

ГИДРАВЛИКА, ГИДРОМАШИНЫ И ГИДРОПНЕВМОПРИВОД

Под редакцией С. П. СТЕСИНА

Допущено

Учебно-методическим объединением по образованию в области транспортных машин и транспортно-технологических комплексов в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям направления подготовки дипломированных специалистов «Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования»

4-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2008

УДК 556.556(075.8)
ББК 30.123я73
Г464

Авторы:

Т. В. Артемьева, Т. М. Лысенко, А. Н. Румянцева, С. П. Стесин

Рецензенты:

зав. кафедрой «Системы приводов» Московского государственного
технологического университета «СТАНКИН»,
д-р техн. наук, проф. *О. Н. Трифонов*;
зам. генерального директора по научной работе ФГУП ГНЦ РФ «НАМИ»,
д-р техн. наук, проф. *Ю. К. Есеновский-Лашков*

Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод : учеб.
Г464 пособие для студ. высш. учеб. заведений / [Т. В. Артемьева,
Т. М. Лысенко, А. Н. Румянцева, С. П. Стесин] ; под ред.
С. П. Стесина. — 4-е изд., стер. — М. : Издательский центр
«Академия», 2008. — 336 с.
ISBN 978-5-7695-5127-7

Изложены основы механики жидкости и газа, приведены примеры
использования ее основных законов в практических расчетах.

Представлены основные сведения о гидравлических машинах, гид-
родинамических передачах, объемном гидравлическом и пневматичес-
ком приводах, применяемых в автомобильном транспорте и других само-
ходных транспортных средствах.

Для студентов вузов. Может быть полезно специалистам.

УДК 556.556(075.8)
ББК 30.123я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Артемьева Т. В., Лысенко Т. М., Румянцева А. Н.,
Стесин С. П., 2005

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2005

ISBN 978-5-7695-5127-7 © Оформление. Издательский центр «Академия», 2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем учебном пособии кратко изложены основные положения теории классической гидромеханики и примеры технического использования жидкости и газа в широко распространенных конструкциях гидравлических и пневматических насосов, двигателей, приводов различных самоходных машин, станков, летательных аппаратов, других машин и механизмов.

Изложение материала соответствует программе общего курса «Гидравлика, гидромашины и гидропневмоприводы», предусмотренного учебными планами в высших учебных заведениях автотранспортного профиля.

Главы 1, 2, 4 (подразд. 4.1, 4.5, 4.6), 5, 6, 8 написаны А. Н. Румянцевой, главы 3, 4 (подразд. 4.2—4.4) — Т. В. Артемьевой, главы 9—11 — С. П. Стесиним, главы 12, 13 — Т. М. Лысенко.

Авторы выражают глубокую благодарность участвующим в обсуждении рукописи учебного пособия коллегам по кафедре «Гидравлика» Московского автомобильно-дорожного института (Государственного технического университета), в том числе В. И. Алтунину за написание главы 7.

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ

В зависимости от сопротивления деформирующим силам все тела можно разделить на твердые и жидкие. С точки зрения физики все тела делятся на твердые, жидкие и газообразные. Жидкости — промежуточная фаза между твердым телом и газообразным. При низкой температуре и малом удельном объеме жидкости имеют свойства, близкие к свойствам твердых тел, а при высокой температуре и большом удельном объеме — свойства, близкие к свойствам газов.

Жидкость — это физическое тело, обладающее текучестью. Под текучестью понимается легкая подвижность частиц, т.е. способность неограниченно деформироваться и приходить в движение под действием незначительных сил.

Благодаря текучести жидкости практически без усилий приобретают форму, предоставленную пространством, и в состоянии равновесия не воспринимают касательных напряжений.

Жидкости оказывают сопротивление сдвигу в прямой зависимости от скорости деформации сдвига и сжатию, растяжению практически не сопротивляются за исключением случаев при особых условиях, например при всестороннем отрицательном давлении или при попытке оторвать поршень от жидкости в цилиндре.

Однако в практических условиях жидкости, считающиеся технически чистыми, содержат мельчайшие примеси и растворенный воздух, поэтому оказываются не способными выдерживать даже незначительные растягивающие напряжения [15].

С точки зрения механических свойств различают малосжимаемые (капельные) жидкости, которые незначительно изменяют свой объем при изменении температуры и давления, и сжимаемые (газообразные). С позиции механики жидкости разница между ними несущественна, если можно пренебречь сжимаемостью газов, а именно когда малы перепады температур и давлений, а скорости движения менее 70 м/с. В этих случаях законы, полученные для капельных жидкостей, часто могут быть справедливыми и для газов.

С позиции физики разница между этими видами жидкости значительна. Капельные жидкости имеют вполне определенный объем и поэтому заполняют лишь ту часть пространства, которая равна

их объему, и может образовывать граничную свободную поверхность, а при незначительных объемах способны сохранять свою форму в виде капли.

Газы же занимают все предоставленное им пространство и могут значительно изменить свой объем при изменении температуры и давления.

Жидкости, как и любое физическое тело, состоят из молекул. Однако для упрощения изучения жидкостей в механике жидкости их молекулярное строение и молекулярные движения не рассматриваются. Принимается гипотеза сплошности жидкой среды, согласно которой считается, что в жидкости нет разрывов и пустот, и учитываются только средние характеристики молекулярного движения, например температура и давление. Другими словами, жидкость заменяется моделью, позволяющей изучать движения, вызванные только внешними силами.

С математической точки зрения гипотеза сплошности среды означает, что любая функция, характеризующая состояние жидкости, непрерывна и дифференцируема и позволяет рассматривать механические характеристики жидкостей функциями координат в пространстве и времени.

В механике жидкости под термином «жидкая частица» понимается малый объем сплошной среды, деформируемый при движении, масса которого не смешивается с окружающей средой и к которому применимы все законы механики. При этом рассматриваемая масса жидкости представляет собой совокупность непрерывно распределенных по объему жидких частиц [7].

1.2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Плотность жидкости. Согласно гипотезе сплошности среды масса жидкости распределяется в объеме выделенного пространства непрерывно и в общем случае неравномерно. Плотность ρ распределения массы по объему, или плотность среды, — это предел отношения массы рассматриваемого элемента среды к его объему, который стремится к размерам точки:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}, \quad (1.1)$$

где Δm — масса, находящаяся в малом объеме ΔV , в котором находится рассматриваемая точка.

Для однородной среды плотность представляет собой массу, заключенную в единице объема:

$$\rho = m/V,$$

где m — масса однородной среды в объеме V .

Единицей измерения плотности в системе СИ является $\text{кг}/\text{м}^3$, в технической системе — $\text{кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$.

Удельный вес. Для однородной среды удельный вес γ — это вес единицы ее объема:

$$\gamma = G/V,$$

где G — вес однородной среды в объеме V .

Единицей измерения удельного веса в системе СИ является $\text{Н}/\text{м}^3$, в технической системе — $\text{кгс}/\text{м}^3$, $\text{тс}/\text{м}^3$.

У воды при температуре 4°C плотность $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, удельный вес $\gamma = 9810 \text{ Н}/\text{м}^3$.

Связь между удельным весом и плотностью выражается зависимостью

$$\gamma = \rho g,$$

где g — ускорение свободного падения.

Из этой зависимости следует, что удельный вес зависит от гравитационного поля и, строго говоря, не может являться характеристикой среды. Однако в технике при расчетах принимают величину g постоянной и равной $9,81 \text{ м}/\text{с}^2$, поэтому пользуются понятием удельного веса.

Сжимаемость. Свойство изменять свой объем обратимым образом под действием всестороннего внешнего давления называется сжимаемостью и характеризуется коэффициентом объемного сжатия β_p , который представляет собой относительное уменьшение объема, приходящееся на единицу изменения давления p :

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}, \quad (1.2)$$

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

Коэффициент объемного сжатия в системе СИ измеряется в $\text{м}^2/\text{Н}$ ($1/\text{Па}$), в технической системе — в $\text{см}^2/\text{кгс}$, $\text{м}^2/\text{кгс}$.

Знак « \rightarrow » в формуле (1.2) обусловлен тем, что положительному приращению давления соответствует отрицательное приращение (т.е. уменьшение) объема жидкости.

Изменение плотности при изменении давления можно выразить приближенной формулой [2], полученной из выражений (1.1) и (1.2):

$$\rho \approx \frac{\rho_1}{1 - \beta_p \Delta p}, \quad (1.3)$$

где ρ и ρ_1 — плотность жидкости соответственно при давлении p и p_1 ; Δp — перепад давлений, $\Delta p = p - p_1$.

Для капельных жидкостей коэффициент β_p — величина, обратная модулю упругости K :

$$\beta_p = 1/K.$$

Коэффициент объемного сжатия капельных жидкостей меняется незначительно при изменении температуры и давления.

Для воды при температуре 20 °С и атмосферном давлении $K = 2 \cdot 10^9$ Па, $\beta_p = 0,5 \cdot 10^{-9}$ 1/Па, для минеральных масел при тех же условиях $K \approx 1,2 \cdot 10^9$ Па, а $\beta_p \approx 0,83 \cdot 10^{-9}$ 1/Па [5].

Как следует из формулы (1.3), при повышении давления воды до 40 МПа ее плотность повышается лишь на 2 %, а масел — на 3 %, поэтому сжимаемость капельных жидкостей следует учитывать только при очень высоких давлениях и упругих колебаниях. В большинстве случаев сжимаемостью капельных жидкостей можно пренебречь и считать их плотность не зависящей от давления [5].

Коэффициент объемного сжатия газов значительно больше, чем у капельных жидкостей, и определяется соотношением (1.2) и уравнением состояния для заданного процесса сжатия.

Для идеальных газов, к которым можно отнести воздух, уравнение состояния при относительно невысоких значениях температуры и давления выражается уравнением Клапейрона — Менделеева

$$\frac{p}{\rho} = RT, \quad (1.4)$$

где R — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К); T — абсолютная температура, К.

Из уравнений (1.2) и (1.4) получается, что для изотермического процесса, т. е. при $T = \text{const}$, коэффициент объемного сжатия для идеальных газов

$$\beta_p = 1/p,$$

что свидетельствует о высокой сжимаемости газов.

Температурное расширение. Объем капельных жидкостей и газов меняется в зависимости от температуры и, как правило, увеличивается с ее повышением. Исключение составляет вода, плотность которой возрастает при повышении температуры от 0 до 4 °С и достигает наибольшего значения при 4 °С. При дальнейшем увеличении температуры ее плотность уменьшается. Такое характерное свойство воды объясняется особенностями ее молекулярного строения.

Расширение жидкости при изменении температуры характеризуется коэффициентом температурного расширения β_t , 1/°С, выражающим относительное увеличение объема жидкости при увеличении температуры на 1 °С и постоянном давлении:

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt},$$

где V — первоначальный объем жидкости; dV — изменение объема жидкости при повышении температуры на dt .

Изменение плотности жидкости с повышением температуры можно определить по приближенной формуле [5]

$$\rho \approx \frac{\rho_1}{1 + \beta_t \Delta t},$$

где ρ и ρ_1 — плотность жидкости при температуре t и t_1 соответственно; Δt — изменение температуры, равное $t - t_1$.

Для капельных жидкостей значение коэффициента температурного расширения мало. Однако в ряде случаев при больших перепадах температуры изменение плотности жидкости приходится учитывать [5].

Исходя из уравнения состояния (1.4), для адиабатического процесса, т.е. при $p = \text{const}$, коэффициент температурного расширения газов

$$\beta_t = 1/t.$$

Вязкость. Свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной ее части относительно другой называется вязкостью. Между слоями жидкости действуют касательные силы внутреннего трения: слой, движущийся быстрее, увлекает за собой слой, движущийся медленнее, а тот в свою очередь тормозит первый. Другими словами, вязкость — это свойство, обуславливающее возникновение в жидкости при ее движении касательных напряжений. Вязкость характеризует степень текучести, являясь понятием, противоположным ей.

В результате действия сил трения механическая энергия жидкости при движении переходит в тепловую.

Согласно закону вязкостного трения Ньютона касательное напряжение τ в жидкости описывается зависимостью

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy}, \quad (1.5)$$

где μ — коэффициент динамической вязкости (динамическая вязкость); $\frac{du}{dy}$ — поперечный градиент скорости; du — скорость смещения слоев жидкости относительно друг друга; dy — расстояние между осями соседних слоев жидкости.

Знак «+» или «-» выбирается в зависимости от знака градиента скорости таким образом, чтобы напряжение было положительным.

В системе СИ единицей динамической вязкости является $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ ($\text{Па} \cdot \text{с}$), в технической системе — $\text{кгс} \cdot \text{с}/\text{м}^2$, в системе СГС за единицу динамической вязкости принят пуаз ($1 \text{ П} = 1 \text{ дин} \cdot \text{с}/\text{см}^2$).

Наряду с коэффициентом динамической вязкости используется кинематический коэффициент вязкости (кинематическая вязкость), определяемый соотношением

$$\nu = \mu/\rho. \quad (1.6)$$

Единицей измерения кинематической вязкости является в системе СИ и технической $\text{м}^2/\text{с}$, в системе СГС — стокс ($1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$).

Вязкость жидкостей существенно зависит от температуры. У капельных жидкостей при повышении температуры вязкость уменьшается, у газов — увеличивается, что можно объяснить молекулярной теорией.

В капельных жидкостях колебания молекул происходят относительно их среднего положения. С повышением температуры скорость колебаний возрастает, что вызывает ослабление межмолекулярных связей, облегчает смещение частиц и, как следствие, приводит к увеличению текучести и уменьшению вязкости.

Вязкость газов обусловлена тепловым движением молекул, скорость которого при нагревании возрастает, следовательно, увеличивается и вязкость.

Влияние температуры на вязкость капельных жидкостей можно определить по формуле [5]

$$\mu = \mu_1 e^{-\beta(t-t_1)},$$

где μ и μ_1 — вязкость жидкости при температуре t и t_1 соответственно; β — коэффициент, для масел $\beta = 0,02 \dots 0,03$.

Зависимость вязкости от давления для большинства капельных жидкостей оценивается формулой [5]

$$\mu = \mu_1 e^{\alpha(p-p_1)}, \quad (1.7)$$

где μ и μ_1 — вязкость жидкости при давлении p и p_1 соответственно; α — коэффициент, для масел α равен от 0,02 (при высокой температуре) до 0,03 (при низкой температуре).

Из формулы (1.7) следует, что с увеличением давления вязкость капельных жидкостей увеличивается. Однако существенное изменение вязкости происходит при относительно больших изменениях давления.

Коэффициент динамической вязкости для газов зависит от давления только для разреженных газов при низких давлениях и газов, близких к сжижению. В этих случаях с повышением давления вязкость увеличивается.

Для облегчения решения задач используют понятие идеальной жидкости. Идеальная жидкость — это несжимаемая, не расширя-

ющаяся с увеличением температуры жидкость, обладающая текучестью и лишенная вязкости. Идеальную жидкость называют также невязкой.

Поверхностное натяжение. У молекул, находящихся внутри объема покоящейся жидкости, силы притяжения взаимно уравновешиваются, а у молекул, расположенных на границе жидкости и газа (воздуха), т.е. в поверхностном слое, система молекулярных сил оказывается неуравновешенной из-за отсутствия притяжения со стороны молекул воздуха. Поэтому появляется сила, направленная внутрь объема жидкости, называемая силой молекулярного давления. Таким образом, молекулы поверхностного слоя находятся в особом напряженном состоянии, характеризуемом силами поверхностного натяжения, которые стягивают поверхность, стремятся ее сократить. Вследствие сил поверхностного натяжения объем жидкости, на который не действуют никакие силы кроме молекулярных, принимает сферическую форму.

Сила поверхностного натяжения характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения σ , который представляет собой силу, действующую по касательной к поверхности жидкости и приходящуюся на единицу длины линии раздела соседних частей поверхности.

Единицей измерения σ в системе СИ является Н/м, в технической — кгс/м, в СГС — дин/см.

Молекулярное давление зависит от кривизны поверхности раздела жидкой и газообразной среды (свободной поверхности). Однако эта зависимость проявляется лишь в малых объемах, например в трубках малого диаметра. Особо тонкие трубки называют капиллярами. Кривизна свободной поверхности в таких трубках определяется типом поверхности трубки. У смачиваемых поверхностей силы сцепления между молекулами твердой поверхности и молекулами жидкости выше молекулярных сил взаимодействия внутри жидкости, а у несмачиваемых — меньше. В месте соприкосновения частиц жидкости свободной поверхности со смачиваемой твердой стенкой они подтягиваются вверх, и в трубке образуется вогнутая поверхность — вогнутый мениск. В случае несмачиваемой поверхности в трубке устанавливается выпуклый мениск.

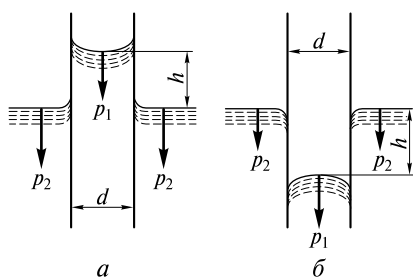


Рис. 1.1. Изменение уровня жидкости в капиллярах:

а — смачиваемая поверхность капилляра; *б* — несмачиваемая поверхность капилляра; p_1 — молекулярное давление на поверхности в трубке; p_2 — молекулярное давление на поверхности в резервуаре; d — диаметр капилляра; h — высота изменения уровня жидкости в капилляре

Вогнутая поверхность уменьшает молекулярное давление, а выпуклая увеличивает. В первом случае возникает перепад давлений $\Delta p = p_2 - p_1$, под воздействием которого жидкость в трубке поднимается на высоту h и уравнивается весом столба поднятой жидкости (рис. 1.1, *а*). В случае несмачиваемой поверхности под действием перепада давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ жидкость в трубке опускается (рис. 1.1, *б*) [16].

Высота поднятия воды в стеклянной капиллярной трубке при температуре 20 °С определяется по формуле [16]

$$h \approx 30/d,$$

где d — диаметр трубки, мм.

Для ртути величина опускания в такой же трубке [16]

$$h \approx 10/d.$$

Растворимость. Свойство газов образовывать с капельными жидкостями растворы (растворимость) характеризуется коэффициентом растворимости k , который представляет собой отношение объема растворенного газа V_r , соответствующего атмосферному давлению и температуре 0 °С, к объему жидкости $V_{ж}$:

$$k = V_r/V_{ж}.$$

Объем газа, растворенного в капельной жидкости до ее полного насыщения, определяется выражением

$$V_r = kV_{ж}p_2/p_1, \tag{1.8}$$

где $V_{ж}$ — объем жидкости; p_1 и p_2 — соответственно начальное и конечное давление на поверхности раздела жидкости и газа.

Коэффициент растворимости зависит от свойств жидкости и газа. Например, в смесях минеральных масел, применяемых в гидросистемах, коэффициенты растворимости воздуха и азота соответственно равны 0,1 и 0,12.

Растворимость воздуха в масле до насыщения обратно пропорциональна плотности масла. Так, коэффициент растворимости при температуре 20 °С у масла АМГ-10, имеющего плотность 834 кг/м³, равен 0,104, а у индустриального масла И-12 с плотностью 901 кг/м³ этот коэффициент равен 0,076 [4].

Растворимость воздуха в масле прямо пропорциональна температуре.

Количество растворенного газа, как следует из выражения (1.8), зависит от давления. Например, при повышении абсолютного давления с 7,09 до 10,9 МПа объем растворенного воздуха в масле увеличивается на 50 %, а при снижении абсолютного давления с 83 до 3 кПа (т.е. увеличении вакуума с 15,2 до 95,4 кПа) при комнатной температуре коэффициент выделения воздуха из масла АМГ-10 возрастает с 1,4 до 9,1 %.

Выделяющийся из масла воздух увеличивает содержание нерастворенного воздуха в рабочей жидкости гидросистем, что способствует окислению масла, снижает производительность насосов, а при низких давлениях повышает упругость рабочей среды и поэтому не позволяет пренебрегать ее сжимаемостью.

Испарение. Процесс парообразования, происходящий со свободной поверхности жидкости, называется испарением (это переход молекул жидкости в пар). Если жидкость, имеющая свободную поверхность, длительное время находится в закрытом резервуаре, то с течением времени число молекул жидкости, переходящих в пар, может сравняться с числом молекул, возвратившихся в жидкость. Пар в этом случае станет насыщенным. Установившееся в нем давление называется давлением, или упругостью, насыщенного пара $p_{н.п.}$. Таким образом, упругость насыщенного пара — это установившееся при данной температуре давление пара, находящегося в равновесии с жидкостью.

Чем выше давление насыщенного пара при данной температуре, тем больше испаряемость жидкости. С увеличением температуры повышается упругость насыщенного пара. Упругость насыщенного пара легких масел, применяемых в гидросистемах, с повышением температуры с 20 до 60 °С возрастает с 98,1 до 1962 Па, т. е. увеличивается в 20 раз.

Если внешнее давление станет равным давлению насыщенного пара, жидкость закипит. Соответствующая этому процессу температура называется температурой кипения.

Каждому значению температуры соответствует давление, при котором жидкость закипает. Следует иметь в виду, что при низком давлении температура кипения жидкости низкая.

Кавитация. Явление, возникающее в движущейся жидкости при понижении давления до упругости насыщенного пара и температуре окружающей среды, называется кавитацией. Кавитация сопровождается образованием парогазовых пузырьков, которые, перемещаясь с потоком жидкости в область с более высоким давлением, захлопываются, излучая при этом ударную волну. Захлопывание пузырьков вблизи границ течения может вызвать разрушение твердых поверхностей.

Кавитация может возникнуть при низких давлениях в трубопроводах, насосах — везде, где поток жидкости подвергается поворотам, сужениям с последующим расширением (клапаны, дроссели и т. п.).

Как правило, кавитация является нежелательным явлением, и ее не следует допускать в гидросистемах, поскольку при кавитации может возникнуть эрозия поверхностей, разрушение элементов гидромашин и гидросистем, увеличение сопротивления трубопроводов, резкое снижение коэффициента полезного действия гидромашин.

Кипение и кавитация нарушают сплошность жидкости и ограничивают область применения законов, основанных на представлении сплошности жидкой среды.

Облитерация. Заращивание узких щелей и зазоров вследствие адсорбции (отложения) полярноактивных молекул жидкости на их стенках называется облитерацией. Образующийся у стенок слой жидкости приобретает свойства квазитвердого тела, вязкость которого отличается по величине от вязкости жидкости. В результате часть граничного слоя прилипает к поверхности щели. Толщина этого слоя для масел равна 4...5 мкм, что может существенно уменьшить поперечное сечение щелевых каналов и зазоров или даже полностью их зарастить.