

Литература:

Основная литература:

1. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М.Башта, С.С.Руднев, Б.Б.Некрасов и др. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982. 423 с., ил. (Переиздана стереотипно в 2010 году).
2. Сборник задач по гидравлике для технических вузов / Д.А.Бутаев, З.А.Калмыкова, Л.Г.Подвидз и др.; под ред. И.И.Куколевского и Л.Г.Подвидза. 6-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. 486 с., ил.
3. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередат: учебное пособие для машиностроительных вузов / Под ред. С.С.Руднева и Л.Г.Подвидза. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974. 416 с., ил.
4. Шабловский А.С. Выполнение домашних заданий и курсовых работ по дисциплине «Механика жидкости и газа»: учебное пособие в двух частях. Часть 1: Гидростатика. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 69 с., ил.
5. Шабловский А.С. Выполнение домашних заданий и курсовых работ по дисциплине «Механика жидкости и газа»: учебное пособие в двух частях. Часть 2: Гидродинамика. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 65 с., ил.

Дополнительная литература:

1. Некрасов Б.Б. Гидравлика и её применение на летательных аппаратах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1967. 368 с., ил.
2. Беленков Ю.А., Лепёшкин А.В., Михайлин А.А. Гидравлика и гидропневмопривод: учебник для вузов. М.: Издательский дом «БАСТЕТ», 2013. 406 с., ил.
3. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика: учебник для вузов / Б.Т.Емцев. 2-е изд., переаб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 440 с., ил.

1.1 Введение

Содержание курса:

- 1.Свойства жидкостей и газов;
- 2.Гидростатика;
- 3.Гидродинамика;
4. Работа насосов на сеть.

Гидравликой называется прикладной раздел механики, изучающий законы равновесия и движения жидкостей для решения технических задач.

Слово «гидравлика» состоит из двух греческих слов (*хюдор* – вода и *аулос* – труба).

В гидравлике под термином жидкость понимаются и собственно жидкости (которые часто называют капельными жидкостями) и газы (газообразные жидкости). Отсюда можно сказать, что гидравлика занимается изучением законов движения капельных жидкостей в трубах.

В гидравлике рассматриваются потоки, ограниченные и направленные твёрдыми стенками, т.е. это внутренние течения жидкостей, и решается так называемая «внутренняя задача». Вопросы «внешних задач», возникающие при внешнем обтекании твёрдых тел сплошной средой (судоостроение и авиация), изучает наука под названием аэрогидромеханика.

Гидравлика зародилась в цивилизациях Древнего мира при создании систем водоснабжения и канализации. Такие системы были обнаружены при раскопках Кносского дворца на острове Крит.

Они были построены за сотни лет до нашей эры. Система водоснабжения обеспечивала подачу воды из горных источников к дворцу и слив сточных вод по трубам в канализационную систему. Трубопроводы были сделаны из глиняных стандартных отдельных участков, конструкция которых и уплотнительные элементы напоминают современные системы такого типа.

Один из виднейших гидравликов древнего мира - **греческий ученый Архимед**, живший в третьем столетии до нашей эры, известен открытием закона плавания тел и изобретением винтового насоса.

Как наука, гидравлика оформилась при переходе к промышленному производству, это произошло в семнадцатом-восемнадцатом столетии.

Голландский инженер и математик Симон Стевин написал книгу «Начала гидростатики», одну из первых по гидростатике. Занимаясь определением силы на плоскую стенку, он открыл

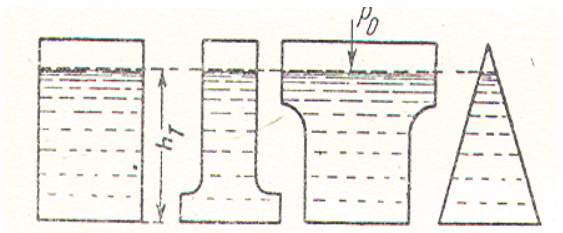


Рис. 1. Гидравлический парадокс: независимо от формы сосуда сила давления на одинаковую площадь дна одинакова.

«гидростатический парадокс» (рис. 1): давление жидкости, определяемое в любой точке сосуда, не зависит от формы сосуда, а зависит от положения точки относительно уровня свободной поверхности.

Стевин вывел формулы для определения усилий на любую часть борта судна, исходя из своего определения «гидростатического парадокса».

Значение атмосферного давления на поверхности земли впервые экспериментально определил в 1634 г. **итальянский ученый Эванджелиста Торричелли** и он же определил вес воздуха.

Земля окружена атмосферой - воздушной оболочкой, состоящей из смеси различных газов. Молекулы этих газов, находясь в поле тяготения Земли, притягиваются к ней. Вследствие этого слои воздуха, расположенные выше, давят на нижние слои, а через них на поверхность Земли и находящиеся на ней тела. Это давление называют атмосферным.

До середины XVII века считалось непререкаемым утверждение **древнегреческого ученого Аристотеля** о том, что вода поднимается за поршнем насоса потому, что «природа не терпит пустоты». Однако, при сооружении фонтанов во Флоренции обнаружилось, что засасываемая насосами вода не желает подниматься выше приблизительно 10-ти метров. Недоумевающие строители обратились за помощью к престарелому **Галилею**, который сострил, что, вероятно, природа перестает бояться пустоты на высоте более 10-ти метров, но все же предложил разобраться в этом своим ученикам — Торричелли и Вивиани.

Они доказали, что **высота поднятия жидкости за поршнем насоса должна быть тем меньше, чем больше её плотность**. Так как ртуть в 13,6 раза плотнее воды, то высота ее поднятия за поршнем будет во столько же раз меньше.

Осмысливая результаты эксперимента, **Торричелли** делает два вывода: пространство над ртутью в трубке пусто (позже его назовут «торричеллиевой пустотой»), а ртуть не выливается из трубки обратно в сосуд потому, что атмосферный воздух давит на поверхность ртути в сосуде.

Из этого следовало, что воздух имеет вес. Это утверждение казалось настолько невероятным, что не сразу было принято учёными того времени.

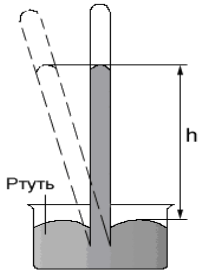


Рис. 2. Опыт Торричелли по определению атмосферного давления.

Опыт Торричелли заключается в следующем.

Стеклянную трубку длиной около 1 м, один конец которой запаян, заполняют ртутью и, закрыв отверстие другого конца, переворачивают и погружают в сосуд с ртутью (рис. 2). Под уровнем ртути трубку открывают, часть ртути из трубки выливается, остается столб ртути высотой $h = 760$ мм (над ним в трубке образуется пространство, заполненное парами ртути).

Эта высота ртутного столба сохраняется и при наклонном положении трубки.

Давление столба ртути высотой h уравнивает давление атмосферы.

Наблюдения показали, что высота столба ртути в трубке и значение атмосферного давления зависят от погодных условий и от высоты местности.

Примечание. Существует понятие нормальные условия (НУ). Это принятый эталон давления (p) и температуры (t) на поверхности земли: $p = 760$ мм рт. ст.; $t = 15^\circ\text{C}$.

По постановлению Парижского парламента от 4 сентября 1624 года было запрещено под страхом смертной казни «утверждать и преподавать положения, направленные против древних и признанных авторов». В первую очередь имели в виду Аристотеля, который утверждал, что воздух не имеет веса и что "природа не терпит пустоты".

Торричелли - догадался, что всё дело в весе воздуха.

Тогда было такой крамолой, что Паскаль вызвался опровергнуть Торричелли и поставил опыты, которые полностью подтвердили результаты Торричелли. Забавно, что Паскаль не ограничивал выбор жидкостей для опытов ртутью, а использовал для них даже вино.

Наблюдения показывают, что жидкость, находящаяся в сосуде в состоянии покоя, давит на дно и стенки сосуда и на любое тело, погруженное в эту жидкость.

Паскалем был найден закон, носящий его имя: жидкости и газы передают действующее на них давление равномерно по всем направлениям.

Им же был установлен закон сообщающихся сосудов: в сообщающихся сосудах уровни жидкостей равной плотности равны.

Позднее Исаак Ньютон открыл закон трения в жидкости и сформулировал закон сопротивления жидкости движущемуся в ней телу.

Л. Эйлер составил дифференциальные уравнения относительного равновесия и движения жидкости, известные, как уравнения Эйлера и предложил способы описания движения жидкости.

Д.Бернулли получил уравнение движения невязкой жидкости, известное как уравнение Бернулли.

В гидравлике получили известность труды француза Навье, создавшего законы движения вязкой жидкости, англичанина Рейнольдса, разработавшего критерии подобия, а также определившего два закона движения жидкости: ламинарный и турбулентный и других.

Русским учёным Н.Е.Жуковским разработана теория гидроудара, открыты важные закономерности в теоретической механике и аэродинамике.

Н.П. Петровым разработана гидродинамическая теория смазки.

Труды этих учёных заложили основы науки, которая называется гидромеханикой.

Гидромеханика - наука, изучающая равновесие и движение жидкостей и их взаимодействие с твёрдыми телами, полностью или частично погружёнными в жидкость.

Жидкости, как и все вещества, имеют молекулярное строение. По своему молекулярному строению они занимают промежуточное положение между твёрдыми телами и газами, проявляя текучесть, присущую газам и сопротивляемость деформации, присущую твёрдым телам.

Молекулы жидкости находятся в непрерывном хаотическом тепловом движении, отличающемся от хаотического теплового движения газов и твёрдых тел. В жидкостях это движение осуществляется в виде колебаний (10^{13} колебаний в секунду) относительно мгновенных центров и скачкообразных переходов от одного центра к другому. Тепловое движение молекул твёрдых тел состоит в колебаниях относительно стабильных центров. Тепловое движение молекул газа выглядит, как непрерывные скачкообразные перемены мест. Кроме того, установлено, что при повышении температуры и уменьшении давления свойства жидкостей приближаются к свойствам газов, а при понижении температуры и увеличении давления – к свойствам твёрдых тел.

Жидкость есть физическое тело, обладающее двумя особыми свойствами:

- 1) Сплошность. Предполагается, что жидкость заполняет пространство сплошь, без образования каких бы то ни было пустот. Жидкость весьма мало изменяет свой объём при изменении давления и температуры (в этом отношении жидкость сходна с твёрдым телом).
- 2) Текучесть. Жидкость обладает текучестью, благодаря чему она не имеет собственной формы и принимает форму того сосуда, в котором она находится (в этом отношении жидкость сходна с газом).

Жидкостью в гидромеханике считаются все среды, которым свойственна текучесть, то есть способность изменять свою форму под действием сколь угодно малых сил. Обычные жидкости называют капельными, газы называют некапельными жидкостями.

Капельные жидкости в малом количестве под действием поверхностного натяжения принимают сферическую форму (в виде капли), а в большом количестве образуют свободную поверхность раздела с газом. Особенностью капельных жидкостей является то, что они мало изменяют свой объём при изменении давления и температуры (p и t), поэтому их обычно считают несжимаемыми.

Некапельные жидкости или газы могут значительно уменьшаться в объёме под действием давления и неограниченно расширяться при отсутствии давления, т.е. обладают большей сжимаемостью.

Механическое движение этих сред описывается едиными дифференциальными уравнениями.

Решение этих уравнений требует учёта специфических свойств жидкостей и газов, поэтому механика сплошных сред разделяется на ряд самостоятельных дисциплин: гидромеханику, газодинамику, теорию упругости.

Однако, надо сказать, что в природе встречаются так называемые:

- 1) Неньтоновские жидкости (полимерные растворы, известковые, глинистые, цементные растворы, суспензии и т.п.), для которых связь между силой сопротивления сдвигу и скоростью деформации нелинейна и начальное усилие сдвига не равно нулю.
- 2) Ньютоновские жидкости, для которых связь между силой сопротивления сдвигу и скоростью деформации линейна и начальное усилие сдвига равно нулю.

1.2. Предмет гидравлики

Законы движения капельных жидкостей и газов при малой скорости течения газа можно считать одинаковыми.

Течения газа относятся к области гидравлики в тех случаях, когда их скорости значительно меньше скорости звука и, следовательно, сжимаемостью газа можно пренебречь. Примером такого движения газов являются течение воздуха в вентиляционных системах, в системах кондиционирования воздуха и некоторых газопроводах.

Историческое развитие механики жидкостей шло двумя различными путями.

Первый путь — теоретический, путь точного математического анализа, основанного на законах механики. Он привел к созданию теоретической гидромеханики, которая долгое время являлась самостоятельной дисциплиной, непосредственно не связанной с экспериментом. Однако, на пути чисто теоретического исследования движения жидкости встречается множество трудностей, методы теоретической гидромеханики не всегда дают ответы на вопросы, выдвигаемые практикой.

Второй путь — путь широкого привлечения эксперимента и накопления опытных данных для использования их в инженерной практике — привёл к созданию гидравлики; он возник из насущных задач практической, инженерной деятельности людей.

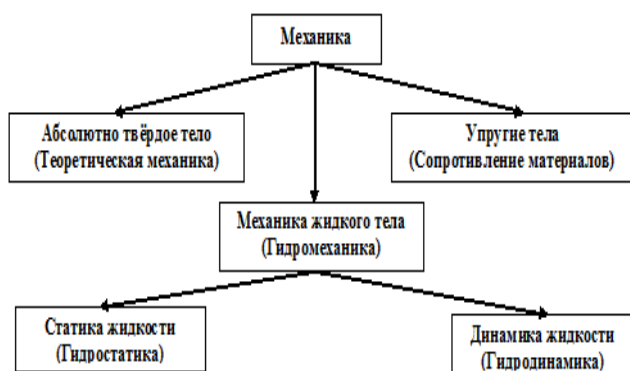
Экспериментальным путём выясняется степень расхождения полученных теоретических выводов с действительностью и устанавливаются способы исправления этих теоретических выводов и формул с целью приспособить их для практического использования.

Целый ряд явлений, поддающихся крайне трудно чисто теоретическому рассмотрению, изучается в гидравлике экспериментальным путём и результаты такого изучения передаются эмпирическими формулами.

Поэтому в начальный период своего развития гидравлика была наукой чисто эмпирической.

Однако, в настоящее время в ней, где это возможно и целесообразно, все больше применяют методы теоретической гидромеханики для решения отдельных задач, а теоретическая гидромеханика все чаще начинает прибегать к эксперименту как к критерию достоверности своих выводов, таким образом, различие в методах этих двух направлений одной и той же науки постепенно исчезает.

В настоящее время гидромеханика и гидравлика развиваются, как науки на пути сближения теоретических и экспериментальных знаний.



Методы, используемые в современной гидравлике при исследовании движения, заключаются в следующем.

1. Исследуемые явления сначала упрощают и к ним применяют законы теоретической механики.
2. Полученные результаты сравнивают с данными опытов, выясняют степень расхождения, уточняют и исправляют теоретические выводы и формулы для приспособления их к практическому использованию.
3. Явления трудно поддающиеся теоретическому анализу из-за сложности, исследуют экспериментальным путем, а результаты представляют в виде эмпирических формул.

В результате разработаны методы расчёта и проектирования разнообразных гидротехнических сооружений: плотин, каналов, водосливов, трубопроводов, применяемых для подачи всевозможных жидкостей, а также для расчёта гидромашин: насосов, гидротурбин, гидропередач, а также других гидравлических устройств.

Особенно велико значение гидравлики в машиностроении, где приходится иметь дело с закрытыми руслами (например, трубами) и напорными течениями в них, т. е. с потоками без свободной поверхности, когда давление в них отличается от атмосферного.

Гидросистемы, состоящие из насосов, трубопроводов, различных гидроагрегатов широко используют в машиностроении в качестве систем привода, систем охлаждения, систем топливоподачи, смазочных систем.

На различных современных машинах всё в большем количестве применяются **гидрогидромеханизмы и гидроавтоматика**.

Гидромеханизмы представляют собой устройства для передачи механической энергии и преобразования движения с помощью жидкости.

По сравнению с механизмами других видов, например, **зубчатыми**, гидромеханизмы имеют ряд существенных преимуществ:

- простота преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное;
- возможность плавного изменения скоростей входного и выходного звеньев;
- компактность конструкций;
- малая удельная масса гидромашин при заданной мощности в сравнении с электромашинами.

Гидромеханизмы с системами автоматического или ручного управления, образуют **гидроприводы**, которые широко используют в металлообрабатывающих станках, на летательных аппаратах (самолётах, вертолётах, ракетах), на транспортных машинах (колёсных и гусеничных), строительно-дорожных и подъемно-транспортных машинах, в прокатных станах и прессах.

Для расчёта и проектирования гидроприводов и систем автоматического регулирования и других устройств с гидромашинами и гидроавтоматикой, а также для правильной их эксплуатации, ремонта и наладки нужно иметь соответствующую подготовку в области гидравлики и теории гидромашин.

1.3. Силы, действующие на жидкость.

Гипотеза сплошной среды рассматривает жидкость как непрерывную среду, заполняющую пространство без пустот и промежутков, т.е. отвлекаются от молекулярного строения жидкости, и даже малые её частицы, считают состоящими из бесконечно большого числа молекул.

В гидравлике изучают, главным образом, движение собственно жидкости и газов, когда скорость их течения значительно меньше скорости звука, т.е. в этом случае сжимаемостью газа можно пренебречь.

Вследствие текучести (подвижности частиц) в жидкости действуют силы не сосредоточенные, а непрерывно распределенные по её объёму (массе) или поверхности.

Внешние силы, действующие на жидкость, разделяют на **массовые (объёмные)** и **поверхностные**.

Массовые силы в соответствии со вторым законом Ньютона пропорциональны массе жидкости или, для однородной жидкости, её объёму. К ним относятся **сила тяжести** и **силы инерции переносного движения**, действующие на жидкость при относительном её покое в ускоренно движущихся сосудах или при относительном движении жидкости в руслах, перемещающихся с ускорением.

Поделив массовую силу на массу, в правой части закона Ньютона получим ускорение равное единичной массовой силе.

Поверхностные силы непрерывно распределены по поверхности жидкости и при равномерном их распределении пропорциональны площади этой поверхности. Эти силы обусловлены непосредственным воздействием соседних объёмов жидкости на данный объём или же воздействием других тел (твёрдых или газообразных), соприкасающихся с данной жидкостью. Как следует из

третьего закона Ньютона, с такими же силами, но в противоположном направлении, жидкость действует на соседние с нею тела.

В общем случае поверхностная сила ΔR , действующая на площадке ΔF , направлена под некоторым углом к ней, и раскладывается на нормальную ΔP и тангенциальную ΔT составляющие (рис. 3).

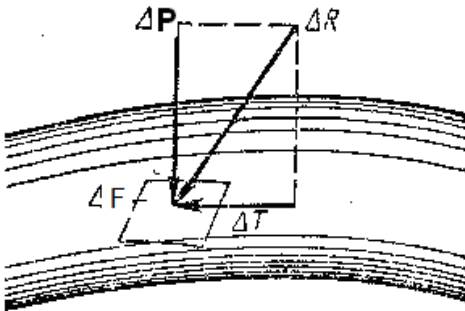


Рис. 3 Разложение поверхностной силы на две составляющие

Первая называется силой давления, а вторая - силой трения.

1.4. Давление жидкости.

Единичная поверхностная сила, называемая напряжением поверхностной силы, раскладывается на нормальное и касательное напряжения.

Нормальное напряжение, т.е. напряжение силы давления, называется гидромеханическим (в случае покоя – гидростатическим) давлением, или просто давлением, и обозначается буквой **p**.

В общем случае гидростатическое давление в данной точке равно пределу, к которому стремится отношение силы давления ΔP к площади ΔF , на которую она действует, при стремлении ΔF к нулю:

$$p = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \Delta P / \Delta F. \quad (1.1)$$

Если сила давления ΔP равномерно распределена по площадке ΔF , то среднее давление определяют по формуле

$$p = \Delta P / \Delta F. \quad (1.2)$$

Но гидростатическое давление в различных точках жидкости не будет одинаково.

Каждая точка объёма характеризуется определённым значением давления, что обычно записывается в виде $p = p(x; y; z)$. Каждому состоянию покоя соответствует своё конкретное выражение функции давления **p**.

Касательное напряжение в жидкости, т.е. напряжение трения, обозначается буквой τ и выражается подобно давлению пределом

$$\tau = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \Delta T / \Delta F, \quad (1.3)$$

а размерность его та же, что и размерность давления.

1.5. Единицы измерения давления.

1.	В международной системе единиц (СИ) основные механические единицы:	- метр длины; - килограмм-массы; - секунда.
----	--	---

За единицу давления в гидравлике принят Паскаль ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

Паскаль - это давление, вызываемое силой в один Ньютон (1 Н), равномерно действующей на нормальной к этой силе поверхности площадью один квадратный метр (1 м^2).

Применяют и укрупненные единицы: килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа).

2.	В технике в н/вр. продолжают применять систему единиц МКГСС:	- метр; - килограмм-сила; - секунда.
----	--	--

За единицу давления в МКГСС принята 1 кгс/см^2 , эта величина получила название **техническая атмосфера**. Соотношение между этими единицами следующее:

$$1 \text{ Па} = 0,102 \cdot 10^{-4} \text{ кгс/см}^2; \quad 1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98127,5 \text{ Па} \approx 0,981 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Технической атмосфере соответствует высота столба:

- ртути $h = 735,5 \text{ мм рт. ст.}$ плотностью $\rho = 13600 \text{ кг/м}^3$;
- воды $h = 10 \text{ м}$ плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

3.	Также используется система физических величин СГС:	- сантиметр; - грамм-масса; - секунда.
----	--	--

Соответственно в СГС применяются единицы давления при действии силы в 1 дин на 1 см^2 площади.

Соотношение между единицами давления и силы в СГС и СИ: $1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}$; $1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н}$.

Внесистемной единицей, но часто употребляемой единицей измерения давления является бар.

Бар (по гречески — тяжесть) - примерно равен одной атмосфере.

Соотношение между баром, Паскалем и технической атмосферой:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 1,02 \text{ кгс/см}^2.$$

Значение атмосферного давления зависит от высоты над уровнем моря и от состояния воздушной атмосферы.

За нормальное атмосферное давление на уровне моря принята физическая атмосфера, обозначаемая, как 1 атм.

Физической атмосфере соответствует высота столба:

- ртути $h = 760 \text{ мм рт. ст.}$ плотностью $\rho = 13600 \text{ кг/м}^3$;
- воды $h = 10,34 \text{ м}$ плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Соотношения между этой единицей и Паскалем следующие: $1 \text{ атм} = 101396 \text{ Па} \approx 10^5 \text{ Па}$.

Погрешности приравниваний ($1 \text{ ат} \approx 1 \text{ бар}$ и $1 \text{ атм} \approx 1 \text{ бар}$) примерно одинаковы и составляют $\approx 1,5 \%$, однако, для гидротехнических расчётов более удобна техническая атмосфера, соответствующая ровно 10 м вод. ст.