0,03\sqrt{2 \times 9,8 \times 1}}{10^{-6}} = 133\,000..$$

Из рис. 7.2 при $R_e = 133\,000$ определяем коэффициенты скорости φ и расхода μ : $\varphi = 0,98$; $\mu = 0,59$. Тогда скорость истечения воды из отверстия будет равна:

$$v_c = \varphi\sqrt{2gH} = 0,98\sqrt{2 \times 9,8 \times 1} = 4,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Расход вытекающей из отверстия воды будет равен:

$$Q = \mu S\sqrt{2gH} = 0,59 \times \frac{3,14 \times 0,03^2}{4} \sqrt{2 \times 9,8 \times 1} = 1,91 \frac{\text{л}}{\text{с}}$$

Тема 8. Гидравлический расчет трубопроводов

При гидравлических расчетах рассматривается несколько видов трубопроводов.

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.

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 трубопровода ℓ .

Примеры решения задач

Задачи на расчет простого трубопровода можно разбить на три типа:

I тип. Даны расход жидкости Q в трубопроводе, все геометрические размеры (ℓ , d , Δz), шероховатость труб, давление в конечном сечении (для всасывающих трубопроводов в начальном), и характеристика жидкости (плотность ρ и кинематическая вязкость ν). Местные сопротивления либо заданы коэффициентами $I\zeta$ или эквивалентными длинами $\ell_{\text{экв}}$, либо оцениваются по справочным данным.

Требуется найти потребный напор $H_{\text{потр}}$.

По Q , d и ν находится число Рейнольдса Re и определяется режим течения жидкости.

При ламинарном режиме течения искомый напор определяется по формулам (8.8) и (6.9):

$$H_{\text{потр.}} = H_{\text{ст}} + KQ^m, \text{ где } K = \frac{128\nu l}{\pi g d^4}, m = 1.$$

При турбулентном режиме задача решается с помощью формул (8.8) и (8.4):

$$H_{\text{потр.}} = H_{\text{ст}} + KQ^m, \text{ где } K = \left(\lambda_T \frac{l}{d} + \zeta_M\right) \frac{8}{\pi^2 d^4}, m = 2.$$

II тип. Даны: напор $H_{\text{расп}}$, который будем называть располагаемым, и все величины, перечисленные в I типе задач, кроме расхода Q . Так как число Рейнольдса в данной задаче подсчитать нельзя, то необходимо выразить расход Q через критическое число Рейнольдса $Re = 2300$ и определить $H_{\text{кр}}$, соответствующее смене режима. Сравнив $H_{\text{кр}}$ и $H_{\text{расп}}$, можно легко определить режим течения.

При ламинарном режиме задача решается просто, как и в задаче I типа.

При турбулентном режиме задача решается по формулам (8.8) и (8.4).

В уравнении (8.4) содержатся два неизвестных (Q и λ_T), зависящие от числа Рейнольдса. Для решения задачи задают значение коэффициента λ_T с учетом шероховатости и определяют его по формуле Альтшуля при $Re \rightarrow \infty$:

$$\lambda_T = 0,11 \left(\Delta/d\right)^{0,25}.$$

Значение коэффициента Дарси изменяется в небольших пределах ($\lambda_T = 0,015 \dots 0,04$).

Затем, решая уравнения (8.8) и (8.4), находят расход Q в первом приближении. По найденному расходу Q определяют Re в первом приближении, а по Re - уже более точное значение λ_T . Обычно бывает достаточно второго приближения.

Для решения этой же задачи графическим способом строят кривую потребного (располагаемого) напора для данного трубопровода с учетом переменности λ_T , то есть для ряда значений Q подсчитывают ν , Re , λ_T и $H_{\text{потр}}$ по формуле (8.8). Затем, построив кривую $H_{\text{потр}} = f(Q)$, и зная ординату $H_{\text{потр}} = H_{\text{расп}}$, находят соответствующую ей абсциссу, то есть находят расход Q .

III тип. Даны расход Q , располагаемый напор $H_{\text{расп}}$, и все величины, перечисленные ранее, кроме диаметра трубопровода d , который и нужно определить.

Так как число Рейнольдса определить нельзя, то выражают диаметр через критическое число Рейнольдса $Re = 2300$ и определяют $H_{\text{кр}}$, соответствующее смене режима движения жидкости. Сравнивая $H_{\text{кр}}$ и $H_{\text{расп}}$, определяют режим течения.

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?

Тема 9 Основы гидропневмопривода

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).

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.

По существу, действия гидропневмопривод является устройством, преобразующим энергию движущейся жидкости (гидропривод) и сжатого воздуха (пневмопривод) в механическую энергию. Действие гидропневмопривода основано на законах равновесия и движения рабочей

среды. Выбор того или иного привода машины во многом определяется учетом его особенностей.

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. Чугаев, Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости) : учебник для вузов / Р. Р. Чугаев. – Изд. 6-е, репринтное. – Москва: Бастет, 2013. – 672 с. – Текст : непосредственный.
6. Лапшев, Н. Н. Гидравлика : учебник / Н. Н. Лапшев. – 3-е изд., стер. – М. : Академия, 2010. – 272 с. – Текст : непосредственный.
7. 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.
8. 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.
9. Метревели, В. Н. Сборник задач по курсу гидравлики с решениями : учебное пособие / В. Н. Метревели. – М. : Высшая школа, 2007. – 192 с. – Текст : непосредственный.
10. 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.
11. 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.