

---

Федеральное агентство по образованию  
Тверской государственной технической университет.

А.Ш.Барекян

**Основы гидравлики и гидропневмоприводов**

Учебное пособие

Издание первое

Тверь 2006

---

Федеральное агентство по образованию  
Тверской государственный технический университет.

А. Ш. Барекян

**Основы гидравлики и гидропневмоприводов**

Учебное пособие

Издание первое

Тверь 2006

Глава первая  
**СВОЙСТВА И СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ**

**1.1. Основные определения**

Жидкости и газы являются рабочей средой в гидравлических и пневматических приводах, с помощью которых осуществляется передача энергии.

Гидравлическим и пневматическим приводом называется совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение механизмов и машин посредством рабочей среды под давлением.

В качестве рабочей жидкости в гидроприводах используются в основном минеральные масла. В пневмоприводах в качестве рабочего агента применяется очищенный воздух.

Знание свойств и состояний жидкостей и газов необходимо при проектировании гидро- и пневмоприводов.

**Ж и д к о с т ь** – физическое тело, обладающее свойством текучести, в силу чего жидкость не имеет собственной формы и принимает форму сосуда, в который её помещают.

Жидкость делят на два вида: капельные и газообразные. Капельные жидкости характеризуются большим сопротивлением сжатию (почти несжимаемы) и малым сопротивлением растягивающим и касательным усилиям.

Газы способны к весьма значительному уменьшению своего объёма под действием давления и к неограниченному расширению при отсутствии давления. В отличие от газов (сжимаемые жидкости) капельные жидкости образуют свободную поверхность.

## Глава первая **СВОЙСТВА И СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ**

### **1.1. Основные определения**

Жидкости и газы являются рабочей средой в гидравлических и пневматических приводах, с помощью которых осуществляется передача энергии.

Гидравлическим и пневматическим приводом называется совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение механизмов и машин посредством рабочей среды под давлением.

В качестве рабочей жидкости в гидроприводах используются в основном минеральные масла. В пневмоприводах в качестве рабочего агента применяется очищенный воздух.

Знание свойств и состояний жидкостей и газов необходимо при проектировании гидро- и пневмоприводов.

**Ж и д к о с т ь** – физическое тело, обладающее свойством текучести, в силу чего жидкость не имеет собственной формы и принимает форму сосуда, в который её помещают.

Жидкость делят на два вида: капельные и газообразные. Капельные жидкости характеризуются большим сопротивлением сжатию (почти несжимаемы) и малым сопротивлением растягивающим и касательным усилиям.

Газы способны к весьма значительному уменьшению своего объёма под действием давления и к неограниченному расширению при отсутствии давления. В отличие от газов (сжимаемые жидкости) капельные жидкости образуют свободную поверхность.

Несмотря на различия, законы движения капельных жидкостей и газов при определённых условиях можно считать одинаковыми, например в случае, когда сжимаемостью газов можно пренебречь. Жидкости, существующие в природе, называются реальными. Для облегчения решения многих задач гидравлики введено абстрактное понятие идеальной жидкости, которая обладает абсолютной подвижностью частиц (отсутствуют силы внутреннего трения – вязкость равна нулю).

Формулы, полученные для идеальной жидкости, корректируются результатами опытов.

Жидкость в гидравлике рассматривается как непрерывная среда, заполняющая пространство без пустот и промежутков. Тем самым отвлекаются от молекулярного строения вещества и рассматриваемые частицы жидкости, даже весьма малые, считаются состоящими из большого числа молекул. В этом состоит гипотеза, которая упрощает исследование, так как позволяет рассматривать характеристики среды (скорость, давление, плотность) как функции координат в пространстве и времени, причем эти функции предполагаются непрерывными и дифференцируемыми.

Внешние силы, действующие на объёмы жидкости, делят на массовые и поверхностные. Массовые силы (например, сила тяжести, силы инерции переносного движения) пропорциональны массе жидкого тела. Массовые силы обычно относят к единице массы.

Поверхностные силы непрерывно распределены по поверхности жидкости. В общем случае равнодействующую поверхностной силы  $\Delta F$ , действующую на площадку  $\Delta S$  под некоторым углом, можно разложить на нормальную  $\Delta F_n$  и тангенциальную  $\Delta F_t$  (рис. 1.1).

Первая направлена внутрь объёма жидкости и называется силой давления, а  $\Delta F_t$  силой трения. Поверхностные силы относят к единице площади.

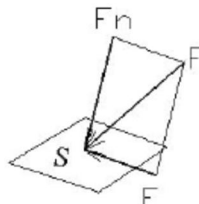


Рис.1.1

Нормальная сжимающая сила, приходящаяся на единицу площади, называется гидромеханическим давлением, а в случае покоя жидкости – гидростатическим давлением, или просто давлением и обозначается буквой  $P$ .

Среднее давление определяют по формуле  $P_{cp} = \frac{\Delta F}{\Delta S}$ , а  $P = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S}$

называется давлением в точке.

За единицу давления в международной системе единиц (СИ) принята  $1 \text{ Н/м}^2$  – Паскаль (Па).

Касательное напряжение  $\tau$  выражается подобно давлению

$$\tau = \frac{\Delta F_r}{\Delta S}$$

с той же единицей измерения.

## 1.2. Основные физические свойства жидкостей и газов

**Плотность.** Плотность  $\rho$  – масса жидкости  $M$  в единице объема  $W$ .  
Для однородной жидкости

$$\rho = \frac{M}{W}. \quad (1.1)$$

**Удельный объем** жидкости  $V$  – объем, занимаемый единицей массы

$$V = \frac{1}{\rho}. \quad (1.2)$$

**Сжимаемость.** Это свойство капельной жидкости изменять свой объем под действием давления и характеризуется коэффициентом объемного сжатия  $\beta_p$ , который представляет собой относительное изменение объема жидкости при увеличении давления на единицу

$$\beta_p = -\frac{\Delta W}{W \Delta P}, \quad (1.3)$$

где  $W$  – первоначальный объем;  $\Delta W$  – изменение объема;  $\Delta P$  – изменение давления. Знак “минус” указывает, что увеличению давления соответствует уменьшение объема. Из (1.3), пользуясь (1.1), получим плотность при изменении давления на величину  $\Delta P$ :

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \beta_p \Delta P}, \quad (1.4)$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность.

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

$$K = \frac{1}{\beta_p}. \quad (1.5)$$

Выражая объем через плотность и переходя к дифференциалам, получим

$$K = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad \text{или} \quad \frac{K}{\rho} = \frac{dP}{d\rho} = a^2, \quad (1.6)$$

где  $a$  – скорость распространения волн в упругой среде, равная скорости звука в той же среде.

В большинстве случаев капельные жидкости можно считать практически несжимаемыми, т.е. принимать их плотность не зависящей от давления. Но при очень высоких давлениях и упругих колебаниях сжимаемость жидкостей следует учитывать.

**Тепловое расширение** – свойство жидкости изменять объем при изменении температуры, характеризуется коэффициентом  $\alpha$ , объемного

расширения, который представляет собой относительное изменение объема при изменении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_t = \frac{\Delta W}{W \Delta t}, \quad (1.7)$$

где  $\Delta t = t - t_0$  - изменение температуры.

Тогда плотность  $\rho$  при температуре  $t$  будет

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha_t \Delta t}, \quad (1.8)$$

где  $\rho_0$  - плотность при температуре  $t_0$ .

Для капельных жидкостей изменение плотности от температуры в определенных пределах можно пренебречь. Однако когда жидкость заключена в замкнутом жестком объеме, увеличение температуры может привести к опасному повышению давления.

**С о с т о я н и е г а з о в.** В отличие от капельных жидкостей газы характеризуются значительной сжимаемостью и высокими значениями коэффициента температурного расширения. Зависимость плотности газов от давления и температуры устанавливается уравнением состояния.

Наиболее простыми свойствами обладает разреженный газ, когда взаимодействие между его молекулами не учитывается. В этом случае газ называется совершенным, или идеальным. Для идеальных газов справедливо уравнение Клайперона, позволяющее определять плотность газа при известных давлении и температуре

$$\rho = \frac{P}{RT}, \quad (1.9)$$

где  $P$  - давление;  $R$  - удельная газовая постоянная, различная для разных газов, но не зависящая от температуры и давления;  $T$  - абсолютная температура.

В частности, для воздуха  $R = 287$  дж/кг·К. Поведение реальных газов в условиях, далеких от сжижения, лишь незначительно отличается от поведения совершенных газов. Поэтому для реальных газов можно применять уравнение Клайперона в широких пределах.

Плотность газа для облегчения технических расчетов приводит к нормальным физическим уровням ( $t = 0^{\circ}$ ;  $P_0 = 101325$  Па) или к стандартным условиям ( $t = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $P_0 = 101325$  Па). Плотность воздуха в стандартных условиях  $\rho_0 = 1.2$  кг/м<sup>3</sup>.

Плотность воздуха при других условиях  $P$  и  $T$  будет

$$\rho = \rho_0 \frac{PT_0}{P_0T}. \quad (1.10)$$

Изотермический процесс проходит при  $T = \text{Const}$ , но сам процесс сопровождается теплообменом, поэтому из (1.9) имеем

$$\frac{P}{\rho} = \text{Const}. \quad (1.11)$$

При адиабатическом процессе теплообмен отсутствует и

$$\frac{P}{\rho^k} = \text{Const}, \quad (1.12)$$

где  $k = \frac{C_p}{C_v}$  – показатель адиабаты;  $C_p$  – теплоемкость газа при постоянном давлении;  $C_v$  – теплоемкость газа при постоянном объеме.

Для воздуха  $k = 1,4$

Для политропического процесса

$$\frac{P}{\rho^n} = Const, \quad (1.13)$$

где  $n$  – показатель политропы.

Сжимаемость газов зависит от характера процесса. Так, при изотермическом процессе объемный модуль упругости

$$K = P,$$

а при адиабатическом

$$K = \kappa p.$$

Скорость распространения звука в однородной газовой среде при изотермическом процессе можно определить из выражения (1.6), приведенного к виду

$$a = \sqrt{\frac{P}{\rho}} = \sqrt{RT}. \quad (1.14)$$

Для адиабатического процесса

$$a = \sqrt{kRT}. \quad (1.15)$$

Значительные разности давлений, вызывающие существенное изменение плотности газов, могут возникнуть при движении с большими скоростями. Практически плотность можно принимать неизменной при скоростях движения до 100 м/с.

**Вязкость.** Вязкостью называется свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу (относительному смещению слоев). Сила сопротивления сдвигу называется силой внутреннего трения.

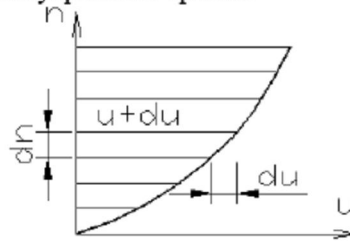


Рис.1.2.

Пусть жидкость течет вдоль плоской стенки параллельными слоями. Вследствие влияния стенки слои жидкости будут двигаться с разными скоростями с возрастанием от стенки, образуя профиль скоростей (рис.1.2). Сила внутреннего трения между слоями выражается согласно гипотезе Ньютона зависимостью

$$T = \pm \mu S \frac{du}{dn}, \quad (1.16)$$



где  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости;  $A$  – площадь трущихся слоев;  
 $\frac{du}{dn}$  – градиент скорости ( относительный сдвиг ).

Касательные напряжения между слоями жидкости

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dn}. \quad (1.17)$$

Берется тот знак, при котором  $\tau$  получается положительным. В системе СИ динамическая вязкость выражается через  $\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$  или  $\text{Па} \cdot \text{с}$  I  $\text{Па} \cdot \text{с} = 10 \text{ П}$  (пуаз).

Применяют также кинематическую вязкость

$$\nu = \mu / \rho.$$

Единицей кинематической вязкости служит I м/с. Кинематическую вязкость измеряют в стоксах (См),

$$1 \text{ См} = 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = 1 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

Вязкость жидкостей в сильной степени зависит от температуры. Кинематическая вязкость капельных жидкостей при увеличении температуры уменьшается, а вязкость газов возрастает.

### 1.3. Некоторые характеристики и требования к жидкостям, применяемым в гидросистемах

Физические свойства жидкостей и другие их характеристики должны удовлетворять условиям эксплуатации систем гидроприводов и гидроавтоматики. Универсальной рабочей жидкости не существует. Поэтому рабочую жидкость для каждой гидросистемы выбирают исходя из требований, предъявляемых к системе.

Рассмотрим некоторые специальные характеристики рабочих жидкостей – масел, применяемых в гидросистемах.

Индекс вязкости характеризует степень постоянства вязкости жидкости при изменении температуры. Чем выше индекс вязкости, тем более пологой является кривая вязкости. В лучшем случае вязкость должна быть стабильной в интервалах рабочих температур. Индекс вязкости выводится путем сравнения с эталонной жидкостью. Вязкость масел повышается с ростом давления. Вязкость масла с высоким значением индекса вязкости меньше изменяется при повышении давления.

Физической стабильностью жидкости называется ее способность длительно сохранять свои первоначальные свойства (вязкость, плотность, смазывающую способность) при работе в условиях высоких давлений, при больших перепадах давлений и значительной вибрации.

Химической стабильностью называется устойчивость жидкости к окислению кислородом воздуха. При окислении, особенно при высоких температурах, из жидкости выпадают осадки в виде смолы и коксоподобных веществ, которые, попадая в зазоры гидроаппаратов, парализуют их работу. Окисление приводит к увеличению вязкости и снижает способность масла отделять воду и воздух. На скорость окисления существенно влияют температура масла, интенсивность перемешивания и присутствие воздуха. При увеличении температуры от 50° до 70° в связи с резким увеличением скорости окислительных реакций срок эксплуатации масла уменьшается вдвое.

Смазывающая способность – свойство жидкости, обеспечивающее уменьшение контактного трения. Смазывающую способность масел улучшают введением различных присадок.

Растворимость и выделение газов. Все жидкости способны растворять газ, а при понижении давления или повышении температуры выделять его в виде пузырьков. При этом в жидкости образуются разрывы сплошности, жидкость вспенивается, и условия работы гидросистемы ухудшаются. Выделение газа происходит до тех пор, пока не наступает равновесие между жидкой и газовой фазами системы.

Интенсивность растворения и время насыщения жидкостей газом зависит от площади их соприкосновения и интенсивности перемешивания жидкости. Степень насыщения газом рабочих жидкостей зависит от вида газа. У

кислорода растворимость выше, чем у азота, а у углекислого газа – самая высокая. Большое количество выделившихся мелких пузырьков могут соединиться и создать газовые пробки, что приводит к нарушению нормальной работы гидросистемы и ухудшению динамических характеристик гидропривода.

Кроме того, выделяемый из жидкости газ образует пену. Пенообразование приводит к интенсивному протеканию окисления, нарушает нормальную работу насоса, ухудшает смазывающую способность масел и способствует коррозии стальных деталей. Одной из мер борьбы с пеной является введение в рабочую жидкость специальных противопенных присадок.

**К а в и т а ц и я** – это явление, когда пузырьки пара или паровоздушные пузырьки, появившиеся при давлении в движущейся жидкости, меньшем давления насыщенных паров, попадая в область повышенного давления, смыкаются (паровые пузырьки конденсируются, а газовые сжимаются). Разрушение пузырьков сопровождается шумом, вибрацией и местными гидравлическими ударами, приводящими к постепенному эрозийному разрушению твердых стенок. Возникновение кавитации значительно усиливается при наличии в жидкости пузырьков воздуха, а также растворенных газов. Кавитационные явления наиболее часто возникают в рабочих полостях насосов, гидродвигателей, в клапанах и в щелях распределительной аппаратуры. Одной из мер борьбы с кавитацией является повышение давления в зонах возможного разрыва жидкости.

**В о с п л а м е н я е м о с т ь** рабочей жидкости имеет большое значение, особенно при работе в закрытых помещениях. Существуют три показателя воспламеняемости: температура вспышки; температура воспламенения; температура самовоспламенения. Наименьшая температура – это температура вспышки, которая для некоторых минеральных масел равна (360 - 390) К. При выборе масел необходимо учитывать температурные свойства.

**О б л и т е р а ц и я**. Установлено, что расход даже тщательно очищенной жидкости через щели и отверстия малых размеров не подчиняется классическим законам гидродинамики. Интенсивность уменьшения расхода зависит от перепада давления, формы и размеров щелей, типа рабочей жидкости, её чистоты, температуры и материала стенок. Уменьшение расхода жидкости при течении через щели микронных размеров называется облитерацией и объясняется следующим образом. Рабочая жидкость содержит активно-полярные молекулы, а металлические стенки щелей обладают поверхностной энергией в виде внешнего электрического поля. Поэтому протекание через щель сопровождается отложением поляризованных молекул на ее стенках, толщина слоя которых может достигать до 10 мкм. Этот слой обладает свойствами квазитвердого тела и может выдержать большие нагрузки не разрушаясь. Поляризованный слой молекул разрушается при увеличении перепада давления, но потом эта щель снова зарастает. Эффективным средством борьбы с облитерацией является механическое удаление слоя поляризованных молекул при помощи относительного перемещения поверхностей щели.

Обобщая свойства и характеристики рабочих жидкостей, приходим к выводу, что им должны быть присущи: хорошие смазывающие свойства, высокий индекс вязкости, большой модуль упругости, химическая и физическая стабильность в течение длительного времени эксплуатации, сопротивляемость вспениванию, малая плотность и способность к растворению воздуха, хорошая теплопроводность, низкое давление насыщенных паров и высокая температура кипения, совместимость с материалами гидросистемы, негигроскопичность, нетоксичность и т.д.

Подобрать рабочую жидкость, которая бы удовлетворяла всем требованиям одновременно, практически невозможно.

Наибольшее распространение нашли минеральные масла на нефтяной основе, которые содержат антиокислительную, антипенную, антикоррозионную и антиизносную присадки. Минеральные масла имеют низкую стоимость, доступность в больших количествах, хорошую смазывающую способность и большой срок службы при высоких давлениях.

В промышленных гидросистемах широко применяют трансформаторное, веретенное АУ, индустриальное, турбинное, цилиндрическое, ВМГЗ, МГ-30, ГМ-50И и др. масла.

Некоторые масла предназначены для узкого диапазона температур (ДО-11-летний, ДП-8-зимний). Для широкого диапазона температур применяют масла АТМ, МВП, ГМ-50И, но их стоимость большая. В авиационных системах применяют масло АМГ-Ю для работы при температурах 220-360 К.

Тем не менее минеральные масла имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение. При повышенных температурах ухудшается смазывающая способность, а при низких температурах резко возрастает вязкость. Кроме того, при повышенных температурах из минеральных масел выпадают смолянистые осадки, которые засоряют ячейки фильтров и осаждаются во внутренних проходах гидроаппаратуры.

В гидроприводах и системах гидроавтоматики, работающих при температуре порядка 450 К, применяют синтетические силиконовые и кремнийорганические жидкости. Они имеют высокую химическую стойкость, хорошо смешиваются с минеральными маслами, у них отсутствует коррозионная активность.

При температурах выше 600 К нельзя применять ни минеральные, ни синтетические жидкости. Перспективным является применение жидких металлов при температурах от 260 до 1020 К, например сплав из 77 % натрия и 23 % калия. Однако жидкие металлы имеют плохие смазывающие свойства и окисляются при контакте с кислородом.

Таким образом, рабочую жидкость необходимо выбирать конкретно для каждой гидросистемы отдельно с учетом условий работы. При этом надо учитывать совместимость рабочей жидкости и материалов гидросистемы.