

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

КЕМЕРОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**А.А. Крохалёв**

**А.Б. Шушпанников**

# *Гидравлика*

---

---

*Учебное пособие*

*Рекомендовано Сибирским региональным учебно-методическим центром высшего профессионального образования для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 260100 «Технология продуктов питания», 260500 «Технология продовольственных продуктов специального назначения и общественного питания», 260600 «Пищевая инженерия», 150400 «Технологические машины и оборудование»*

*Кемерово 2006*

УДК 621.22 (075)

ББК 31.56я7

К 83

*Рецензенты:*

**Н.М. Скорняков**, профессор кафедры горных машин и комплексов  
К 83 Кузбасского государственного технического университета, д-р техн. наук;

**Б.Л. Герике**, главный научный сотрудник института угля и углехимии  
СО РАН, профессор, д-р техн. наук

*Рекомендовано редакционно-издательским советом  
Кемеровского технологического института пищевой промышленности*

**Крохалёв, А.А.**

Гидравлика: учеб. пособие / А.А. Крохалёв, А.Б. Шушпанников.  
Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. –  
Кемерово, 2006. – 98 с.

ISBN 5-89289-336-7

Учебное пособие предназначено для подготовки студентов направлений  
260100, 260500, 260600, 150400.

Содержит краткое изложение теоретических основ прикладной гидравлики.  
Приведены физические основы статики, кинематики и динамики жидкости.  
Описаны конструкции гидравлических устройств, рассмотрены вопросы гид-  
равлических расчетов трубопроводов.

Учебное пособие содержит 52 ил. и 6 библ. назв.

ISBN 5-89289-336-7

© А.А. Крохалёв, А.Б. Шушпанников, 2006

© КемТИПП, 2006

## ВВЕДЕНИЕ

Законы движения жидкости и использования её энергии занимали человечество с древнейших времён. Разрозненные, без связи между собой, теоретические работы по гидравлике велись вплоть до XV века, когда Леонардо да Винчи (1452-1519) предпринял попытку собрать отдельные элементы знаний по гидравлике и связать гидравлические закономерности с общетехническими принципами.

Кроме Леонардо да Винчи, в период с XV по XVIII в. весомый вклад в развитие законов равновесия и движения жидкостей внесли Галилео Галилей (1564-1642), Блез Паскаль (1623-1662), Исаак Ньютон (1642-1727). Но лишь в XVIII веке гидравлика оформилась в самостоятельную науку, основоположниками которой были академики Петербургской Академии наук М.В. Ломоносов (1711-1765), Леонард Эйлер (1707-1783) и Даниил Бернулли (1700-1782).

Особенно бурно гидравлика развивалась в XIX и начале XX века. В это время свои работы публиковали Н.П. Петров (1836-1920), Д.И. Менделеев (1834-1907), Р. Рейнольдс (1842-1912), Н.Е. Жуковский (1847-1921), С.А. Чаплыгин (1869-1942), И.Г. Есьман (1868-1955), А.Я. Милович (1874-1958).

Большой вклад в развитие современной гидравлики объёмного и гидродинамического привода внесли русские и советские учёные, такие, как И.С. Громеко, Н.И. Павловский, А.Н. Колмогоров, С.А. Христианович, И.М. Коновалов, Н.Н. Кременецкий, Д.В. Штеренлихт и многие др.

Развитие машиностроения потребовало разработку объёмного гидропривода на высокие давления. В этой области значительный вклад внесли Т.М. Башта, И.З. Зайченко, В.В. Ермаков, В.Н. Прокофьев и др. В исследовании гидродинамического привода большая заслуга принадлежит А.П. Кудрявцеву, И.Ф. Семичастнову, А.И. Воцинину и др.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**Гидравлика** – прикладная наука, изучающая законы равновесия (*гидростатика*) и движения (*гидродинамика*) капельных жидкостей. Наука о кинематическом и силовом взаимодействии жидкости с элементами машин и механизмов называется **технической гидромеханикой**.

**Гидравлические машины** предназначены для преобразования механической энергии двигателя в энергию перемещаемой жидкости (насосы) или гидравлической энергии потока в механическую энергию (гидродвигатели).

### 1.1. СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ

Для измерения различных механических величин применяются несколько систем единиц. В настоящее время в гидравлике наиболее употребительны международная система СИ (от начальных букв слов «Система Интернациональная»). Ее введение позволило заменить многообразие единиц измерения различных систем единой универсальной системой, охватывающей все области науки и техники, увеличить удобство практического применения размеров основных и производных единиц, упростить расчеты и записи уравнений и формул.

В качестве основных в системе СИ установлено семь независимых друг от друга единиц: длины – **метр** (м), массы – **килограмм** (кг), времени – **секунда** (с), силы электрического тока – **ампер** (А), термодинамической температуры – **кельвин** (К), силы света – **кандела** (кд), количества вещества – **моль**, из которых выводятся единицы всех остальных производных физических величин.

В механике и гидравлике, изучающей законы механики жидкостей, используют часть основных единиц СИ: метр, килограмм, секунда, с дополнительной единицей измерения плоского угла – радиан (рад).

Рассмотрим производные единицы силы, давления, работы и мощности: **ньютон** (Н) – сила, сообщаящая телу массой 1 кг ускорение  $1 \text{ м/с}^2$  в направлении действия силы; **паскаль** (Па) – давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$ ; **джоуль** (Дж) – работа силы 1 Н при перемещении тела на расстояние 1 м в направлении действия силы; **ватт** (Вт) – мощность, при которой работа в 1 Дж совершается за время 1 с.

В системе СИ принято так же, как и для других систем единиц, сокра-

ценное обозначения единиц измерения в виде одной, двух или трех букв. Единицы измерения, наименования которых образованы по именам ученых, пишут с прописной (заглавной) буквы, например, ньютон – Н, паскаль – Па, остальные обозначения единиц пишут строчными (малыми) буквами.

В системе СИ для выражения больших или малых значений физических величин приняты десятичные кратные или дольные единицы от исходных единиц. В гидравлических расчетах употребительны следующие значения множителей и приставок (табл. 1.1)

Множители и приставки Таблица 1.1

Множитель	Приставка		Пример
	наименование	обозначение	
$10^6$	мега	М	МДж (мегаджоуль)
$10^3$	кило	к	кН (килоньютон)
$10^{-2}$	санти	с	см (сантиметр)
$10^{-3}$	милли	м	мПа (миллипаскаль)
$10^{-6}$	микро	мк	мкВт (микроватт)

## 1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ

**Жидкость** – физическое тело, обладающее свойством текучести, в силу чего жидкость не имеет собственной формы и принимает форму сосуда, в который ее помещают. *Жидкости делят на два вида: капельные и газообразные.* Гидравлика рассматривает только капельные жидкости, однако, многие свойства капельных и газообразных жидкостей, а также многие механические законы для них одинаковы.

**Капельные жидкости** характеризуются большим сопротивлением сжатию (почти полной несжимаемостью), малым сопротивлением растягивающим и касательным усилиям, что обусловлено незначительностью сил сцепления и сил трения между частицами жидкости и незначительной температурной расширяемостью. К капельным жидкостям относятся вода, бензин, керосин, спирт, молоко и т.п.

Жидкости, существующие в природе, называются **реальными**.

Для облегчения решения многих задач гидромеханики введено поня-

тие **идеальной** жидкости, которая считается совершенно несжимаемой и не расширяющейся, обладает абсолютной подвижностью частиц, в которой отсутствуют силы внутреннего трения (вязкость равна нулю). В ряде случаев замена реальной жидкости идеальной допускается, так как не дает больших ошибок. Однако при значительных изменениях вязкости результаты расчетов могут существенно отличаться от действительных. В этих случаях расчеты корректируются по результатам лабораторных или промышленных исследований.

### 1.3. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

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

Рассмотрим некоторые из них. Их единицы измерения приведены в системе СИ.

#### ◆ Плотность и удельный вес

Масса единицы объема жидкости называется *плотностью* и обозначается через  $\rho$  (ро).

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.4)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – масса жидкости, кг;  $V$  – объем жидкости, м<sup>3</sup>.

Вес единицы объема жидкости называется *удельным весом* и обозначается через  $\gamma$  (гамма), т.е.

$$\gamma = \rho \cdot g = \frac{G}{V}, \quad (1.5)$$

где  $\gamma$  – удельный вес, Н/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/сек<sup>2</sup>;  $G$  – вес жидкости, Н.

#### ◆ Сжимаемость

Свойство жидкости уменьшать свой объем при увеличении давления характеризует *изотермический коэффициент объемного сжатия*  $\beta_v$ .

$$\beta_v = \frac{V - V_0}{p - p_0} \cdot \frac{1}{V_0}, \quad (1.6)$$

где  $\beta_v$  – изотермический коэффициент объёмного сжатия,  $\text{м}^2/\text{Н} = \text{Па}^{-1}$ ;  
 $V$  и  $V_0$  – объёмы жидкости ( $\text{м}^3$ ) при конечном  $p$  и начальном  $p_0$  давлениях ( $\text{Н}/\text{м}^2 = \text{Па}$ ).

Для минеральных масел, применяемых в гидроприводах, при температуре  $t$  примерно  $20^\circ\text{C}$  и давлении  $p$  равном  $7 \cdot 10^6$  Па (7 МПа) изотермический коэффициент объёмного сжатия  $\beta_v$  равен  $6,04 \cdot 10^{-10}$   $\text{м}^2/\text{Н}$ , а при давлении 70 МПа –  $4,4 \cdot 10^{-10}$   $\text{м}^2/\text{Н}$ , у воды – изотермический коэффициент объёмного сжатия  $\beta_v$  равен  $4,8 \cdot 10^{-10}$   $\text{м}^2/\text{Н}$  и  $4,3 \cdot 10^{-10}$   $\text{м}^2/\text{Н}$  соответственно.

Величина, обратная коэффициенту объёмного сжатия, называется *объёмным модулем упругости* жидкости  $K$ .

$$K = \frac{1}{\beta_v}, \quad (1.7)$$

где  $K$  – объёмный модуль упругости жидкости, Па;  $\beta_v$  – изотермический коэффициент объёмного сжатия,  $\text{Па}^{-1}$ .

Модуль упругости минеральных масел, применяемых в гидроприводах, находится в пределах 1350...1750 МПа, а воды –  $\approx 2000$  НПа. некоторые физические свойства воды приведены в таблице 1.2.

Физические свойства воды

Таблица 1.2

$t, ^\circ\text{C}$	Плотность $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Кoeff-нт динамической вязкости $\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	Кoeff-нт кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
0	1000	1790	1,79
10	1000	1310	1,31
20	998	1000	1,01
30	996	804	0,81
40	992	657	0,66
50	988	549	0,556
60	983	470	0,478
70	978	406	0,415
80	972	355	0,365
90	965	315	0,326
100	958	282	0,295

### ◆ Температурное расширение

Свойство жидкости увеличивать свой объём при увеличении температуры характеризует *изобарический коэффициент температурного расширения*  $\beta_t$ .

$$\beta_t = \frac{V - V_0}{t - t_0} \cdot \frac{1}{V_0}, \quad (1.8)$$

где  $\beta_t$  – изобарический коэффициент температурного расширения,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$V$  и  $V_0$  – объёмы жидкости при конечной  $t$  и начальной  $t_0$  температурах,  $\text{м}^3$ .

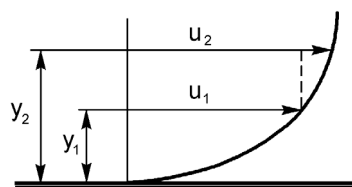
У минеральных масел, применяемых в гидроприводах, изобарический коэффициент температурного расширения  $\beta_t$  равен  $(6,0 \dots 8,5) \cdot 10^{-4} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ , а у воды –  $(1,4 \dots 1,5) \cdot 10^{-4} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

При расчёте ёмкостей, зная  $\beta_t$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) жидкости и её начальный объём  $V_0$  ( $\text{м}^3$ ) при  $t_0$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), можно вычислить объём  $V$  ( $\text{м}^3$ ), занимаемый жидкостью при температуре  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) по формуле:

$$V = V_0 [1 + \beta_t (t - t_0)]. \quad (1.9)$$

### ◆ Вязкость

*Вязкостью* жидкости называется свойство реальной жидкости оказывать сопротивление относительно перемещению (сдвигу) отдельных ее частиц или слоев при приложении внешних сил. Слои как бы скользят один по другому с различными скоростями (рис. 1.1), что вызывает внутреннее трение между слоями, пропорциональное относительной скорости движения слоев и площади их соприкосновения. Коэффициентом пропорциональности является *динамический коэффициент вязкости*  $\mu$  (мю),  $\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = \text{Па} \cdot \text{с}$ , который зависит от температуры и определяется по справочникам.



**Рис. 1.1. Действительные скорости течения слоёв жидкости по сечению канала**

$u_i$  – скорости слоёв,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $y_i$  – расстояние от твердой стенки,  $\text{м}$

Отношение динамического коэффициента вязкости  $\mu$  ( $\text{Па} \cdot \text{с}$ ) к плотности  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), рассматриваемой жидкости, называется *кинематическим коэффициентом вязкости*  $\nu$  (ню),  $\text{м}^2/\text{с}$ .



$$\nu = \mu / \rho, \text{ м}^2/\text{с} \quad (1.10)$$

В пищевой промышленности, кроме капельных ньютоновских жидкостей (вода, молоко, масла, соки, спирт и др.), существуют неньютоновские жидкости. Их динамическая вязкость не остаётся постоянной, а изменяется в зависимости от скорости сдвига, его продолжительности, от конструкции трубопровода или аппарата. К таким жидкостям относятся растворы полимеров, дисперсные и пластические системы и др.

В целом, вязкость жидкостей уменьшается с увеличением температуры и определяется специальными приборами, называемыми вискозиметрами. Простейшим из них является вискозиметр Оствальда.

Рассчитать физические свойства жидкости  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\nu$  и другие с температурой  $t$  °С, отличной от табличной, можно воспользовавшись интерполяционной формулой (см. пример 1.3).

$$y(x) = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1), \quad (1.11)$$

где  $y$  – физические свойства жидкости, а  $x$  – температура ( $t$ ).

**Пример 1.1.** Плотность воды при  $t = 20^\circ\text{C}$  равна  $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$ . Определить ее удельный вес.

Воспользуемся зависимостью (1.5).

$$\gamma = \rho \cdot g = 998 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 = 9790 \text{ Н/м}^3.$$

**Пример 1.2.** Динамическая вязкость воды при  $t = 20^\circ\text{C}$  равна  $\mu = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$  (табл. 1.1). Определить ее кинематическую вязкость.

По формуле (1.7) найдем:

$$\nu = \mu / \rho = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с} / 998 \text{ кг/м}^3 = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

**Пример 1.3.** Определить динамическую вязкость воды при  $t = 37^\circ\text{C}$ .

Этой температуре соответствуют граничные табличные значения температур  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 40^\circ\text{C}$ , охватывающие заданную. Выписываем значения динамической вязкости из табл. 1.1 для  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 40^\circ\text{C}$ :  $\mu_1 \cdot 10^6 = 804 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , а  $\mu_2 \cdot 10^6 = 657 \text{ Па}\cdot\text{с}$  или  $\mu_1 = 804 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , а  $\mu_2 = 657 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

$$\mu(37^\circ\text{C}) = \mu(30^\circ\text{C}) + \frac{\mu(40^\circ\text{C}) - \mu(30^\circ\text{C})}{40^\circ - 30^\circ} (37^\circ - 30^\circ);$$

$$\mu(37^\circ\text{C}) = 804 \cdot 10^{-6} + \frac{657 \cdot 10^{-6} - 804 \cdot 10^{-6}}{40 - 30} (37 - 30) = 701,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Получаем значение  $\mu(37^\circ\text{C}) = 701,1 \cdot 10^{-6}$ , Па·с, которое должно лежать в диапазоне от  $\mu_1$  до  $\mu_2$ .

**Пример 1.4.** Определить плотность воды  $\rho$  при увеличении давления на  $\Delta p = 100$  МПа с учетом ее сжимаемости, приняв модуль объемной упругости  $K = 2000$  МПа. Начальная плотность воды  $\rho_0 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

$$K = \frac{1}{\beta_v} = -\frac{\Delta p \cdot V_0}{\Delta V}; \quad \Delta V = -\frac{\Delta p \cdot V_0}{K},$$

где  $\Delta V = \Delta \rho \cdot m = V_0 - V = (\rho_0 - \rho) \cdot m$ ,  $V_0 = \rho_0 \cdot m$ .

$$\text{Тогда} \quad (\rho_0 - \rho) \cdot m = -\frac{\Delta p \cdot \rho_0 \cdot m}{K};$$

$$\rho = \rho_0 + \frac{\Delta p \cdot \rho_0}{K} = \rho_0 \left( 1 + \frac{\Delta p}{K} \right) = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \left( 1 + \frac{100 \text{ МПа}}{2000 \text{ МПа}} \right) = 1050 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

**Пример 1.5.** В систему охлаждения автомобиля залито  $V = 10$  л охлаждающей жидкости плотностью  $\rho_n = 1200$  кг/м<sup>3</sup> при  $t = 20^\circ\text{C}$ . С нагревом двигателя до  $t = 100^\circ\text{C}$  ее плотность стала  $\rho_k = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. Определить объём расширительного бачка (приращение объёма  $\Delta V$ ).

Масса жидкости при нагревании не изменяется:  $m_n = m_k$ .

$$\text{Тогда} \quad V \cdot \rho_n = (V + \Delta V) \cdot \rho_k;$$

$$10 \text{ л} \cdot 1200 \text{ кг/м}^3 = (10 \text{ л} + \Delta V) \cdot 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$\Delta V = 10 \text{ л} \cdot (1200 - 1000) / 1000 = 2 \text{ л}.$$

**Контрольные вопросы:** 1. Какие законы жидкостей изучаются в разделах «Гидростатика» и «Гидродинамика»? 2. Какие основные единицы измерения установлены в системе СИ? 3. Какие множители и приставки употребляют в гидравлических расчетах? 4. Какими свойствами обладает реальная жидкость? 5. Для чего предназначены гидравлические машины? 6. Как изменяется плотность жидкости при увеличении температуры и давления? 7. Как связаны между собой коэффициенты динамической и кинематической вязкостей?