

# 1. ЖИДКОСТИ И ИХ ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

## 1.1. ПРЕДМЕТ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ

*Механика жидкости (гидромеханика, от др. греч. ὕδωρ — вода) — раздел механики, изучающий движение и равновесие жидкости, а также взаимодействие между жидкостью и твердыми телами, полностью или частично погруженными в жидкость.\**

Гидромеханика тесно связана с такой прикладной наукой как гидравлика.

*Гидравлика — наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей и способы приложения этих законов к решению задач инженерной практики.*

В отличие от строгой теоретической гидромеханики, гидравлика характеризуется таким подходом к изучению движения или равновесия жидкостей, при котором устанавливаются приближенные зависимости, во многих случаях ограниченные рассмотрением одномерного движения. При этом как в лабораторных, так и в натуральных условиях широко используется эксперимент. Наряду с некоторым различием гидромеханика и гидравлика все более сближаются: с одной стороны, гидромеханика все чаще обращается к эксперименту, с другой, — методы гидравлического анализа становятся более строгими. В этой связи гидравлику называют технической или прикладной гидромеханикой. В настоящем курсе мы будем рассматривать механику жидкости именно как прикладную науку, дающую в руки специалиста аппарат решения инженерных задач. Поэтому далее будем использовать оба термина «гидромеханика» и «гидравлика», подразумевая одну и ту же науку.

Гидромеханика, как любой раздел механики, состоит из статики (**гидростатики**) и динамики (**гидродинамики**), в гидродинамике выделяют **кинематику**, **динамику невязкой (идеальной)** и **вязкой (реальной)** жидкости. В гидромеханике рассматриваются потоки жидкости,

---

\* Тексты, выделенные левой вертикальной линией, являются основными определениями гидравлики и гидромеханики.

ограниченные и направленные твердыми стенками, т.е. течения в открытых и закрытых руслах. В понятие «русло» мы будем включать все те стенки, которые ограничивают и направляют поток, следовательно, не только русла рек, каналов и лотков, но и различные трубопроводы, насадки, элементы гидравлических машин и других устройств, внутри которых протекает жидкость. В гидромеханике изучаются также задачи, связанные с внешним обтеканием тел сплошной средой, которое имеет место при движении твердого тела в жидкости или газе, и струи.

Следует отметить, что термину «жидкость» в механике жидкости придают более широкий смысл, чем это принято в быту.

В понятие «жидкость» включают все физические тела, для которых характерно свойство *текучести*, т.е. способность сколь угодно сильно изменять свою форму под действием сколь угодно малых сил.

Таким образом, в это понятие включают как жидкости обычные, называемые **капельными**, так и **газы**.

Важной особенностью капельных жидкостей является то, что они ничтожно мало изменяют свой объем при изменении давления. Газы, наоборот, способны к весьма значительному уменьшению своего объема под действием давления и к неограниченному расширению при его отсутствии, т.е. обладают большой сжимаемостью. Несмотря на это различие, законы движения капельных жидкостей и газов при определенных условиях можно считать одинаковыми. Основным из этих условий является малое значение скорости течения газа по сравнению со скоростью распространения в нем звука. В механике жидкости изучаются движения, главным образом, капельных жидкостей, причем, в подавляющем большинстве случаев последние рассматриваются как несжимаемые. Что же касается течений газа, то они относятся к области механики жидкости лишь в тех случаях, когда сжимаемостью газа можно пренебрегать. Такие случаи движения газа встречаются на практике достаточно часто. Это, например, течение воздуха в вентиляционных системах, некоторых газопроводах или при обтекании летательных аппаратов на этапах полета: взлет и посадка.

В дальнейшем изложении

под термином «жидкость» будем понимать капельную жидкость, а также газ, когда его можно считать несжимаемым.

Исследование движения жидких и газообразных тел является более сложной задачей, чем исследование движения твердого тела. Это стано-

вится понятным, если учесть, что в механике твердого тела мы имеем систему жестко связанных между собой частиц, тогда как в механике жидкостей рассматривается среда, состоящая из множества подвижных друг относительно друга частиц. Вследствие этих трудностей историческое развитие механики жидкостей шло двумя различными путями.

Первый путь — путь точного математического анализа, основанного на законах механики, — был чисто теоретический. Он привел к созданию теоретической гидромеханики, науки, которая долгое время являлась самостоятельной дисциплиной, непосредственно не связанной с экспериментом. Теоретический метод является весьма эффективным средством научного исследования, однако он не всегда дает ответы на вопросы, выдвигаемые практикой. Поэтому из насущных задач практической инженерной деятельности родилась другая наука о движении жидкостей — гидравлика, где исследователи пошли по второму пути — пути широкого привлечения эксперимента и накопления опытных данных для использования их в инженерной практике. В начальный период своего развития гидравлика была наукой эмпирической.

В настоящее время в гидравлике там, где это возможно и целесообразно, все больше применяются методы теоретической гидромеханики для решения отдельных задач, а теоретическая гидромеханика все чаще прибегает к эксперименту как к критерию достоверности своих выводов. Таким образом, различие в методах этих двух наук постепенно исчезает и граница между ними стирается.

В современной гидравлике (технической гидромеханике) разрабатываются методы расчета и проектирования гидротехнических сооружений (плотин, каналов, водосливов, водоводов различного назначения), сооружений водоснабжения и водоотведения (трубопроводов для подачи и отвода всевозможных жидкостей), систем вентиляции, гидравлических машин (насосов, гидротурбин, гидropередач) и других гидравлических устройств.

Роль гидравлики велика практически во всех отраслях техники, например, в машиностроении мы встречаемся с широким использованием гидравлического привода, используем ее в кузнечно-прессовом оборудовании, встречаемся также с использованием гидравлики при литье металлов, пластмасс и пр. В авиакосмической отрасли огромное значение имеет надежность гидравлического оборудования: гидropередач, топливных и масляных систем, гидропневмоамортизации и др.

Для того, чтобы хорошо понимать работу гидравлических систем и сооружений, грамотно их эксплуатировать, уметь устанавливать причины аварий и находить пути их устранения, а тем более для того, чтобы проектировать и рассчитывать эти системы, нужно иметь соответствующую подготовку в области гидравлики. Такая подготовка является целью изучения дисциплины «Гидравлика».

## 1.2. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Некоторые законы гидростатики были установлены еще *Архимедом*, возникновение гидродинамики также относится к античному периоду, однако формирование гидромеханики как науки начинается с середины XV в., когда *Леонардо да Винчи* лабораторными опытами положил начало экспериментальному методу. В XVI—XVII вв. *С. Стевин*, *Г. Галилей* и *Б. Паскаль* разработали основы гидростатики, а *Э. Торричелли* дал известную формулу для скорости истечения жидкости из отверстия. В дальнейшем *И. Ньютон* высказал основные положения о внутреннем трении в жидкостях. В XVIII в. *Д. Бернулли* и *Л. Эйлер* разработали уравнения движения невязкой жидкости, послужившие основой для дальнейшего развития гидромеханики и гидравлики. Однако применение этих уравнений, так же как и предложенных *А. Навье* и *Д.Г. Стоксом* веком позже уравнений движения вязкой жидкости, для решения практических задач приводило к удовлетворительным результатам лишь в немногих случаях. В связи с этим с конца XVIII в. многие ученые и инженеры (*А. Шези*, *А. Дарси*, *А. Базен*, *Ю. Вейсбах* и др.) опытным путем изучали движение жидкости в различных частных случаях, в результате чего гидравлика обогатилась значительным числом эмпирических формул. Создававшаяся таким образом практическая гидравлика все более отдалялась от теоретической гидромеханики. Сближение между ними наметилось в XIX в. в результате формирования новых взглядов на движение жидкости, основанных на исследовании структуры потока.

Особо заслуживают упоминания работы *О. Рейнольдса*, позволившие глубже проникнуть в сложный процесс течения реальной жидкости, в физическую природу гидравлических сопротивлений и положившие начало учению о турбулентном движении. Впоследствии это учение, благодаря исследованиям *Л. Прандтля*, *Т. Кармана*, *Дж. И. Тейлора* и др., завершилось созданием полуэмпирических теорий турбулентности, получивших широкое практическое применение. К началу XX в. относятся исследования *Н.Е. Жуковского*, из которых наибольшее значение имели работы о подъемной силе крыла, гидравлическом ударе и движении грунтовых вод. Последующий быстрый рост гидротехники, теплоэнергетики, гидромашиностроения, а также авиационной техники привел к интенсивному развитию гидравлики, которое характеризуется синтезом теоретических и экспериментальных методов.

Большой вклад в развитие гидравлики сделан отечественными учеными *Н.Н. Павловским, И.И. Леви, А.П. Зегжда*.

Практическое значение гидравлики возросло в связи с потребностями современной техники в решении вопросов транспортирования жидкостей и газов различного назначения и использования их для разнообразных целей. Если ранее в гидравлике изучалась лишь одна жидкость — вода, то в современных условиях все большее внимание уделяется изучению закономерностей движения таких жидкостей, как нефть и ее продукты, газов, неоднородных и так называемых неньютоновских жидкостей. Меняются и методы решения гидравлических задач. Сравнительно недавно в гидравлике основное место отводилось чисто эмпирическим зависимостям, справедливым только для воды и часто лишь в узких пределах изменения скоростей, температур, геометрических размеров потока; теперь все большее значение приобретают закономерности общего порядка, действительные для всех жидкостей, отвечающие требованиям теории подобия и пр. При этом отдельные случаи могут рассматриваться как следствие обобщенных закономерностей. Современная гидравлика, таким образом, стала одним из прикладных разделов общей науки о движении жидкостей — механики жидкости.

Исследования в области гидравлики в настоящее время координируются **Международной ассоциацией гидравлических исследований (МАГИ)**; ее печатный орган — «Journal of the International Association for Hydraulic Research».

### 1.3. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

В гидромеханике и гидравлике отвлекаются от молекулярного строения вещества и рассматривают жидкость как *непрерывную (сплошную) среду*, заполняющую пространство без пустот и промежутков, т.е. как *континуум*.

Таким образом, считается, что вещество, его физические свойства, определяющие состояние и движение жидкости, распределяются и изменяются в занимаемом пространстве непрерывно. Именно этот **основной постулат механики сплошной среды** позволяет применять при описании равновесия и движения жидкостей аппарат математического анализа и он же позволяет полагать, что жидкая среда обладает определенными физическими свойствами.

Рассмотрим основные физические свойства капельных жидкостей, с которыми главным образом приходится иметь дело в гидромеханике и гидравлике:

**1. Плотность.** Основной механической характеристикой жидкости является ее *плотность*. Плотностью  $\rho$  называется масса жидкости, заключенная в единице объема (для однородной жидкости) т.е.

$$\rho = \frac{M}{W}, \text{ кг/м}^3, \quad (1.1)$$

где  $M$  — масса жидкости в объеме  $W$ .

Наибольшую плотность дистиллированная вода имеет при температуре  $+4$  °С, эта плотность составляет

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$$

и принимается эталонной. Так как в диапазоне температур от  $+4$  °С до  $+100$  °С плотность воды изменяется в пределах 4 %, то на практике она принимается постоянной. Однако в ряде явлений такая разность имеет значение. Так, в зимний период самая тяжелая вода с температурой  $+4$  °С скапливается у дна, в то время как к поверхности поднимаются более легкие холодные воды, именно поэтому пруды, озера и реки начинают замерзать с поверхности, а не со дна. В теплый период года у поверхности находятся теплые, более легкие, воды, а у дна остаются тяжелые воды с температурой  $+4$  °С. Таким образом, на значительной глубине температура круглогодично остается постоянной, близкой к  $+4$  °С, это определяет формирование так называемого «термоклина».

**2. Удельный (или объемный) вес жидкости.** Удельным или объемным весом  $\gamma$  будем называть вес единицы объема жидкости, т.е.

$$\gamma = \frac{G}{W} = \frac{gM}{W} = \rho g, \text{ Н/м}^3, \quad (1.2)$$

где  $G$  — вес жидкости;  $g$  — гравитационное ускорение;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Удельный вес дистиллированной воды при температуре  $+4$  °С составляет

$$\gamma = 9810 \text{ Н/м}^3.$$

---

\* Формулы, представленные в рамках, являются основными формулами гидравлики.

Если жидкость неоднородна, то формулы (1.1) и (1.2) определяют лишь среднее значение удельного веса или плотности в данном объеме. Для определения истинного значения  $\gamma$  и  $\rho$  в данной точке следует рассматривать объем, стремящийся к нулю, и искать предел соответствующего отношения.

**3. Сжимаемость.** Сжимаемость или свойство жидкости изменять свой объем (плотность) под действием давления характеризуется коэффициентом объемного сжатия  $\beta_p$ , который представляет собой относительное изменение объема, приходящееся на единицу давления:

$$\beta_p = - \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dP}, \text{ Па}^{-1} = \text{м}^2/\text{Н}. \quad (1.3)$$

Знак минус в правой части формулы (1.3) определяется сжатием (отрицательным приращением) объема  $dW$  при положительном приращении давления  $dP$ . Рассматривая массу жидкости  $M$ , занимающую объем, равный согласно (1.1)

$$W = \frac{M}{\rho},$$

получим

$$\frac{dW}{dP} = - \frac{M}{\rho^2} \cdot \frac{d\rho}{dP} \quad \text{и} \quad \beta_p = - \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dP} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dP}. \quad (1.4)$$

Следовательно, коэффициент объемного сжатия равен относительному изменению плотности жидкости, приходящемуся на единицу давления.

Величина, обратная коэффициенту  $\beta_p$ , представляет собой объемный модуль упругости

$$E = \frac{1}{\beta_p} = \rho \cdot \frac{dP}{d\rho}, \quad \text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2, \quad (1.5)$$

или, деля на плотность

$$\frac{E}{\rho} = \frac{dP}{d\rho} = c_0^2, \quad (1.6)$$

где  $c_0$  — скорость распространения продольных волн в упругой среде, равная скорости звука.

Для капальных жидкостей модуль  $E$  имеет весьма высокое значение (табл. 1.1), причем он несколько возрастает с увеличением температуры и давления.

Таблица 1.1

Вещество	Вода	Керосин	Ртуть
$E, \text{Н/м}^2 = \text{Па}$	$2 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^9$

Интегрируя (1.5), получим

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \exp\left(\frac{P - P_0}{E}\right),$$

здесь  $\rho_0$  — плотность жидкости при нормальном атмосферном давлении  $P_0 = 98,1$  кПа (одна техническая атмосфера);  $\rho$  — плотность при давлении  $P$ .

Можно видеть, что при столь высоких модулях упругости  $E$  реальных жидкостей (см. табл. 1.1) и повышении давления до реальных значений (несколько атмосфер) экспонента стремится к единице, и, следовательно, плотность жидкости остается практически постоянной, не зависящей от действующего на нее давления. Так, при повышении давления до  $P = 40$  МПа (что соответствует 400 техническим атмосферам) плотность приведенных жидкостей повышается до 3 %. Поэтому в большинстве случаев капельные жидкости можно считать практически *несжимаемыми*. Но при очень высоких давлениях и при упругих колебаниях сжимаемость жидкостей учитывать необходимо.

**4. Температурное расширение жидкости.** Температурное расширение жидкости характеризуется коэффициентом объемного расширения  $\beta_t$ , который представляет собой относительное изменение объема при изменении температуры  $t$  на  $1^\circ\text{C}$ , т.е.

$$\beta_t = \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dt}, \quad 1/\text{град.} \quad (1.7)$$

Для воды коэффициент  $\beta_t$  возрастает от  $14 \cdot 10^{-6}$  до  $700 \cdot 10^{-6}$ , соответственно, с увеличением давления от  $1 \cdot 10^5$  до  $1 \cdot 10^7$  Па и температуры от  $1$  до  $100^\circ\text{C}$ . Причем при температуре до  $50^\circ\text{C}$  с увеличением давления коэффициент  $\beta_t$  увеличивается, а при температуре выше  $50^\circ\text{C}$  (для большинства других жидкостей при любой температуре) с увеличением давления уменьшается.

**5. Сопротивление растяжению.** Внутри капельных жидкостей по молекулярной теории сопротивление растяжению может быть весьма значительным — до  $1 \cdot 10^9$  Па. При опытах с тщательно очищенной и дегазированной водой в ней были получены кратковременные напряжения растяжения до  $2,3$ — $2,8 \cdot 10^7$  Па. Однако технически чистые жидкости, содержащие взвешенные твердые частицы и мельчайшие пузырьки газов, не выдерживают даже незначительных напряжений растяжения. Поэтому в дальнейшем будем полагать напряжения растяжения в капельных жидкостях бесконечно малыми, определяемыми вязкостью жидкости.



**6. Силы поверхностного натяжения.** На поверхности жидкости действуют **силы поверхностного натяжения**, стремящиеся придать объему жидкости сферическую форму и вызывающие в ней некоторое дополнительное давление. Однако это давление заметно сказывается лишь при малых размерах.

В трубках малого диаметра это дополнительное давление, вызывающее подъем (или опускание) жидкости относительно нормального уровня, называется капиллярностью. Высота подъема жидкости  $h$  в стеклянной трубке диаметром  $d$  определяется по формуле

$$h = \frac{k}{d}, \quad (1.8)$$

где величина  $k$  имеет следующие значения в мм<sup>2</sup>: для воды +30; для ртути -14; для спирта +12. С явлением капиллярности приходится сталкиваться при использовании стеклянных трубок в приборах для измерения давления, а также в некоторых случаях истечения жидкости. Силы поверхностного натяжения приобретают большую роль в жидкости, находящейся в условиях невесомости.

### 7. Испарение и кипение жидкостей. Кавитация.

Переход жидкости в пар называется *испарением*, обратный переход — *конденсацией*.

Жидкость может находиться в равновесии со своим паром. Это равновесие наступает при длительном содержании жидкости в закрытом сосуде, при котором число молекул, переходящих из жидкости в пар, равно числу молекул, совершающих обратный переход. В этом случае *пар называют насыщенным* и в нем устанавливается давление, называемое *давлением насыщенных водяных паров*. В табл. 1.2 приведены значения давления паров насыщения в зависимости от температуры жидкости.

Таблица 1.2

$t, ^\circ\text{C}$	0	25	50	75	100
$P, \text{кПа}$	0,591	3,067	11,94	37,39	98,1

Жидкость может испаряться не только со свободной поверхности, но и внутрь пузырей, образующихся при определенной температуре и давлении, этот фазовый переход называется *кипением*.

Частный случай кипения, который возникает в движущейся жидкости вследствие местных понижений давления до давления насыщенного пара, называется *кавитацией*.

Последняя играет главным образом отрицательную роль в гидродинамике машин и аппаратов. Кавитация может проявляться как в виде отдельных пузырьков, возникающих в местах пониженного давления и уносимых потоком (пузырьковая перемежающаяся кавитация), так и в виде сплошных, заполненных парами жидкости полостей, присоединенных к поверхности обтекаемых тел (суперкавитация). Могут существовать и иные внешние проявления кавитации.

Кавитация сопровождается изменением закономерностей течения в связи с нарушением сплошности среды, а также разрушением материала твердых стенок при схлопывании пузырьков вблизи границ течения. Некоторые гидродинамические устройства (например, измерители расхода жидкости) при появлении кавитации становятся неработоспособными. Кавитационное разрушение лопастей гидравлических турбин, насосов, гребных винтов представляет собой одну из технических проблем.

**8. Вязкость.** Вязкость представляет собой свойство жидкости сопротивляться относительному движению ее частиц. Это свойство проявляется в том, что в жидкости при определенных условиях возникают растягивающие и касательные напряжения. Вязкость есть свойство, противоположное текучести; более вязкие жидкости (глицерин, смазочные масла и др.) являются менее текучими, и наоборот.

Например, при течении вязкой жидкости вдоль твердой стенки происходит торможение потока, обусловленное вязкостью (рис. 1.1). Скорость движения слоев ( $u$ ) уменьшается по мере уменьшения расстояния до стенки ( $y$ ) вплоть до  $u = 0$  при  $y = 0$ , а между слоями происходит проскальзывание, сопровождающееся возникновением касательных напряжений (напряжений трения).

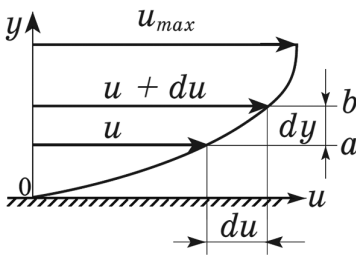


Рис. 1.1. Вязкое торможение потока у твердых границ

Согласно гипотезе, впервые высказанной И. Ньютоном в 1686 г., а затем экспериментально обоснованной профессором Н.П. Петровым в 1882 г.,

касательное напряжение в жидкости зависит от рода жидкости и характера течения и при слоистом течении прямо пропорционально поперечному градиенту скорости

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \text{ Па}, \quad (1.9)$$

где  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости жидкости;  $du$  — приращение скорости, соответствующее приращению координаты  $dy$ .

Формулу (1.9) называют **законом вязкого трения Ньютона**. Согласно (1.9) касательное напряжение в жидкости линейно зависит от скорости относительной деформации, т.е. характеризует интенсивность сдвига слоев жидкости в данной точке. В этом принципиальное отличие жидкости от твердого тела, в котором касательные напряжения зависят от величины деформации, а не от ее скорости. Если имеется еще градиент скорости в нормальном направлении к движению на рис. 1.1, то в (1.9) полная производная заменится частной  $du/dy$ .

Размерность коэффициента вязкости найдем по (1.9):

$$\mu = \tau \frac{dy}{du}, \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

Вязкость жидкостей определяют в приборах, называемых вискозиметрами. Систем вискозиметров достаточно много, в России вязкость жидкостей, более вязких, чем вода, определяют по вискозиметру Энглера [4].

Наряду с коэффициентом вязкости  $\mu$  применяют еще так называемый кинематический коэффициент вязкости  $\nu$ , равный

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \text{ м}^2/\text{с}. \tag{1.10}$$

В качестве единицы измерения кинематического коэффициента вязкости употребляется также 1 стокс (Ст) = 1 см<sup>2</sup>/с.

Вязкость капельных жидкостей в большой степени зависит от температуры, уменьшаясь с увеличением последней (рис. 1.2). Что же касается газов, то их вязкость, наоборот, с повышением температуры возрастает. Объясняется это различием природы вязкости в жидкостях и газах. В жидкостях молекулы расположены гораздо ближе друг к другу, чем в газах, и вязкость вызывается силами молекулярного сцепления. Эти силы с увеличением температуры уменьшаются, поэтому вязкость падает.

В газах вязкость обусловлена беспорядочным тепловым движением молекул, интенсивность которого увеличивается с температурой, поэтому вязкость газов с увеличением температуры возрастает.

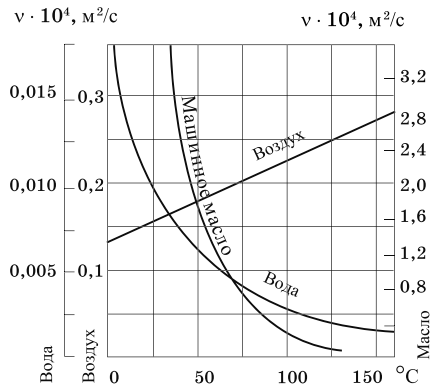


Рис. 1.2. Зависимость коэффициента вязкости от температуры

Вязкость жидкостей зависит еще и от давления, однако эта зависимость существенно проявляется лишь при относительно больших изменениях давления. С увеличением давления вязкость большинства жидкостей возрастает.

Из закона вязкого трения Ньютона (1.9) следует, что напряжение трения возможно только в движущейся жидкости, т.е. вязкость жидкости проявляется лишь при ее течении. В покоящейся жидкости вязкие напряжения равны нулю.

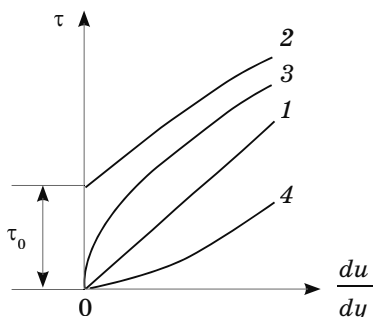


Рис. 1.3. Реологические законы в жидкостях: 1 — ньютоновской, 2 — Бингама — Шведова, 3 — псевдопластической, 4 — дилатантной

Изложенное применимо к так называемым **ньютоновским** жидкостям (по имени основоположника модели вязкого трения), к которым относятся вода и большинство других жидкостей. Однако существует немало жидкостей, не отвечающих закону Ньютона. Наука о зависимости трения от свойств жидкостей называется реологией (греч. ρεο — течь, λόγος — учение).

Если представить ньютоновскую зависимость (1.9) в виде графика, то она будет иметь вид прямой 1 на рис. 1.3.

При экспериментальном исследовании некоторых жидкостей реологическая зависимость может иметь вид кривой 2. Такие вязкопластические жидкости, которые сопротивляются небольшим сдвигающим напряжениям как твердое тело, а при превышении некоторого предела текучести ведут себя как жидкость, называются жидкостями *Бингама — Шведова*.

Их реологические свойства описываются уравнением

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy}, \text{ Па}, \quad (1.11)$$

где  $\tau_0$  — предельное значение напряжения сил трения, после преодоления которого жидкость приходит в движение.

К таким жидкостям относятся, например, масляные краски. Они получили название **бингамовских** по имени исследователя (*Б. Бингам*), первого описавшего их свойства в 1916 г.

Таким образом, неньютоновские жидкости отличаются от обычных наличием сил трения в состоянии покоя, что препятствует переходу жидкости в движение до определенного напряженного состояния.

Жидкости, поведение которых описывается кривыми 3 и 4 (см. рис. 1.3), называются жидкостями *Освальда — Вейля*. Если они под-

чинаются зависимостям  $\mathcal{Z}$ , то они называются псевдопластическими, а если следуют зависимости  $\mathcal{A}$ , — дилатантными. К таким жидкостям относятся, смолы, нефтепродукты, полимеры и т.д.

### 1.4. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЖИДКОСТЬ

На жидкость и внутри жидкости могут действовать сосредоточенные силы различной природы. Причем действие этих сил может быть либо непрерывно распределенным по объему (массе), либо непрерывно распределенным по площади. В связи с этим силы, действующие на рассматриваемые объемы жидкости и являющиеся по отношению к ним внешними силами, подразделяют на массовые (объемные) и поверхностные.

*Массовые (или объемные) силы* пропорциональны массе жидкого тела и для однородных жидкостей пропорциональны его объему.

К массовым силам относятся: сила тяжести, силы инерции переносного движения, действующие на жидкость при относительном ее покое в ускоренно движущихся сосудах или при относительном движении жидкости в руслах, перемещающихся с тем или иным ускорением. К числу массовых сил относятся также силы, вводимые в рассмотрение по принципу Даламбера при составлении уравнений движения жидкости, например, центробежные силы.

*Поверхностные силы* непрерывно распределены по поверхности жидкости и пропорциональны величине этой поверхности (при равномерном их распределении).

Поверхностные силы обусловлены непосредственным воздействием соседних объемов жидкости на данный объем или же воздействием других тел (твердых или газообразных), соприкасающихся с данным жидким телом.

В общем случае поверхностная сила  $F$ , действующая на площадке  $\Omega$ , направлена под некоторым углом к ней. Силу  $F$  можно разложить на нормальную  $P$  и касательную  $T$  составляющие. Первая, если она направлена внутрь объема, называется *силой давления*, а вторая — *силой трения*.

Как массовые, так и поверхностные силы в гидромеханике и гидравлике рассматриваются обычно в виде единичных сил, т.е. сил, отнесенных к соответствующим единицам. Массовые силы относят к

единице массы, а поверхностные — к единице площади. Так как всякая массовая сила равна произведению массы на ускорение, то **единичная массовая сила, т.е. сила, отнесенная к единице массы, численно равна соответствующему ускорению**. Единичная поверхностная сила, называемая напряжением поверхностной силы, как и полная сила, раскладывается на нормальное и касательное напряжения.

*Нормальное напряжение* называется *гидродинамическим давлением*, в случае покоя жидкости — *гидростатическим давлением*, напряжение, направленное внутрь выделенного объема, называется просто давлением.

Если сила давления  $P$  равномерно распределена по площадке  $\Omega$  или нужно найти ее среднее значение, то последнее определяется по формуле

$$P = \frac{P}{\Omega}, \text{ Па.}$$

За единицу давления в *международной системе единиц (СИ)* принят 1 паскаль (Па), равный равномерно распределенному давлению, при котором на площадь в  $1 \text{ м}^2$  действует сила в 1 ньютон (Н), т.е.  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ .

Применяют следующие укрупненные единицы: килопаскаль ( $\text{кПа} = 10^3 \text{ Па}$ ) и мегапаскаль ( $\text{МПа} = 10^6 \text{ Па}$ ).

Широко используется также внесистемная единица измерения — **техническая атмосфера**, равная  $1 \text{ ат} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 98,1 \text{ кПа}$ .

В общем случае гидромеханическое давление равно пределу, к которому стремится отношение силы давления к площадке, на которой она действует, при стремлении величины площадки к нулю, т.е. при стягивании площадки в точку

$$P = \lim_{\Omega \rightarrow 0} \left( \frac{P}{\Omega} \right). \quad (1.12)$$

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

$$\tau = \lim_{\Omega \rightarrow 0} \left( \frac{T}{\Omega} \right), \text{ Па} = \text{Н/м}^2. \quad (1.13)$$

## 2. ГИДРОСТАТИКА

Раздел гидравлики (гидромеханики), посвященный описанию законов равновесия и взаимодействия с твердыми телами жидкости, находящейся в состоянии абсолютного или относительного покоя, называется *гидростатикой*.

### 2.1. СВОЙСТВА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Как указывалось выше, в *покоящейся жидкости* возможен лишь один вид напряжений — **напряжение сжатия**, т.е. **гидростатическое давление**. Гидростатическое давление имеет три свойства:

1. На *внешней поверхности жидкости* гидростатическое давление всегда направлено по нормали внутрь рассматриваемого объема жидкости.

Это свойство непосредственно вытекает из определения давления как напряжения нормальной сжимающей силы, так как касательные напряжения в покоящейся жидкости равны нулю, а нормальные растягивающие напряжения, направленные во вне объема, реальная жидкость практически не воспринимает.

Под *внешней поверхностью жидкости* следует понимать не только поверхности раздела ее с внешней средой, но и поверхности объемов, мысленно выделяемых из общего объема жидкости.

2. В *любой точке внутри жидкости* гидростатическое давление по всем направлениям одинаково, т.е. давление не зависит от пространственной ориентации площадки, на которую оно действует.

Для доказательства этого свойства выделим в неподвижной жидкости элементарный объем в форме прямоугольного тетраэдра с ребрами, параллельными координатным осям и соответственно равными  $dx$ ,  $dy$  и  $dz$  (рис. 2.1).

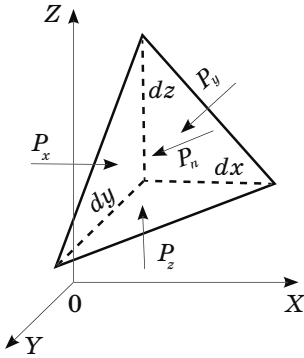


Рис. 2.1. Проекции сил давления

$OZ$ . Гидростатическое давление, действующее на наклонную грань, обозначим через  $P_n$ , а площадь этой грани — через  $dS$ . Все эти давления согласно первому свойству направлены по нормальям к соответствующим площадкам (граням).

Составим уравнение равновесия выделенного объема жидкости сначала в направлении на ось  $OX$ . Проекция сил давления на ось  $OX$  равна

$$P_x \cdot 0,5 dy \cdot dz - P_n dS \cos(n, x),$$

где  $0,5 dy \cdot dz$  — площадь грани, нормальной к оси  $OX^*$ ;  $(n, x)$  — угол между нормалью к наклонной грани и осью  $OX$ .

Масса тетраэдра равна произведению его объема на плотность, т.е.  $1/6 \rho dx dy dz$ , следовательно, массовая сила, действующая на тетраэдр вдоль оси  $OX$ , с учетом ускорения  $X$  равна

$$\frac{1}{6} X \rho dx dy dz.$$

Тогда уравнение равновесия тетраэдра запишется в следующем виде:

$$P_x \frac{1}{2} dy dz - P_n dS \cos(n, x) + \frac{1}{6} X \rho dx dy dz = 0.$$

Разделим это уравнение на площадь  $0,5 dy dz$ , которая представляет собой проекцию наклонной грани  $dS$  на плоскость  $YOZ$  и, следовательно, равна

$$\frac{1}{2} dy dz = dS \cos(n, x).$$

\* Знак скалярного умножения в дальнейшем будет опущен.



В результате будем иметь

$$P_x - P_n + \frac{1}{3} X \rho dx = 0.$$

При стремлении размеров тетраэдра к нулю последнее слагаемое уравнения, содержащее множитель  $dx$ , будет также стремиться к нулю, а давления  $P_x$  и  $P_n$  будут оставаться величинами конечными. Следовательно, в пределе получим

$$P_x - P_n = 0 \quad \text{или} \quad P_x = P_n.$$

Аналогично составляя уравнения равновесия вдоль осей  $OY$  и  $OZ$ , после таких же рассуждений получим

$$P_x = P_y = P_z = P_n. \quad (2.1)$$

Так как размеры тетраэдра  $dx$ ,  $dy$  и  $dz$  были взяты произвольно, то и наклон площадки  $dS$  произволен и, следовательно, в пределе при стягивании тетраэдра в точку давление в этой точке по всем направлениям будет одинаково.

Доказанное свойство гидростатического давления в неподвижной жидкости имеет место также при движении невязкой жидкости. При движении вязкой жидкости возникают вязкие напряжения, вследствие чего гидромеханическое давление в вязкой жидкости указанным свойством, строго говоря, не обладает.

3. Гидростатическое давление зависит от координат в пространстве, т.е.

$$P = f(x, y, z). \quad (2.2)$$

Это свойство не требует доказательств, так как совершенно очевидно, что при погружении точки под уровень жидкости давление в ней будет нарастать, и наоборот, при уменьшении погружения давление в точке будет снижаться.

## 2.2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ЖИДКОСТИ (УРАВНЕНИЯ ЭЙЛЕРА)

Выделим в жидкости, находящейся в равновесии, элементарный параллелепипед (рис. 2.2) со сторонами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  и с центром в точке  $m$ .

Жидкость внутри объема рассматриваемого параллелепипеда находится в равновесии под воздействием внешних сил: поверхностных сил давления окружающей жидкости, направленных внутрь параллелепипеда нормально его граням, и объемных (массовых) сил (силы тяжести и силы инерции переносного движения в случае относительного покоя).

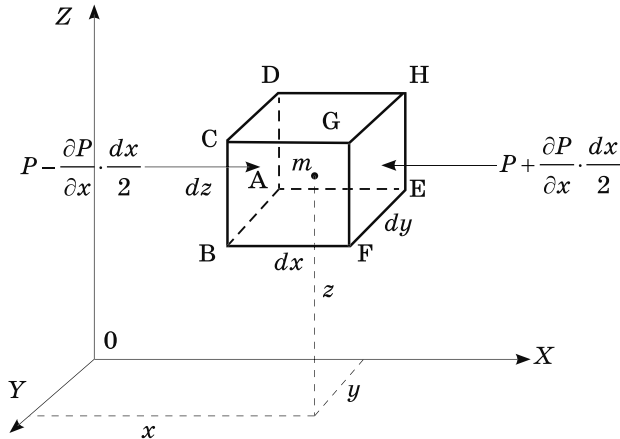


Рис. 2.2. Схема к выводу уравнений гидростатики

Пусть  $P$  — гидростатическое давление в точке  $m$ . Тогда, учитывая постулат непрерывности сплошной среды, гидростатические давления на гранях выделенного элементарного параллелепипеда, нормальных оси  $OX$ , запишутся:

$$\text{для грани } ABCD \quad P - \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2},$$

$$\text{для грани } EFGH \quad P + \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}.$$

Умножая давления на площади граней, находим поверхностные силы:

$$\text{для грани } ABCD \quad \left( P - \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2} \right) dy dz,$$

$$\text{для грани } EFGH \quad \left( P + \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2} \right) dy dz.$$

Аналогичные выражения могут быть записаны для поверхностных сил, действующих по другим граням параллелепипеда.

Обозначим через  $X$  ускорение от действия объемных (массовых) сил вдоль координатной оси  $OX$ , а через  $Y$  и  $Z$  — ускорения по осям

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)