

1. ЖИДКОСТЬ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

1.1. Общие сведения о жидкости

Жидкость – физическое тело, обладающее свойством текучести и почти полным отсутствием сопротивления разрыва.

Текучесть жидкости – это отсутствие собственной формы, т.е. способность жидкости принимать форму сосуда, в который она помещена.

Жидкости в гидромеханике делят на два вида: капельные и газообразные. К капельным жидкостям относятся вода, нефть, бензин, ртуть, спирт, масло и др.

Эти жидкости в малых объемах принимают форму капли, а в больших для них характерно наличие поверхности раздела с газом – свободной поверхности.

Капельные жидкости характеризуются:

- большим сопротивлением сжатию (практически несжимаемы);
- малым сопротивлением растягивающим и касательным усилиям (незначительные силы сцепления и трения между частицами жидкости);
- незначительной температурной расширяемостью;
- наличием свободной поверхности – поверхности раздела между газообразной средой и жидкостью.

Газообразные жидкости – это легко сжимаемые газы (воздух, азот, кислород и др.).

В дальнейшем под термином «жидкость» будем понимать только капельную жидкость.

Существуют два понятия: реальная жидкость и идеальная жидкость.

Реальная жидкость – это жидкость, существующая в природе.

Идеальная жидкость – это несжимающаяся, нерасширяющаяся, обладающая абсолютной подвижностью частиц, отсутствием сил внутреннего трения.

Это понятие введено для облегчения решения задач гидромеханики.

1.2. Основные физические свойства жидкостей, единицы измерения

1.2.1. Единицы измерения

Используются различные системы измерения физических величин: СИ (международная), СГС (физическая) и МКГСС (техническая). В табл. 1.1 приведены основные величины и их единицы измерения.

Таблица 1.1

Наименование величины	СИ	СГС	МКГСС
Длина	м	см	м
Масса	кг	г	кгс с ² /м
Время	с	с	с
Плотность	кг/м ³	г/см ³	кгс с ² /м ⁴
Сила	Н (ньютон)	дин (дина)	кгс
Удельный вес	Н/м ³	дин/см ³	кгс/м ³
Работа, энергия	Дж (джоуль)	эрг	кгс м
Мощность	Вт (ватт)	эрг/с	кгс · м/с
Давление	Па = Н/ м ²	дин/см ²	кгс/м ²
Динамический коэффициент	Н · с/м ²	П=дин · с/ см ²	кгс · с/м ²

вязкости		(пуаз)	
Кинематический коэффициент вязкости	м ² /с	Ст=см ² /с (стокс)	м ² /с

Это не все физические величины, небольшая часть, которая понадобится при изучении курса гидравлики.

Кроме рассмотренных систем единиц в современной литературе широко используются внесистемные единицы.

Рассмотрим, в частности, единицы, характеризующие давление:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм.рт.ст.} = 133,3224 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм. вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па} = 10 \text{ Па (для учебных целей)};$$

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 \text{ (техническая атмосфера)} = 9,80665 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$1 \text{ атм} - \text{(физическая атмосфера)} = 760 \text{ мм.рт.ст.} = 1,033 \text{ кгс/см}^2 = 1,01325 \text{ бар}.$$

Будем пользоваться системой единиц СИ. Паскаль (Па) – очень малая величина и пользуются мегапаскалем (МПа).

$$1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па};$$

$$10 \text{ ат} = 1 \text{ МПа}.$$

Ознакомившись с системами единиц, перейдем к рассмотрению основных физических свойств жидкости.

1.2.2. Плотность и удельный вес

Основными физическими свойствами жидкостей являются: плотность, удельный вес, сжимаемость, вязкость. А для жидкостей, применяемых в гидроприводах, еще и смазывающая способность, физическая, механическая, химическая стабильность.

Распределение жидкости по объему характеризуется плотностью и удельным весом. Плотность жидкости ρ – это отношение массы однородной жидкости к ее объему:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.1)$$

где m – масса жидкости; V – объем жидкости.

Понятие относительной плотности широко используется в гидравлике.

Относительной плотностью жидкости ρ_0 называется отношение плотности жидкости к плотности воды ρ_B , взятой при $t = 3,98$ °С, т.е.

$$\rho_0 = \frac{\rho}{\rho_B}. \quad (1.2)$$

Относительная плотность – величина безразмерная.

Удельный вес жидкости γ – это отношение веса жидкости G к ее объему:

$$\gamma = \frac{G}{V}. \quad (1.3)$$

Между удельным весом и плотностью существует следующая связь: т.к. согласно закону Ньютона масса и вес связаны соотношением $G = mg$, где g – ускорение свободного падения, то

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g. \quad (1.4)$$

Относительный удельный вес жидкости γ_0 при определенной температуре этой жидкости можно найти из равенства

$$\gamma_0 = \frac{\gamma_t}{\gamma_B}, \quad (1.5)$$

где γ_t – удельный вес жидкости, взятый при определенной температуре; γ_B – удельный вес воды, взятый при $t = 3,98$ °С.

Плотность, так же как и удельный вес, зависит от давления и температуры. Плотность и удельный вес жидкостей уменьшаются с повышением температуры и уменьшением давления. Вода в диапазоне от 0 до 3,98 °С представляет исключение: при $t = 3,98$ °С вода характеризуется наибольшими значениями ρ и γ .

Следующее свойство: удельный объем.

Удельный объем – это величина, обратная плотности:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}. \quad (1.6)$$

Отсюда можем записать, что $v \rho = 1$.

Мы рассмотрели общие свойства жидкости..

1.2.3. Сжимаемость жидкости

Сжимаемость жидкости – это свойство жидкости изменять свой объем (плотность) при изменении давления и температуры.

Величина сжатия, зависящая от давления, характеризуется коэффициентом объемного сжатия β_v (β_p).

Коэффициент объемного сжатия показывает относительное изменение объема жидкости, приходящееся на единицу изменения давления:

$$\beta_v = - \frac{\Delta V}{V_0} \cdot \frac{1}{\Delta p}, \quad (1.7)$$

где V_0 – начальный объем жидкости (при начальном давлении p_0); $\Delta V = V_p - V_0$ – изменение объема жидкости при изменении давления на величину $\Delta p = p - p_0$.

Знак «-» в формуле обусловлен тем, что положительному приращению давления соответствует отрицательное приращение (уменьшение) объема.

Единицы измерения β_v : СИ – $\text{м}^2/\text{Н}$, СГС – $\text{см}^2/\text{дин}$, МКГСС – $\text{м}^2/\text{кгс}$.

Например, для минеральных масел, применяемых в гидроприводах, значения β_v (при $t = 20$ °С) равны: $\beta_v = 60,4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$ при 7 МПа, $\beta_v = 44 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$ при 70 МПа. Величина β_v весьма мала. В практических задачах изменением объема (плотности) при изменении давления пренебрегают. Однако обязательно учитывают при гидроударе, колебаниях жидкости.

Следующим параметром, характеризующим сжимаемость, является объемный модуль упругости.

Объемный модуль упругости E – это величина обратная коэффициенту объемного сжатия жидкости:

$$E = \frac{1}{\beta_v}. \quad (1.8)$$

Единицы измерения E : в системе СИ – Н/м², СГС – дин/см², МКГСС – кгс/м².

Значения β_v и E зависят от давления и температуры, т.е.

$\beta_v = f(p, t)$, $E = f(p, t)$. Обычно с ростом давления значение E увеличивается, а с ростом температуры значение E уменьшается.

Различают адиабатический и изотермический модули объемной упругости жидкости. Адиабатический модуль упругости по величине больше изотермического и применяется при исследовании быстро – протекающих (динамических) процессов, т.е. когда отсутствует теплообмен из-за инерционности тепловых свойств жидкости. Изотермический модуль упругости является статическим показателем и используется при изучении статических и динамических низкочастотных процессов, когда температура жидкости очень медленно изменяется при медленном сжатии жидкости или остается постоянной: $E_{ад} \cong 1,5E_{из}$.

Модуль упругости минеральных масел, применяемых в гидроприводах, находится в пределах 1350...1750 МПа, а воды ~ 2000 МПа.

Следующий коэффициент, который рассмотрим, называется коэффициентом температурного расширения. Коэффициент температурного расширения показывает относительное изменение объема жидкости, приходящееся на единицу изменения температуры:

$$\beta_t = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot \frac{1}{\Delta t}, \quad (1.9)$$

где $\Delta V = V_t - V_0$ – изменение объема жидкости, вызванное изменением температуры на величину $\Delta t = t - t_0$.

Объем жидкости при нагревании до температуры t вычисляется по формуле

$$V_t = V_0(1 + \beta_t \Delta t) = V_0[1 + \beta_t(t - t_0)]. \quad (1.10)$$

Это следует учитывать при расчете емкостей.

Для минеральных масел, применяемых в гидроприводах, $\beta_t \approx \approx 0,00006...0,00085$ 1/°С.

Коэффициенты температурного расширения для жидкостей значительно выше их коэффициентов объемного сжатия, тем не менее, они также очень малы. Поэтому на практике для большинства инженерных расчетов их не учитывают.

Следующее важное свойство жидкости, которое рассмотрим, называется вязкостью.

1.2.4. Вязкость жидкости

Вязкость – это свойство реальной жидкости оказывать сопротивление относительно перемещению (сдвигу) отдельных частиц или слоев жидкости при приложении внешних сил. Вязкость проявляется лишь при течении жидкости.

Рассмотрим поток жидкости (рис. 1.1), условно состоящий как бы из отдельных слоев. Обозначим оси в прямоугольной системе координат. По оси абсцисс отложим скорость частиц жидкости в слое V , а по оси ординат – расстояние между слоями y .

Если ось V находится на дне водоема, то скорость в точке O равна нулю. Слои жидкости движутся с различной скоростью. Скорости слоев изменяются по параболической кривой.

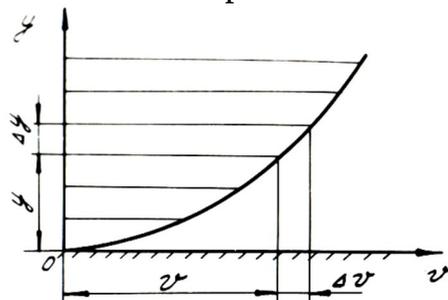


Рис. 1.1. Течение вязкой жидкости вдоль твердой стенки

При течении вязкой жидкости происходит проскальзывание между слоями жидкости, которое сопровождается возникновением касательных напряжений (напряжений трения).

Удельная сила трения – это сила внутреннего трения между слоями жидкости, приходящаяся на единицу поверхности.

Согласно гипотезе, высказанной И. Ньютоном в 1686 году и экспериментально обоснованной проф. Н.П.Петровым в 1883 году, удельная сила трения (касательные напряжения в жидкости τ) прямо пропорциональна поперечному градиенту скорости и зависит от рода жидкости.

Таким образом, τ определяется по формуле (закон вязкого трения Ньютона)

$$\tau = \mu \frac{\Delta V}{\Delta y}, \quad (1.11)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости; $\Delta V / \Delta y$ – поперечный градиент скорости. Градиент скорости характеризует изменение скорости, приходящееся на единицу длины между слоями в направлении оси y .

Градиент скорости показывает интенсивность сдвига слоев жидкости в данной точке.

Сила трения между слоями жидкости определяется по формуле

$$T = S\tau = S\mu \frac{\Delta V}{\Delta y}, \quad (1.12)$$

где S – площадь соприкасающихся слоев.

Единицы измерения μ : СИ – Н·с/м², СГС – П = дин·с/см², МКГСС – кг·с/м².

На практике наиболее часто пользуются не динамическим коэффициентом вязкости, а его отношением к плотности жидкости, называемым кинематическим коэффициентом вязкости.

Кинематический коэффициент вязкости ν – это отношение динамического коэффициента вязкости к плотности жидкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.13)$$

Единицы измерения кинематического коэффициента вязкости ν : СИ – м²/с, СГС – см²/с = 1 Ст (стокс).

Стокс – большая величина. На практике пользуются сотыми долями – сантистоксами: 1 сСт = 10⁻² Ст.

Значения вязкости приводятся в таблицах при определенной температуре жидкости (обычно при + 50 °С). Вязкость капельных жидкостей зависит от рода жидкости, давления и температуры. От температуры вязкость зависит в сильной степени: при увеличении температуры вязкость уменьшается.

Зависимость вязкости от давления существенно проявляется лишь при относительно больших изменениях давления: вязкость увеличивается с ростом давления.

Индекс вязкости характеризует степень постоянства вязкости жидкости при изменении температуры. Чем выше индекс вязкости, тем более пологой является кривая зависимости вязкости от температуры (рис. 1.2). Наилучшей жидкостью является жидкость со стабильной вязкостью во всем интервале рабочих температур.

Индекс вязкости (ИВ) определяют, сравнивая кривую $\nu = \nu(t)$ исследуемого масла с кривыми $\nu_1 = \nu_1(t)$, $\nu_2 = \nu_2(t)$ двух эталонных масел с одинаковой вязкостью ν_{100} при $t = 100$ °С . Первое из этих масел (кривая 1) имеет пологую характеристику и условно имеет ИВ = 100, а второе имеет крутую характеристику (кривая 2) и условно имеет ИВ = 0. Обычно для промышленных масел ИВ = 70...100, для загущенных ИВ = 120...180. Практически ИВ определяют по номограммам.

Вязкость жидкостей измеряют опытным путем при помощи вискозиметров. Наиболее распространенным является вискозиметр Энглера (рис. 1.3), который представляет цилиндрический сосуд $\varnothing 106$ мм с короткой трубкой $\varnothing 2,8$ мм, встроенной в дно.

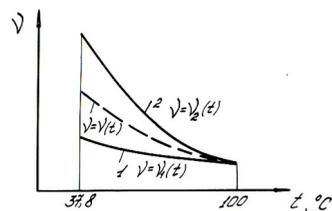


Рис. 1.2. Зависимость кинематического коэффициента вязкости от температуры

Время t истечения 200 см^3 испытуемой жидкости из вискозиметра через эту трубку под действием силы тяжести, деленное на время $t_{\text{вод}}$ истечения того же объема дистиллированной воды при 20 °С, выражает вязкость в градусах Энглера:

$${}^{\circ}\text{E} = \frac{t}{t_{\text{вод}}}, \quad (1.14)$$

где $t_{\text{вод}} = 51,6 \text{ с}$.

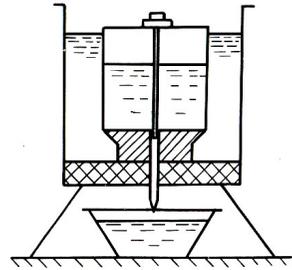


Рис. 1.3. Принципиальная схема вискозиметра
Энглера

Для пересчета градусов Энглера в стоксы в случае минеральных масел применяют формулу Уббеллоде:

$$\nu = \left(0,0731 {}^{\circ}\text{E} - \frac{0,0631}{{}^{\circ}\text{E}} \right) \frac{\text{см}^2}{\text{с}}. \quad (1.15)$$

1.3. Особые состояния жидкости

1.3.1. Растворение газов в жидкости

Все жидкости, в том числе и рабочие жидкости гидросистем обладают способностью растворять газ, а при определенных условиях выделять его в виде пузырьков.

Относительное количество газа, которое может раствориться в жидкости до ее насыщения, по закону Генри прямо пропорционально давлению на поверхности раздела, т.е.:

$$\frac{V_{\Gamma}}{V_{\text{ж}}} = k \frac{P}{P_0}, \quad (1.16)$$

где V_{Γ} – объем растворенного газа, приведенный к нормальным условиям P_0 , T_0 ; $V_{\text{ж}}$ – объем жидкости; P – давление; k – коэффициент растворимости.

Для воды коэффициент растворимости воздуха $k = 0,016$, для керосина $k = 0,127$, для минеральных масел $k = 0,07 \dots 0,11$.

Наличие газа в жидкости ухудшает или полностью исключает нормальную работу гидропривода, в частности, нарушается плавность движения приводимых узлов, понижается производительность насосов, появляется запаздывание действия гидропривода и др.

1.3.2. Кавитация

Кавитацией называется выделение из жидкости паров и газа (местное закипание жидкости), обусловленное местным падением давления в потоке, с последующей конденсацией паров в области более высокого давления.

При кавитации нарушается неразрывность потока жидкости, происходят местные гидравлические удары с повышением давления до 100 МПа и выше.

Кавитация – крайне вредное явление, приводящее к разрушению элементов гидропривода.

Физическая стабильность жидкости – способность ее длительно сохранять свои первоначальные физические свойства (вязкость, плотность, смазывающую способность) при работе на высоких давлениях.

Механическая стабильность – способность жидкости работать при значительной вибрации без расслоения на компоненты.

Химическая стабильность жидкости – устойчивость жидкости к окислению кислородом воздуха. При окислении из жидкости выпадает осадок в виде смолы и коксоподобных веществ, которые, попадая в зазоры гидроаппаратов, парализуют их работу. Заращивание щелей гидроаппаратов называется облитерацией.

К рабочим жидкостям, применяемым в гидроприводах, предъявляют следующие основные требования:

высокий индекс вязкости;
хорошая смазывающая способность;
физическая, механическая стабильность при хранении и эксплуатации.

1.2. Рабочие жидкости гидросистем

В гидроприводе жидкость выполняет функции рабочего тела, поэтому ее называют рабочей жидкостью. С помощью рабочей жидкости энергия передается от источника (насоса) к исполнительным гидродвигателям.

Кроме того, рабочая жидкость является смазочным материалом для многочисленных пар трения, охлаждающим агентом пар трения, средой, удаляющей из пар трения продукты изнашивания и обеспечивающей при длительной эксплуатации защиту деталей от коррозии.

Поэтому одной из функций жидкости является снижение трения и устранение износа элементов гидросистемы, изготовленных из различных конструкционных материалов.

Не менее важной функцией, выполняемой рабочей жидкостью в гидросистеме, является отвод тепла от различных участков системы.

Нагрев элементов гидропривода вызывается трением подвижных частей в гидромашинах и гидроаппаратах, потерями энергии на трение и вихреобразование при течении жидкости в трубопроводах, распределителях, дросселях и других элементах гидропривода.

Для обеспечения защиты деталей элементов гидросистемы от коррозии при длительной эксплуатации машины рабочая жидкость не должна содержать воду, для чего в некоторые жидкости вводятся специальные присадки – ингибиторы коррозии.

Исходя из основных функций, выполняемых рабочей жидкостью в гидроприводе, формулируются и требования к ней.

Рабочая жидкость должна обладать хорошей смазывающей способностью, быть стабильной в процессе хранения и эксплуатации, иметь необходимые вязкостные свойства, быть совместимой с материалами гидросистемы, обеспечивать хороший теплоотвод, иметь высокий индекс вязкости (ИВ), высокий модуль объемной упругости и низкое давление насыщенных паров, минимальную вспениваемость и высокую стойкость к образованию водных эмульсий, предотвращать образование ржавчины.

При выборе рабочей жидкости следует учитывать ее вязкость, температуру и давление, при которых будет эксплуатироваться гидросистема.

Температура застывания рабочей жидкости должна быть на 15...20 °С ниже наименьшей температуры окружающей среды. Максимальная температура рабочей жидкости в гидросистеме не должна превышать 70...80 °С.

Единой системы классификации и обозначения рабочих жидкостей не существует. Распространено обозначение рабочих жидкостей по области применения. Чаще их называют маслами гидравлическими, вводя в обозначение буквы МГ с дополнительным уточнением назначения: для гидросистем общепромышленного назначения – масла индустриальные гидравлические – ИГ, для авиационной техники АМГ, для мобильных машин – МГЕ, ВМГЗ /20/.

Для гидроприводов строительных и дорожных машин рекомендуются к применению два сорта рабочей жидкости – ВМГЗ, МГ-30 и МГ-30у /5, 8/.

Масло ВМГЗ – основной зимний сорт для гидросистем строительных и дорожных машин; допускает работу при температуре окружающей среды от – 40 до + 50 °С; рабочая температура до + 90 °С /8, 20/. В связи с интенсивным использованием строительных и дорожных машин масло, как правило, заменяют каждый сезон (летом заправляют маслом МГ-30).

Обозначение гидравлических масел по ГОСТ 17479.3–85 состоит из групп знаков, первая из которых обозначается буквами МГ (минеральное гидравлическое); вторая группа знаков – цифрами и характеризует класс кинематической вязкости; третья – обозначается буквами и указывает на принадлежность масла к группе по эксплуатационным свойствам.

В зависимости от величины кинематической вязкости при температуре 40 °С гидравлические масла делят на классы, указанные в табл. 1.4 /14/.

Классы вязкости гидравлических масел

Класс вязкости	Кинематическая вязкость при температуре 40 °С мм ² /с (сСт)
5	4,14 – 5,06
7	6,12 – 7,48
10	9,00 – 11,00
15	13,50 – 16,50
22	19,80 – 24,20
32	28,80 – 35,20
46	41,40 – 50,60
68	61,20 – 74,80
100	90,00 – 110,00
150	135,00 – 165,00

В зависимости от эксплуатационных свойств гидравлические масла делят на группы А, Б, В, указанные в табл. 1.5.

Группы гидравлических масел

Группа масла по эксплуатационным свойствам	Состав гидравлических масел	Рекомендуемая область применения
А	Минеральные масла без присадок	Гидросистемы с шестеренными, поршневыми насосами, работающими при давлении до 15 МПа и температуре масла в объеме до 80 °С
Б	Минеральные масла с антиокислительными и антикоррозийными присадками	Гидросистемы с насосами всех типов, работающие при давлении до 25 МПа и температуре масла в объеме более 80 °С
В	Минеральные масла с антиокислительными, антикоррозийными и противоизносными присадками	Гидросистемы с насосами всех типов, работающие при давлении свыше 25 МПа и температуре масла в объеме более 90 °С

Допускается добавление в гидравлические масла всех групп загущающих и антипенных присадок.

Пример обозначения гидравлических масел:

МГ – 15 – В,

где МГ – минеральное гидравлическое масло; 15 – класс вязкости; В – группа масла по эксплуатационным свойствам.

Допустимые температурные пределы рабочей жидкости и окружающего воздуха приведены на рис. 1.2.