

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

●

В последние годы название дисциплины «Гидравлика» часто отождествляется с названиями «Техническая механика жидкости и газа» или «Механика жидкости и газа».

Развитие многих отраслей техники приводит к созданию более совершенных систем. Для обеспечения их надежной работы выполняют гидравлические расчеты, которые являются важной частью комплекса инженерных расчетов объектов и сооружений, входящих в состав систем. Поэтому в учебнике уделено большое внимание гидравлическим условиям работы указанных объектов. Предусматривается, что каждая из кафедр, ведущая преподавание данной дисциплины, при составлении рабочих программ и тематико-календарных планов занятий, с учетом числа выделенных учебных часов может использовать материалы, изложенные в учебнике, в полном объеме или частично в зависимости от специфики конкретного направления или специальности.

К сожалению, объем данной книги не позволил привести примеры решения, имевшиеся во втором издании.

Автор отчетливо представляет, что при наличии соответствующего числа компьютеров в вузе многие учебные задачи могут быть решены студентами в результате несложных расчетов на ПК без применения таблиц или вспомогательных графиков. Но все же было признано необходимым в данном издании учебника сориентировать студентов и преподавателей на использование в необходимых случаях таблиц различных функций. Работа с таблицами поможет студентам более детально разобраться в существе функций и соотношений, заложенных при создании рассматриваемых таблиц и графиков. При более широком использовании компьютеров в учебном процессе возможно будет сократить количество вспомогательных таблиц и графических материалов, приведенных в приложениях к учебнику.

Объем учебника не позволил подробно изложить некоторые современные гидравлические расчеты, поэтому студентам рекомендуется так же обращаться к гидравлическим справочникам и нормативной литературе.

Автор благодарит рецензентов рукописи: кафедру гидравлики Московского государственного строительного университета (заве-

дующий кафедрой доктор технических наук, проф. В. С. Боровков), кафедру гидравлики и гидротехнических сооружений Российского университета дружбы народов (заведующий кафедрой, кандидат технических наук, доцент Н. К. Пономарев), заведующего кафедрой гидравлики и гидравлических машин кандидата физ.-мат. наук, профессора А. И. Есина (Саратовский государственный аграрный университет). Учтены также пожелания, высказанные коллегами по кафедре гидравлики Московского государственного университета природообустройства и в опубликованных рецензиях, а также читателями книги предыдущего издания.

Всем указанным лицам, а также сотрудникам, принимавшим участие в оформлении книги, приношу самую искреннюю благодарность.

---

## ВВЕДЕНИЕ

●

*Гидравлика* — наука, 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. Гидравлика разрабатывает методы применения этих законов для решения различных прикладных задач. Название «гидравлика» произошло от греческих слов «хюдор» — вода и «аулос» — труба, желоб. Вначале в понятие «гидравлика» включалось только учение о движении воды по трубам. В настоящее время почти во всех областях техники применяют различные гидравлические устройства, основанные на использовании гидравлических законов. Главнейшие области применения гидравлики — гидротехника, мелиорация и водное хозяйство, гидроэнергетика, водоснабжение и канализация, водный транспорт, машиностроение, авиация и т. д.

Первым научным трудом в области гидравлики считают трактат Архимеда (287—212 гг. до н. э.) «О плавающих телах», хотя сведения о некоторых законах гидравлики были, видимо, известны и ранее, так как задолго до Архимеда строили оросительные каналы и водопроводы.

В Древнем Египте, Индии, Китае были построены каналы и водохранилища грандиозных по тем временам размеров. Так, в Индии глубина некоторых водохранилищ достигала 15 м, в Китае приблизительно 2500 лет назад был построен Великий канал длиной около 1800 км, который соединял приустьевые участки крупных рек страны. В Древнем Риме 2300 лет назад был построен первый водопровод.

На территории нашей страны также были построены многочисленные каналы и сооружения для добычи и транспортирования воды. Земледелие в районах Кавказа и Центральной Азии вели с применением орошения. Некоторые из каналов, построенных в низовьях Амударьи около 2000 лет назад, эксплуатируют и по сей день (естественно, после многократных ремонтов и реконструкций).

Старинные летописи и другие источники содержат сведения о строительстве в России различных сооружений на реках, о развитии водных путей, о попытках создания механизмов, использующих энергию водного потока, и о других конструкциях, осуществление которых было бы невозможно без знания основ гидравлики. Так, еще в X—XI вв. на Руси существовали водопроводы из гончарных и деревянных труб, в 1115 г. был построен наплавной мост через Днепр у Киева. В XIV—XV вв. воду добывали из подземных источников, оборудованных довольно совершенными водопроводными устройствами.

В средние века в России возводили многочисленные плотины на реках. Например, в 1516 г. была построена плотина из камня на р. Неглинке в Москве.

Подъем в развитии гидравлики начался только через 17 веков после Архимеда. В XV—XVI вв. Леонардо да Винчи (1452—1519) написал работу «О движении и

измерении воды», которая была опубликована лишь более чем через 400 лет после ее создания. С. Стевин (1548—1620) написал книгу «Начала гидростатики», Галилео Галилей (1564—1642) в 1612 г. в трактате «Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и о тех, которые в ней движутся» рассмотрел основные законы плавания и гидростатический парадокс, Э. Торричелли (1608—1647) получил формулу скорости истечения невязкой жидкости из резервуаров через отверстия, Б. Паскаль (1623—1662) открыл закон о передаче давления в жидкости, прямым следствием чего явилось появление в то время большого числа простых гидравлических машин (гидравлические прессы, домкраты и т. п.), И. Ньютон (1643—1727) в 1686 г. сформулировал гипотезу о внутреннем трении в жидкости.

Однако перечисленные разработки и открытия касались только отдельных разделов гидравлики. Формирование гидравлики как науки на прочной теоретической основе стало возможным только после работ академиков Петербургской Академии наук: Д. Бернулли (1700—1782), Л. Эйлера (1707—1783) и М. В. Ломоносова (1711—1765).

Д. Бернулли в 1738 г. опубликовал выведенное им важнейшее уравнение, которое служит основой теоретических построений и практических расчетов в области гидравлики. Л. Эйлер в 1755 г. вывел системы дифференциальных уравнений равновесия и движения жидкости. М. В. Ломоносов сформулировал открытые им законы сохранения вещества и энергии.

Наряду с гениальными теоретическими работами Д. Бернулли, Л. Эйлера и М. В. Ломоносова известны их исследования в области создания гидравлических приборов и устройств. М. В. Ломоносов изобрел универсальный барометр, вискозиметр (прибор для исследования вязкости жидкости), прибор для определения скорости течений в море, а также занимался усовершенствованием гидравлических машин и устройств. Д. Бернулли изобрел водоподъемник, установленный в с. Архангельском под Москвой, который поднимал воду на высоту 30 м. Л. Эйлер предложил конструкцию турбины, вывел так называемое «турбинное уравнение», создал основополагающие труды в теории корабля.

В 1791 г. в Петербурге А. Колмаков опубликовал книгу «Карманная книжка для вычисления количества воды, протекающей через трубы, отверстия...», которая стала первым справочником по гидравлике.

Первое в России учебное пособие по гидравлике было выпущено в 1836 г. П. П. Мельниковым под названием «Основания практической гидравлики или о движении воды в различных случаях».

В развитии гидравлики велики заслуги западноевропейских ученых: Д. Полеми (1685—1761), который работал в области истечения через отверстия и водосливы; А. Шези (1718—1798), изучавшего равномерное движение жидкости; П. Дюбуа (1734—1809), занимавшегося движением наносов в реках, сопротивлениями движению воды в руслах; Д. Вентури (1746—1822), исследовавшего истечение через отверстия и насадки; Ю. Вейсбаха (1806—1871), в основном известное работами в области сопротивлений движению жидкости; А. Базена (1829—1897), изучавшего равномерное движение и истечение жидкости через водосливы; О. Рейнольдса (1842—1912), внесшего большой вклад в изучение ламинарного и турбулентного режимов движения. Можно было бы указать и многих других исследователей.

Во второй половине XIX в. в России появляются работы, оказавшие большое влияние на последующее развитие гидравлики. И. С. Громека (1851—1889) создал основы теории винтовых потоков и потоков с поперечной циркуляцией. Д. И. Менделеев (1834—1907) в своей работе «О сопротивлении жидкости и воздухоплавании» в 1880 г. привел важные выводы о наличии двух режимов движения жидкости (ламинарного и турбулентного). Далее Н. П. Петров (1836—1920) сформулировал закон внутреннего трения в жидкости. Н. Е. Жуковский (1847—1921) разработал теорию гидравлического удара в водопроводных трубах, теорию движения наносов в реках и основополагающие предложения в области фильтрации.

Труды академика Н. Н. Павловского (1884—1937) в области равномерного и неравномерного движений, фильтрации через земляные плотины и под гидротехническими сооружениями явились большим вкладом в развитие гидравлики и послужили основой наряду с работами его учеников и последователей в СССР для создания инженерной гидравлики, широко используемой при расчетах.

Развитие гидротехнического и гидромелиоративного строительства в СССР способствовало дальнейшему развитию советской гидравлической науки.

Глубокие исследования по различным направлениям привели к появлению новых, оригинальных разработок в области теории гидравлики и рекомендаций для расчетной практики, предложенных Н. Н. Павловским, И. И. Агроскиным, А. И. Богомоловым, М. А. Великановым, Е. А. Замариным, И. И. Леви, К. А. Михайловым, Ф. И. Пикаловым, М. Д. Чертоусовым, Р. Р. Чугаевым, А. А. Угинчусом и многими другими видными советскими учеными, которые были широко известны не только в СССР, но и за рубежом.

При исследовании гидравлических явлений и расчетах в гидравлике применяют аналитический и экспериментальный методы. В аналитическом методе используют уравнения механики и получают уравнения движения и равновесия жидкости, устанавливающие зависимости между кинематическими и динамическими характеристиками движущейся жидкости. Ввиду сложности строения жидкостей аналитические исследования проводят для модельных жидкостей, что облегчает применение уравнений механики. Например, применяют модель невязкой жидкости, которая в отличие от всех имеющихся в природе и технике жидкостей лишена свойства вязкости.

В гидравлике принята гипотеза сплошности жидкости. Согласно этой гипотезе жидкость рассматривают как континуум, непрерывную сплошную среду. Все параметры, характеризующие движение жидкости, считают непрерывными вместе с их производными во всех точках (кроме особых точек). Благодаря таким предпосылкам стало возможным получение дифференциальных уравнений равновесия и движения жидкости. Решение этих уравнений (в тех случаях, когда его удастся получить) позволяет иметь данные о механическом движении и равновесии жидкости в любой точке пространства, где движется жидкость.

Во многих случаях в гидравлике рассматривают одномерные задачи, в которых достаточно знать только средние по сечениям значения гидравлических параметров, определяющих изучаемое (или рассматриваемое) гидравлическое явление, применительно к которым получен ряд основных уравнений гидравлики.

Кроме гидравлики состояние покоя и движения жидкостей изучает *теоретическая гидромеханика*, имеющая строго математический характер. Получаемые в теоретической гидромеханике решения не всегда еще могут быть применены для практических расчетов, но они помогают раскрывать общие закономерности изучаемых явлений.

Экспериментальные исследования в гидравлике имеют важное значение. Здесь уместно привести слова Леонардо да Винчи: «Всякий раз, когда имеешь дело с водой, прежде всего обратись к опыту, а потом уже рассуждай». Действительно, значение экспериментов в гидравлике велико. Изучение гидравлических явлений на моделях, созданных на основе теории подобия с применением определенных методик моделирования, позволяет получить дан-

ные о параметрах, которыми будет характеризоваться явление в натуральных условиях. С помощью экспериментальных исследований в необходимых случаях можно уточнить результаты, полученные в аналитических расчетах, при принятии тех или иных допущений.

В гидравлике используют различные методы аналогии (ЭГДА — электрогидродинамическая аналогия, ГАГА — газогидравлическая аналогия и т. п.). Метод ЭГДА, согласно которому можно, например, изучать движение грунтовых вод (фильтрацию) под плотиной на модели из электропроводного материала, был предложен Н. Н. Павловским еще в 1922 г., и его широко используют при изучении фильтрации и проведении расчетов движения грунтовых вод.

Наряду с экспериментами, проводимыми в лабораториях, достаточно развиты натурные гидравлические исследования.

Методом гидравлических исследований можно считать рациональное сочетание аналитического и экспериментального методов.

В последнее время в гидравлику интенсивно внедряют ЭВМ и различные вычислительные методы расчетов. Используют как численные методы расчетов, так и численное моделирование гидравлических явлений. Такую гидравлику часто называют *вычислительной гидравликой*.

В гидравлических экспериментальных исследованиях, проводимых в лабораторных и натуральных условиях, все шире используют достижения научного приборостроения. Гидравлические параметры в процессе исследований определяют с помощью новейших средств измерения.

---

## Глава 1

# ЖИДКОСТИ И ИХ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА



### 1.1. ЖИДКОСТИ. ГИПОТЕЗА СПЛОШНОСТИ. ПЛОТНОСТЬ ЖИДКОСТИ

**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. Свойства жидкостей при высоких температурах и низких давлениях ближе к свойствам газов, а при низких температурах и высоких давлениях — к свойствам твердых тел.

В газах расстояния между молекулами больше, а межмолекулярные силы меньше, чем в жидкостях и твердых телах, поэтому газы отличаются от жидкостей и твердых тел большей сжимаемостью. По сравнению с газами жидкости и твердые тела *малосжимаемы*.

Молекулы жидкости находятся в непрерывном хаотичном тепловом движении, отличающемся от хаотичного теплового движения газов и твердых 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 твердых тел — колебания относительно стабильных центров. Тепловое движение молекул газа — непрерывные скачкообразные перемены мест.

Диффузия молекул жидкостей и газов обуславливает их общее свойство — *текучесть*. Поэтому термин «жидкость» применяют для обозначения и собственно жидкости (несжимаемая или очень малосжимаемая, капельная жидкость), и газа (сжимаемая жидкость).

В гидравлике рассматривают равновесие и движение капельных жидкостей.

**Гипотеза сплошности.** Жидкость рассматривают как деформируемую систему материальных частиц, непрерывно заполняющих пространство, в котором она движется.

Жидкая частица представляет собой бесконечно малый объем, в котором находится достаточно много молекул жидкости. Например, если рассмотреть кубик воды со сторонами размером 0,001 см, то в этом объеме будет находиться  $3,3 \cdot 10^{13}$  молекул. Предполагают, что частица жидкости достаточно мала по сравнению с размерами области, занятой движущейся жидкостью.

При таком предположении жидкость в целом рассматривают как континуум — *сплошную среду*, непрерывно заполняющую пространство, т. е. принимают, что в жидкости нет пустот или разрывов, все характеристики жидкости являются непрерывными функциями, имеющими непрерывные частные производные по всем своим аргументам. Сплошная среда представляет собой модель, которую успешно используют при исследовании закономерностей покоя и движения жидкости.

Правомерность применения модели жидкость — сплошная среда подтверждена всей практикой гидравлики.

**Плотность жидкости.** Плотность  $\rho$  характеризует распределение массы  $M$  жидкости по объему  $W$ . В произвольной точке  $A$  жидкости *плотность распределения массы*

$$\rho_A = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta W}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta M$  — масса, заключенная в объеме  $\Delta W$ , стягиваемом в точку  $A$ .

Плотность однородной жидкости равна отношению массы  $M$  жидкости к ее объему  $W$ :

$$\rho = M/W. \quad (1.2)$$

Плотность  $\rho$  во всех точках однородной жидкости одинакова.

В общем случае плотность  $\rho$  может изменяться от точки к точке в объеме, занятом жидкостью, и в каждой точке объема с течением времени.

Единица *плотности (плотности распределения массы)* в системе СИ принята  $\text{кг/м}^3$ .

Удельный вес однородной жидкости определяют как отношение веса  $G$  жидкости к ее объему  $W$ :

$$\gamma = G/W.$$

Учитывая, что  $G = Mg$ , получим зависимость, используемую в расчетах:

$$\gamma = \rho g.$$

В системе СИ единица удельного веса принята  $\text{Н/м}^3$ .

Отметим, что значение ускорения свободного падения  $g$  изменяется от  $9,831 \text{ м/с}^2$  (на полюсе) до  $9,781 \text{ м/с}^2$  (на экваторе).

Плотность жидкостей и газов зависит от температуры и давления. Все жидкости, кроме воды, характеризуются уменьшением плотности с увеличением температуры. Плотность воды максимальна при  $t = 4^\circ \text{С}$  и уменьшается как с уменьшением, так и с увеличением температуры от этого значения. В этом проявляется



одно из аномальных свойств воды. Значения плотности воды при нормальном атмосферном давлении и различных температурах следующие:

$t, ^\circ\text{C}$	0	2	4	6	8	10	20	30	40	60
$\rho, \text{кг/м}^3$	999,87	999,97	1000	999,97	999,88	999,7	998,2	995,7	992,2	983,2

Плотность морской воды при  $t = 0^\circ\text{C}$  составляет  $1020\ldots 1030 \text{ кг/м}^3$ , нефти и нефтепродуктов —  $650\ldots 900$ , чистой ртути —  $13\,596 \text{ кг/м}^3$ .

При изменении давления плотность жидкостей изменяется незначительно. Для условий работы гидротехнических сооружений плотность воды можно считать постоянной,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ . Сравните: плотность воздуха при  $t = 0^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении равна  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

Температура, при которой плотность воды максимальная, с увеличением давления уменьшается. Так, при давлении  $14 \text{ МПа}$  вода имеет максимальную плотность при  $0,6^\circ\text{C}$ .

## 1.2. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ПОКОЯЩЕЙСЯ ИЛИ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Силы, действующие в жидкости, можно разделить на две группы.

1. Силы, действующие на каждую частицу жидкости с массой  $\Delta M = \rho \Delta W$ , т. е. силы, распределенные по массе. Эти силы называют *массовыми (объемными)*. К ним относятся: сила тяжести, силы инерции (кориолисова сила инерции, переносная сила инерции), электромагнитные силы. В гидравлических задачах электромагнитные силы не рассматривают, за исключением специальных задач. К массовым силам относят также гравитационные, подчиняющиеся закону всемирного тяготения Ньютона (например, силы притяжения Луны и Солнца при рассмотрении водных масс морей и океанов Земли).

Массовые силы характеризуются плотностью распределения  $F$ . Если  $\Delta W$  — элементарный объем, содержащий точку  $A$ , и  $\Delta F$  — массовая сила, действующая на массу  $\Delta M = \rho \Delta W$  жидкости в этом объеме, то в данной точке  $A$  плотность распределения массовой силы

$$F_A = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\rho \Delta W} \quad (1.3)$$

при стягивании объема  $\Delta W$  к точке  $A$ .

Таким образом, *плотность массовой силы* представляет собой массовую силу, отнесенную к единице массы. Ее составляющие по осям координат будут соответственно  $F_x, F_y, F_z$ . Плотность массовых сил имеет размерность ускорения  $[L T^{-2}]$ .

2. Силы, действующие на каждый элемент  $\Delta\omega$  поверхностей, ограничивающих жидкость, и на каждый элемент поверхностей, проведенных произвольно внутри жидкости, называют *поверхностными*. К ним относятся нормальные к поверхности силы давления  $P$  и касательные к поверхности силы трения  $T$ .

*Плотность распределения нормальных сил*  $p_A = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega}$  называют нормальным напряжением в точке  $A$ . *Плотность распределения касательных сил*  $\tau_A = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta\omega}$  называют касательным напряжением в точке  $A$ .

Массовые и поверхностные силы могут быть внешними и внутренними.

*Внешние силы* действуют на рассматриваемую массу и поверхность жидкости извне и приложены соответственно к каждой частице жидкости, составляющей массу, и к каждому элементу поверхности, ограничивающей жидкость. *Внутренние силы* представляют собой силы взаимодействия частиц жидкости. Они являются парными, их сумма в данном объеме жидкости всегда равна нулю.

### 1.3. СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

**Сжимаемость.** Это свойство жидкостей изменять объем при изменении давления; характеризуется *коэффициентом объемного сжатия* (сжимаемости)  $\beta_W$ ,  $\text{Па}^{-1}$ , представляющим относительное изменение объема жидкости  $W$ ,  $\text{м}^3$ , при изменении давления  $p$ ,  $\text{Па}$ , на единицу:

$$\beta_W = -\frac{1}{W} \frac{dW}{dp}. \quad (1.4)$$

Знак «минус» в формуле указывает, что при увеличении давления объем жидкости уменьшается.

Учитывая, что при неизменной массе [см. формулу (1.2)]

$$-dW/W = dp/\rho, \quad (1.5)$$

имеем

$$\beta_W = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}. \quad (1.6)$$

Коэффициент объемного сжатия  $\beta_W$  определяет также относительное изменение плотности жидкости при изменении давления на единицу.

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия, — *модуль упругости жидкости*, Па,

$$E_0 = 1/\beta_w,$$

или из формулы (1.6)

$$E_0 = \rho dp/d\rho. \quad (1.7)$$

Отсюда

$$d\rho/\rho = dp/E_0. \quad (1.8)$$

Соотношение (1.7) представляет собой закон Гука для жидкостей. Модуль упругости  $E_0$  зависит от температуры и давления, поэтому жидкости неточно следуют закону Гука. Значения  $E_0$  для воды при различной температуре приведены далее.

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$E_0, \text{МПа}$	1950	2030	2110	2150

Модуль упругости минеральных масел, используемых в механизмах с гидравлическим приводом, при  $t = 20^\circ\text{C}$  составляет  $(1,35 \dots 1,75) \cdot 10^3$  МПа (меньшее значение относится к более легкому маслу); бензина и керосина — приблизительно  $1,3 \cdot 10^3$ ; глицерина —  $4,4 \cdot 10^3$ ; ртути — в среднем  $3,2 \cdot 10^4$  МПа. Глинистые растворы, применяемые при бурении, имеют  $E_0 = 2,5 \cdot 10^3$  МПа.

Сжимаемость воды весьма незначительна. При увеличении давления на  $10^5$  Па объем воды уменьшается на  $1/20\,000$  первоначального объема. В то же время сжимаемость воды примерно в 100 раз больше сжимаемости стали.

Условия работы гидротехнических сооружений позволяют считать воду несжимаемой средой. Но не следует забывать, что такое допущение правомерно лишь в тех случаях, когда изменения давления невелики. Так, сжимаемость воды существенно сказывается на положении уровня водной поверхности Мирового океана. Если бы вода была абсолютно несжимаема, то отметки уровня воды в океанах поднялись бы примерно на 30 м.

В практике эксплуатации гидравлических систем имеются случаи, когда вследствие действия того или иного возмущения (например, резкого закрытия или открытия запорного устройства в трубопроводе) в жидкости давление значительно изменяется. В таких случаях пренебрежение сжимаемостью приводит к существенным погрешностям.

Поскольку в безграничной однородной жидкости или в объеме, ограниченном абсолютно жесткими стенками, скорость распространения звука

$$c = \sqrt{E_0/\rho}, \quad (1.9)$$

а из формулы (1.7)  $dp = \rho dp / E_0$ , то

$$dp = dp / c^2. \quad (1.10)$$

Если допустить, что жидкость несжимаема ( $dp = 0$ ), то  $c = \infty$ . При достаточно большом объеме жидкости или достаточно быстром изменении давления использование в расчетах  $c = \infty$  приводит к ошибкам.

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

$$\beta_t = \frac{1}{W} \frac{dW}{dt}. \quad (1.11)$$

Для большинства жидкостей коэффициент  $\beta_t$  с увеличением давления уменьшается. Для воды с увеличением давления при температуре до  $50^\circ\text{C}$   $\beta_t$  растет, а при температуре выше  $50^\circ\text{C}$  уменьшается.

Значения  $\beta_t$  для воды при нормальном атмосферном давлении и различных температурах:

$t, ^\circ\text{C}$	1...10	10...20	40...50	60...70	90...100
$\beta_t, 1/^\circ\text{C}$	0,000014	0,00015	0,000422	0,000556	0,000719

Для некоторых жидкостей значения  $\beta_t$  при  $20^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Жидкость	$\beta_t, 1/^\circ\text{C}$	Жидкость	$\beta_t, 1/^\circ\text{C}$
Вода	0,00015	Нефть	0,0006
Глицерин	0,0005	Ртуть	0,00018
Спирт	0,0011	Масло АМГ-10	0,0008

Коэффициент  $\beta_t$  с уменьшением плотности нефтепродуктов от 920 до  $700 \text{ кг/м}^3$  увеличивается от 0,0006 до 0,0008; для рабочих жидкостей гидросистем  $\beta_t$  обычно принимают не зависящим от температуры. Для этих жидкостей увеличение давления от атмосферного до 60 МПа приводит к увеличению  $\beta_t$  примерно на 10...20 %, причем чем выше температура рабочей жидкости, тем больше  $\beta_t$ .

**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, и наоборот. Силы внутреннего трения появляются вследствие наличия межмолекулярных связей между движущимися слоями.

Силы внутреннего трения в жидкости впервые были обнаружены Ньютоном. Он установил пропорциональность между силой внутреннего трения, площадью соприкосновения слоев и относительной скоростью перемещения слоев.

Дальнейшие исследования показали, что численное значение *касательного напряжения*, возникающего вследствие действия силы внутреннего трения,

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt},$$

где  $\mu$  — коэффициент пропорциональности, который учитывает особенности конкретных жидкостей, его называют *динамической вязкостью жидкости*;  $d\theta/dt$  — скорость деформации сдвига.

Рассмотрим слоистое прямолинейное движение жидкости в цилиндрической трубе круглого поперечного сечения (рис. 1.1). Жидкость движется кольцевыми концентрическими цилиндрическими слоями толщиной  $dn$ , скорость слоев уменьшается от оси к стенкам трубы.

Разность скоростей в соседних слоях равна  $du$ . На поверхностях соприкосновения слоев возникают силы внутреннего трения.

Рассмотрим элементарный объем жидкости (рис. 1.2). При слоистом движении вследствие различия скоростей, с которыми перемещаются верхняя и нижняя поверхности выделенного объема, произойдет деформация сдвига, скорость которой

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\frac{du}{dn} dt}{dt},$$

так как

$$d\theta = \operatorname{tg}(d\theta) = \frac{du}{dn},$$

где  $du/dn$  — градиент скорости.

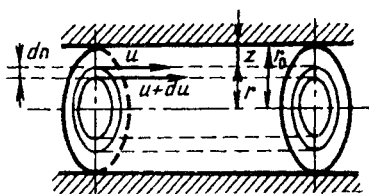


Рис. 1.1

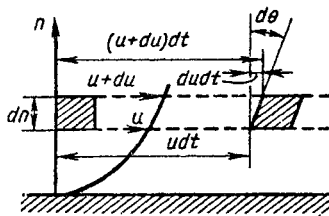


Рис. 1.2

Таким образом, при слоистом движении скорость деформации сдвига равна градиенту скорости:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dn}.$$

Тогда согласно закону внутреннего трения, открытому Ньютоном, касательное напряжение:

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dn}. \quad (1.12)$$

В зависимости от выбора направления отсчета расстояний по нормали (от стенки рассматриваемой трубы или от ее оси) градиент скорости может быть положительным (расстояние отсчитывают от стенки) или отрицательным (расстояние отсчитывают от оси трубы). Знак в формуле (1.12) принимают таким, чтобы касательное напряжение было положительным.

Закон внутреннего трения, представленный в формуле (1.12), экспериментально подтвержден и математически оформлен основоположником гидродинамической теории смазки Н. П. Петровым в 80-е годы XIX в.

Динамическая вязкость  $\mu$  имеет размерность  $[ML^{-1}T^{-1}]$  ( $M$  — масса;  $L$  — длина;  $T$  — время); она зависит от температуры и давления. Для чистой воды зависимость динамической вязкости от температуры, предложенная Пуазейлем, имеет вид

$$\mu = \mu_0(1 + 0,0337t + 0,000221t^2)^{-1}, \quad (1.13)$$

где  $\mu_0$  — динамическая вязкость при  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $t$  — температура,  $^\circ\text{C}$ .

В память французского ученого Пуазейля единица вязкости была названа «пуаз»,  $1 \text{ П} = 1 \text{ г}/(\text{см} \cdot \text{с})$ . В системе СИ единицей динамической вязкости является  $\text{Па} \cdot \text{с} = 1 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ ;  $1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 10 \text{ П}$ .

Значения  $\mu$  для воды при различных температурах:

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$\mu, \text{Па} \cdot \text{с}$	0,00179	0,0013	0,0010	0,0008

В гидравлических расчетах кроме динамической вязкости широко используют *кинематическую вязкость*, равную отношению динамической вязкости  $\mu$  к плотности жидкости  $\rho$ :

$$\nu = \mu/\rho. \quad (1.14)$$

Название «кинематическая вязкость» отражает тот факт, что в размерность  $\nu$  входят только кинематические (а не динамические) величины.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

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