



ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее издание предназначено для использования в качестве учебника при изучении курсов «Гидравлика», «Гидромеханика», «Основы гидравлики и теплотехники», а также «Гидравлика и гидропневмопривод» бакалаврами и студентами технических специальностей строительных и транспортных вузов, в частности специальностям «Природообустройство и водопользование» (профиль «Комплексное использование и охрана водных ресурсов»), «Строительство» (профиль «Гидротехническое строительство»), «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» (профиль «Кораблестроение») в вузах системы внутреннего водного транспорта. Материал подготовлен на основе курса лекций, читаемых автором на гидротехническом, судомеханическом факультетах и факультете портовой техники и электромеханики Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.

Учебник предназначен для самостоятельной подготовки учащимися по изучаемым курсам. Он также будет полезен в качестве дополнительного материала к конспекту лекций. В зависимости от конкретной структуры курса лекций некоторые из разделов, включенных в настоящее пособие, могут не входить в обязательную программу.



ВВЕДЕНИЕ

Предметом гидравлики как науки является изучение законов равновесия и движения жидкостей и приложение этих законов к решению технических задач.

Естественно, что из жидкостей наибольшее внимание в технике уделяется воде — водоснабжение, орошение, судоходство, гидравлические машины и многие другие отрасли техники объектом своего изучения и использования имеют воду.

Название «*гидравлика*» возникло от греческих слов: «гидро» — жидкость, влага, «аулос» — труба. Однако не следует думать, будто бы единственным предметом гидравлики является течение воды в трубах. Такое узкое понимание соответствовало ее состоянию в прошлом, в настоящее время, помимо изучения движения воды по трубам, гидравлика исследует и другие случаи течения воды:

- течение воды в открытых каналах и естественных руслах;
- перелив воды через плотины;
- истечение воды через отверстия и затворы;
- волны различного типа;
- течение грунтовых вод;
- течение вязких жидкостей (а не только воды)

и многое другое.

То есть изучение течения воды по трубам является важным и существенным, но далеко не единственным разделом и предметом изучения современной гидравлики.

Еще в XVIII в. в гидравлической науке начали оформляться два направления:

- *гидромеханика*, которая с применением строгих научных и математических методов изучала в основном идеальную (невязкую) жидкость;
- собственно *гидравлика*, дисциплина преимущественно прикладного характера, которая, используя зачастую нестрогие, эмпирические методы, давала ответы на практические вопросы жизни и техники.

Понятно, почему так произошло: слишком много трудностей возникает при решении задач о движении реальных жидкостей.

Поэтому прибегали и прибегают к обоснованным упрощениям, чтобы, с одной стороны, используя понятие идеальной жидкости, получать теоретические (математически строгие) результаты, а с другой стороны — рекомендовать практические решения для насущных нужд.

Но тем не менее гидравлика и гидромеханика не изолированы друг от друга. Довольно часто наблюдается процесс взаимопроникновения методов этих разделов науки друг в друга для получения более точных и обоснованных решений. При этом гидромеханика вносит строгость доказательств, а гидравлика — практический дух, широко используя данные опытов и наблюдений для установления основных зависимостей, определения числовых значений различного рода коэффициентов, характеристик свойств жидкостей, прежде всего воды, и их поведения в разных условиях.

Поскольку одно из главных отличий реальной жидкости от идеальной — наличие вязкости — проявляется только при движении, обоснование гидромеханики происходит лишь при изучении процессов движения. Рассмотрение же вопросов гидростатики является общим как для гидравлики, так и для гидромеханики.

Методы и уравнения гидромеханики зачастую применяются и для описания процессов движения газовых сред и их взаимодействия с различного рода твердыми телами. Поэтому существуют дисциплины, называемые гидроаэромеханикой или гидроаэродинамикой.

Из сказанного становится ясно, какое важное место занимает гидравлика как научная дисциплина в системе образования специалиста, в особенности инженера водного транспорта. Гидравлика является одной из базовых дисциплин в их специальной подготовке. В свою очередь, при изучении гидравлики мы опираемся на такие общетехнические дисциплины, как физика, высшая математика и теоретическая механика.

На основе законов, изучаемых в курсе гидравлики, развиваются прочие научные дисциплины, имеющие в своем названии составную часть «гидро», такие как гидротехника, гидрология. Для них гидравлика является исходной, базовой дисциплиной.



ГЛАВА 1

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

1.1. СТРУКТУРА ЖИДКОСТИ

С точки зрения физики все тела делятся на твердые, жидкие и газообразные. Жидкости — промежуточная фаза между твердыми телами и газами. При низких температурах и малых удельных объемах свойства жидкостей близки к свойствам твердых тел. А при высокой температуре и большом удельном объеме жидкости имеют свойства, близкие к свойствам газов.

В твердых кристаллических телах молекулы расположены на определенных расстояниях друг от друга, образуя кристаллическую решетку. Тепловые колебания молекулы совершают около устойчивых положений, этим объясняется то, что твердые тела сохраняют форму и объем.

В газах межмолекулярные расстояния велики, силы притяжения малы. Каждая молекула практически не испытывает действия связей с другими молекулами (исключая моменты столкновения). Модель газа, при которой отсутствуют силы притяжения между молекулами, называют *совершенным газом*.

Жидкости по молекулярному строению занимают промежуточное положение между кристаллическими твердыми телами и газами. С точки зрения молекулярного строения тепловые движения молекул жидкости представляют собой колебания около некоторых центров. Если кинетическая энергия отдельных молекул оказывается достаточной

для преодоления межмолекулярных связей, то такие молекулы скачком изменяют свое положение, переходя в другой центр колебаний. То есть некоторое время, называемое «временем оседлой жизни», молекула находится в одной упорядоченной структуре, а совершив переход, оказывается среди нового окружения, никак не предопределенного прежним положением. Именно непрерывно и в большом количестве совершающиеся скачкообразные переходы молекул с места на место и обусловливают такое свойство жидкостей, как текучесть.

Итак, основное свойство жидкой среды — *текучесть*, т. е. легкая подвижность частиц, способность неограниченно деформироваться и приходить в движение под действием малых сил. Именно благодаря текучести жидкость приобретает любую форму, предоставленную ей в пространстве, без нарушения своей структуры.

При приложении к жидкости внешней сдвигающей силы хаотические скачки молекул приобретают преимущественную направленность и возникает течение в направлении действия силы.

Если время действия внешней силы t_c много больше «времени оседлой жизни» молекулы жидкости t_t , то при действии этой силы происходит необратимая деформация жидкого тела и, следовательно, тело ведет себя как текучая среда. Если $t_c \ll t_t$, то тело ведет себя как твердое. Естественно, что с ростом температуры амплитуды теплового колебательного движения молекул возрастают, им легче переместиться из одного положения в другое, «время оседлой жизни» уменьшается и среда становится более текучей.

В случае газообразного состояния вещества отсутствие межмолекулярных связей обусловливает не только текучесть, но и сжимаемость газа. Заметим, что в упорядоченных структурах — твердых и жидких телах — сжимаемость практически отсутствует.

Для упрощения изучения жидкостей в гидравлике их молекулярное строение и движение молекул, как правило, не рассматриваются. В рамках гидравлики жидкость представляется непрерывной сплошной средой, в которой нет разрывов и пустот.

Гипотеза о сплошности жидкой среды была введена в науку Ж. Даламбером и Л. Эйлером в XVIII в. И. Ньютон представлял себе жидкость состоящей «из равных частиц, свободно расположенных на равных расстояниях». Но всегда линейные размеры тех «частиц» жидкости (элементарных объемов), которые мы рассматриваем в рамках гидравлики при выводе закономерностей течения, значительно больше, чем длина свободного пробега молекул жидкости. Это и есть условие *сплошности* жидкости, при выполнении которого жидкость можно считать средой без разрывов и пустот.

С точки зрения механических свойств жидкости и газы имеют много общего. Характер поведения и законы, описывающие состояние и движение среды, для жидкостей и газов во многих случаях одинаковы. Тем не менее в некоторых случаях проявляются особенности их строения. Отметим, при изучении каких явлений следует отличать жидкости от газов.

Первое отличие заключается в том, что газы — это среды, которые обладают свойством легко сжиматься и в которых скорость распространения механических возмущений (скорость звука) значительно меньше, чем в жидкостях. Эту особенность следует учитывать, если рассматриваются случаи, когда скорость движения газа (или скорость движения твердого тела в нем) становится соизмеримой со скоростью звука или превышает ее. Область механики жидкости и газа, в которой возникает необходимость учитывать сжимаемость изучаемой среды, выделена в отдельный раздел, называемый *газовой динамикой*. В рамках этого раздела изучается движение сверхзвуковых самолетов, космических объектов, высокоскоростных паровых и газовых турбин.

Второе отличие жидкости от газа заключается в способности жидкости иметь граничную поверхность между нею и окружающим ее газом. Такая граница называется *свободной поверхностью*.

Эти два отличия свойств жидкости и газа обусловлены разницей их молекулярной структуры. Как уже отмечено, в жидкости существенную роль играет постоянное взаи-

модействие соседних молекул. В газах молекулы взаимодействуют только в моменты столкновения друг с другом, большую часть времени они свободно перемещаются в пространстве. Поэтому вследствие хаотического характера теплового движения молекул газа он стремится равномерно распределиться по всей занимаемой им части пространства. Часть пространства, занимаемая газом, как правило, ограничена твердыми или жидкими границами, если эта часть пространства не замкнута, то объем газа может неограниченно возрастать.

Третье отличие жидкости от газа заключается в том, что в газе можно неограниченно уменьшать давление или повышать температуру, при этом свойства газа меняются непрерывно. В жидкости при уменьшении давления ниже определенного значения образуются паровоздушные пузырьки, т. е. возникают фазовые переходы. Это явление носит название *кавитации* и играет существенную роль в процессах движения жидкостей. При возникновении кавитации качественно меняются свойства текучей среды и характер течения. Аналогичные явления могут иметь место и при повышении температуры жидкости.

Таким образом, основные отличия жидкости от газа — сжимаемость газа, наличие свободных поверхностей и фазовых переходов в жидкостях. Как правило, ограничения, накладываемые этими различиями, сравнительно легко устанавливаются.

Поэтому собственно жидкости называют *капельными* или *несжимаемыми*. Сжимаемые среды — это газообразные тела.

Для гидравлики наиболее интересны и существенные свойства жидкостей, которые связаны с проявлением инерции, вязкости и сжимаемости. Иногда учитывают теплоемкость, теплопроводность, объемное тепловое расширение.

Физические свойства реальных жидкостей характеризуются следующими основными физическими характеристиками:

- плотностью;
- сжимаемостью;

- вязкостью;
- температурным расширением;
- поверхностным натяжением.

1.2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

ПЛОТНОСТЬ

В рамках гипотезы сплошности считается, что масса жидкости распределена в объеме занимаемого ею пространства непрерывно и в общем случае неравномерно.

Плотность — это масса единицы объема жидкости, т. е. величина, характеризующая распределение массы тела в пространстве, занятом жидкостью.

Численно плотность однородной среды определяется как

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где m — масса жидкости, заключенная в объеме V .

Если среда неоднородна, плотность жидкости в какой-либо точке определяется предельным переходом

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V},$$

где Δm — масса малого объема жидкости ΔV , содержащего рассматриваемую точку.

Единица измерения плотности в СИ $[\rho] = M/L^3 = \text{кг}/\text{м}^3$, в технической системе — $\text{кг}\cdot\text{с}^2/\text{м}^4$.

Наряду с плотностью в гидравлике используется понятие объемного веса.

Объемный вес жидкости — это вес единицы объема жидкости:

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad \text{или} \quad \gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V},$$

где G — вес однородной жидкости в объеме V ; ΔG — вес жидкости в малом объеме ΔV .

Единицы измерения объемного веса в СИ — Н/м³, в технической системе — кГ/м³, Г/см³ и т. д.

Связь плотности и объемного веса просто устанавливается из второго закона Ньютона, записанного для силы тяжести:

$$G = mg; \frac{G}{V} = \frac{m}{V}g \text{ или } \gamma = \rho g.$$

СЖИМАЕМОСТЬ

Сжимаемость — это свойство жидкости изменять свой объем под действием внешнего давления. Сжимаемость характеризуется коэффициентом объемной сжимаемости, который представляет собой изменение объема жидкости на единицу изменения давления, отнесенное к единице объема (относительное изменение объема):

$$\beta_V = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp},$$

где V — первоначальный объем жидкости; dV — изменение объема жидкости при увеличении давления на величину dp .

Коэффициент объемной сжимаемости измеряется в СИ в м²/Н (1/Па), в технической системе — в см²/кГ, м²/кГ.

Знак «минус» в формуле для коэффициента объемной сжимаемости обусловлен тем, что увеличению (положительному приращению) давления соответствует уменьшение (отрицательное приращение) объема жидкости.

В жидкостях велико внутримолекулярное давление, поэтому сжимаемость их очень мала. Например, для воды при не очень больших давлениях коэффициент объемной сжимаемости

$$\beta_V \cong \frac{1}{210\ 000\ 000} \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}.$$

Иначе говоря, если на воду, находящуюся при атмосферном давлении, наложить дополнительно еще такое же давление, то объем воды уменьшится на 1/21 000, т. е. практически незаметно. Поэтому воду и другие жидкости

обычно считают несжимаемыми и принимают их плотность постоянной и независящей от давления.

Величина, обратная коэффициенту объемной сжимаемости, называется модулем объемной упругости жидкости:

$$E_0 = \frac{1}{\beta_V}.$$

Представив в формуле для коэффициента объемной сжимаемости $dV = V_1 - V$, где V_1 — объем после изменения давления, получаем

$$\beta_V = -\frac{V_1 - V}{Vdp},$$

откуда

$$\beta_V Vdp = V - V_1; \quad V_1 = V(1 - \beta_V dp).$$

Так как $V = \frac{G}{\rho}$, где G — вес жидкости, то для плотности после изменения давления получим

$$\rho_1 = \frac{\rho}{1 - \beta_V dp}.$$

ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСШИРЕНИЕ

Температурное расширение жидкости — это изменение объема при изменении температуры. Его характеризуют коэффициентом температурного расширения:

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT},$$

где V — первоначальный объем жидкости; dT — изменение температуры.

Единица измерения коэффициента температурного расширения — $1/\text{град}$ (град^{-1}).

Коэффициент температурного расширения для жидкости — это относительное увеличение объема жидкости при повышении температуры на 1°C и постоянном давлении. Для капельных жидкостей β_T небольшая величина. Она меняется в зависимости от диапазона температуры

и давления. Например, для воды при нормальном атмосферном давлении и температуре 10–20°C коэффициент $\beta_T = 0,00015$ град⁻¹.

Проведем преобразования

$$dV = V_1 - V; \quad \beta_T V dT = V_1 - V; \quad V_1 = V(1 + \beta_T dT)$$

и получим формулу для изменения плотности при изменении температуры

$$\rho_1 = \frac{\rho}{1 + \beta_T dT}.$$

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Силы притяжения молекул внутри объема жидкости взаимно уравновешиваются и проявляются только на границах — на твердых стенках, на свободной поверхности. На свободной поверхности из-за того, что сила притяжения со стороны молекул воздуха значительно меньше, чем сила взаимного притяжения молекул жидкости, появляется результирующая сила, направленная внутрь объема. Молекулы поверхностного слоя находятся в особом напряженном состоянии, образуется как бы тонкая упругая пленка, возникает *поверхностное натяжение*. Энергия поверхностных молекул отличается от энергии молекул, расположенных в объеме. Суммарная величина этой «поверхностной» энергии $E_{\text{п}}$ пропорциональна площади поверхности S раздела сред:

$$E_{\text{п}} = \sigma S.$$

Коэффициент пропорциональности σ , входящий в эту зависимость, получил название *коэффициента поверхностного натяжения*. Величина его зависит от природы соприкасающихся сред, степени чистоты жидкости и ее температуры.

Коэффициент поверхностного натяжения можно также представить соотношением

$$\sigma = \frac{F}{l},$$

где F — сила поверхностного натяжения; l — длина линии раздела сред.

Из этого определения видно, что коэффициент поверхностного натяжения — это сила, действующая на единицу длины линии раздела сред и направленная по касательной к поверхности жидкости.

Единица измерения поверхностного натяжения в СИ $[\sigma] = \text{Н/м}$, в технической системе — кГ/м .

Величина коэффициента поверхностного натяжения жидкостей небольшая. Например, для воды при температуре $T = +20^\circ\text{C}$ оно составляет около 7 Г/м . Именно поэтому силы поверхностного натяжения в гидравлике обычно не учитываются.

Молекулярное давление, определяющее величину поверхностного натяжения, зависит от кривизны поверхности раздела жидкой и газообразной сред. Оно становится заметным только при малых размерах объемов жидкости, например, в капиллярных трубках. Именно благодаря поверхностному натяжению жидкость, смачивающая поверхность стенок капиллярных трубок, образует вогнутый мениск и подтягивается вверх: силы сцепления между молекулами твердой поверхности стенок и молекулами жидкости выше молекулярных сил взаимодействия внутри жидкости. В случае несмачиваемой поверхности в капиллярной трубке устанавливается выпуклый мениск и жидкость в трубке опускается: силы взаимодействия между стенкой и жидкостью меньше внутренних сил взаимодействия в жидкости.

ВЯЗКОСТЬ

Очень важным для гидравлики физическим свойством жидкости является *вязкость* — свойство жидкости оказывать сопротивление движению слоев жидкости относительно друг друга.

Вследствие молекулярного взаимодействия в жидкости возникают силы внутреннего трения: слой, движущийся быстрее, увлекает за собой слой, движущийся медленнее, а тот, в свою очередь, тормозит слой, движущийся быстрее. Таким образом, вязкость проявляется в виде возникновения силы трения при перемещении (сдвиге) слоев жидкости относительно друг друга. Другими словами,

вязкость — это свойство, обуславливающее возникновение в жидкости при ее движении касательных напряжений.

И. Ньютон предложил гипотезу о том, что сила F вязкости (трения) между двумя соседними слоями жидкости с площадью соприкосновения ω равна

$$F = -\mu\omega \frac{dv}{dn},$$

где μ — динамический коэффициент вязкости; dv/dn — поперечный градиент скорости движения жидкости; dv — скорость смещения слоев жидкости относительно друг друга; dn — расстояние между осями соседних слоев жидкости.

Знак «минус» в формуле указывает на то, что сила трения направлена противоположно направлению движения.

Размерность динамического коэффициента вязкости в СИ [μ] = Н·с/м² (Па·с). В системе СГС единица динамической вязкости г/(см·с) называется *пуаз* в честь французского ученого А. Пуазейля.

Динамический коэффициент вязкости (динамическая вязкость) зависит от природы жидкости и температуры. С повышением температуры жидкости коэффициент вязкости μ уменьшается.

Если силу трения между слоями отнести к площади соприкосновения слоев, то полученная удельная сила трения называется *касательным напряжением*:

$$\tau = \frac{F}{\omega} = -\mu \frac{dv}{dn}.$$

Наряду с динамическим коэффициентом вязкости в гидравлике широко используется *кинематический коэффициент вязкости* ν , представляющий отношение μ к плотности ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho},$$

который имеет размерность в СИ и технической системе [ν] = $L^2/T = \text{м}^2/\text{с}$. До 1980 г. допускалось измерение кинематической вязкости в стоксах (названных так в честь английского гидромеханика Дж. Стокса): 1 Ст = 1 см²/с.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru