

Лекция 1.

«Гидравлика и гидропневмоприводы» представляет собой прикладную науку, в которой изучаются законы равновесия и движения жидкостей (в основном капельных), методы применения этих законов в различных областях инженерной практики и основные сведения о гидравлических машинах и гидропневмоприводах. Ее можно разделить на *гидравлику* (техническую механику жидкости) и *гидравлические машины*.

Основные законы, используемые в гидравлике, - те же, что и в механике твердого тела, однако применение этих законов к задачам гидравлики отличаются некоторыми особенностями вследствие различия свойств жидкостей и твердых тел.

Некоторые принципы гидростатики (теории равновесия жидкости) были изложены в трудах древнегреческого философа Аристотеля (384-322 до н.э.) и получили развитие в трактате Архимеда (277-212 до н.э.) «О плавающих телах», а затем возрождены и развиты Леонардо да Винчи (1452-1519), Галилеем (1564-1642), и Паскалем (1623-1662). Исаак Ньютон (1642-1726) высказал гипотезу о внутреннем трении в жидкости и установил закон динамического подобия.

Как самостоятельная наука, гидравлика начала формироваться после работ, выполненных в Российской академии наук академиками М. Ломоносовым (1771-1782), Даниилом Бернулли (1700-1782) и Леонардом Эйлером (1707-1783), которые установили основные законы движения жидкости.

Наиболее широкое развитие гидравлика получила в 18-19 веках, исследуя течение жидкости в трубах, общие законы сопротивления, гидравлический удар и т.д. Наибольший интерес представляют исследования таких ученых, как Шези, Вентури, Вейсбах, Рейнольдс, Жуковский, Навье, Стокс и др.

Целую эпоху в истории развития гидравлики и гидромеханики составляют исследования в области авиа и судостроения.

1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ.

Состояние и поведение встречающихся в природе и применяемых в технике жидкостей находятся в непосредственной зависимости от их физических свойств. Поэтому первой задачей, предшествующей изучению законов равновесия текучей среды, является определение физических свойств жидкостей, выявление факторов, влияющих на них и установление единиц их измерения.

1.1. Определение жидкости.

Основные отличия механики жидкостей от механики твердого тела обусловлены различными свойствами изучаемого объекта. Жидкости вследствие текучести не могут, как твердые тела, сохранять неизменно форму своего объема. Термину «*жидкость*» в аэрогидромеханике придают более широкий смысл, чем это принято в обыденной жизни. В понятие «*жидкость*» включают все тела, для которых свойственна текучесть, т.е. способность сильно изменять форму под действием сколь угодно малых сил. Таким образом, в это понятие включают как жидкости обычные (малосжимаемые), называемые капельными, так и газообразные (сжимаемые). Капельные жидкости отличаются тем, что в малом количестве под действием поверхностного натяжения принимают сферическую форму (каплю), а в большом – обычно образуют свободную поверхность раздела с газом. Важной особенностью капельных жидкостей является то, что они ничтожно мало изменяют свой объем при изменении давления, что позволяет их считать практически несжимаемыми. Газы, наоборот, могут значительно уменьшаться в объеме под действием давления и неограниченно расширяться при отсутствии его, т.е. они обладают большой сжимаемостью. С позиции физики капельная жидкость значительно отличается от газа, с позиции аэрогидромеханики различие между ними не так уж велико, что позволяет использовать единую условную модель жидко-

сти. Эта модель, т.е. условная жидкость, рассматривается как сплошная (непрерывная) деформируемая среда (континуум), любой бесконечно малый объем которой характеризуется теми же свойствами, что и объем конечных размеров.

Введение понятия сплошной среды дает возможность рассматривать все механические характеристики жидкости (скорость, плотность, давление и т.д.) как функции координат точки в пространстве, что позволяет широко применять в аэрогидромеханике математический аппарат теории непрерывных функций.

1.2. Плотность жидкости.

Основной характеристикой жидкости является ее плотность ρ . В пространстве, занятом жидкостью, образуется скалярное поле плотности.

Жидкость, величина плотности которой в различных точках разная, т.е. $\rho = f(x, y, z)$, называется неоднородной. Для определения понятия плотности в данной точке следует выбрать элементарный объем ΔW , охватывающий эту точку и содержащий массу жидкости Δm . Тогда, стягивая поверхность объема ΔW к этой точке, определяют величину плотности в ней как предел отношения

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

Плотность однородной жидкости во всех точках постоянна и представляет собой отношение массы жидкости M к величине объема W , т.е.

$$\rho = \frac{M}{W}, \quad [\text{кг/м}^3] \quad (1.2)$$

Вес жидкости G , приходящийся на единицу объема W , называется удельным весом γ

$$\gamma = \frac{G}{W}, \quad [\text{Н/м}^3] \quad (1.3)$$

Плотность и удельный вес связаны между собой известным соотношением

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1.4)$$

Относительным удельным весом жидкости δ называется отношение удельного веса данной жидкости к удельному весу воды при температуре 4⁰С:

$$\delta = \frac{\gamma_{\text{ж}}}{\gamma_{\text{в}}} \quad (1.5)$$

Плотность и удельный вес жидкостей изменяются с изменением давления и температуры, причем плотность капельных жидкостей можно считать практически независимой от давления. Она является только функцией температуры.

С повышением температуры плотность жидкостей, как правило, уменьшается. Исключением из этого правила является вода, которая наибольшую плотность имеет при температуре 4⁰С.

Для сжимаемых жидкостей (газов) значение плотности ρ при любом значении температуры t и давления p , если известно значение плотности ρ_0 при температуре t_0 и давлении p_0 можно определить по формуле:

$$\rho = \rho_0 \frac{p(273 + t_0)}{p_0(273 + t)} \quad (1.6)$$

или по уравнению состояния совершенных газов:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad \text{или} \quad \rho = \frac{p}{RT} \quad (1.7)$$

где R – удельная газовая постоянная, для воздуха $R = 287$ Дж/кг $^{\circ}$ К

Реальные газы не подчиняются уравнению состояния. Отклонения их свойств от этого уравнения возрастают с повышением давления и понижением температуры и при больших давлениях учитываются введением поправочных коэффициентов, устанавливаемых опытным путем.

Некоторые значения плотности и удельного веса различных жидкостей для нормальных условий (температура - 0 $^{\circ}$ С, давление – 101325 Па) приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

Величины плотности некоторых жидкостей

Жидкость	Удельный вес, γ , Н/м 3	Плотность, ρ , кг/м 3
Вода пресная	9790	998,2
Вода морская	10010...10090	1002...1029
Керосин	7770...8450	792...840
Масло минеральное	8000...8750	877...892
Бензин авиационный	7250...7370	739...751
Спирт этиловый безводный	7440	789,3
Ртуть	132900	13547

1.2. Сжимаемость и температурное расширение жидкости.

Сжимаемость капельных жидкостей характеризуется коэффициентом сжимаемости (или объемного сжатия) β_v , представляющий собой относительное изменение объема ΔW жидкости на единицу изменения давления Δp .

$$\beta_v = -\frac{1}{W} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta p}, \quad [\text{м}^2/\text{Н}] \quad (1.8)$$

Знак минус здесь означает, что положительному приращению давления p соответствует отрицательное приращение объема W .

Величина, обратная коэффициенту сжимаемости, называется модулем объемной упругости K .

$$K = \frac{1}{\beta_v}, \quad [\text{Па}]. \quad (1.9)$$

Коэффициент сжимаемости капельных жидкостей мало зависит от температуры и давления (так например, для воды при изменении температуры от 0 до 20⁰С и давления от 0,5 до 8 МПа модуль объемной упругости K изменяется в пределах (1,89...2,22)10³ МПа). В среднем для воды принимают:

$$K = 2 \cdot 10^9 \text{ Па} \quad \text{или} \quad \beta_v = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}.$$

Как уже отмечалось выше, из-за малой сжимаемости капельных жидкостей и ничтожного ее влияния на рассматриваемые явления при расчетах сжимаемостью обычно пренебрегают и считают эти жидкости практически несжимаемыми за исключением отдельных случаев, которые всегда особо оговаривают.

Температурное расширение капельных жидкостей характеризуется коэффициентом температурного расширения β_t , выражающим относительное увеличение объема ΔW при увеличении температуры на 1 град, т.е.

$$\beta_t = \frac{1}{W} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta t}; \quad [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (1.10)$$

Температурный коэффициент объемного расширения для капельных жидкостей ничтожно мал (например, для воды при изменении температуры от 0 до 10⁰С и давлении 0,1МПа - $\beta_t = 0,000014 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Если принимать, что плотность капельных жидкостей не зависит от давления, тогда приближенно зависимость изменения плотности от температуры будет иметь вид:

$$\rho_t = \rho_0 \frac{1}{1 + \beta_t(t - t_0)}, \quad (1.11)$$

где ρ_0 , t_0 – плотность и температура жидкости при нормальных условиях.

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 (1.7).

В технических расчетах плотность газов обычно приводят к нормальным физическим условиям ($t = 0^\circ\text{C}$; $p = 101325 \text{ Па}$) или к стандартным условиям ($t = 20^\circ\text{C}$; $p = 101325 \text{ Па}$).

Плотность воздуха при стандартных условиях ($R = 287 \text{ Дж/кг}^\circ\text{К}$)

$$\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

При других условиях плотность воздуха можно определить по формуле (1.6).

Для изотермического процесса ($T = \text{const}$) имеем:

$$\frac{p}{\rho} = \text{const}, \text{ или } p v = \text{const}$$

а для адиабатического процесса

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{const}, \text{ или } p v^k = \text{const}$$

где $k = \frac{c_p}{c_v}$ - показатель адиабаты (здесь c_p и c_v - теплоемкости газов при постоянном давлении и объеме соответственно), $v = \frac{1}{\rho}$ - удельный объем.

Поскольку объем газа в большей степени зависит от температуры и давления, выводы, полученные при изучении капельных жидкостей, можно распространять на газы лишь в тех случаях, если изменение давления и температуры невелико.

1.4. Сопротивление растяжению

По молекулярной теории сопротивление растяжению внутри капельных жидкостей может быть весьма значительным. Как показывают новейшие работы по физике жидкостей в некоторых особых случаях, например при опытах с тщательно отфильтрованной и дегазированной водой, в них можно получить весьма большие кратковременные напряжения растяжения (до 23 – 28 МПа). Однако технически чистые жидкости, содержащие взвешенные твердые частицы и мельчайшие пузырьки газов, практически не оказывают заметного сопротивления растягивающим усилиям. Силы сцепления между молекулами этих жидкостей проявляются только на их поверхности в виде так называемых сил поверхностного натяжения, где и обнаруживается известная сопротивляемость жидкости разрыву. Силы сопротивления разрыву у жидкостей ничтожно малы. Так, для разрыва воды достаточна сила, примерно в 10^6 раз меньше силы, необходимой для разрыва стали. Поэтому в дальнейшем будем считать, что напряжения растяжения в капельных жидкостях отсутствуют.

1.5. Поверхностное натяжение жидкостей. Капиллярность.

Молекулы жидкости, расположенных у поверхности контакта с другой жидкостью, газом или твердым телом, находятся в условиях, отличных от условий молекул, находящихся внутри некоторого объема жидкости. Энергия поверхностных молекул жидкости отличается от энергии молекул, находящихся в объеме жидкости, на некоторую величину, называемую поверхностной энергией. Эта энергия пропорциональна площади поверхности раздела S :

$$\mathcal{E}_n = \sigma \cdot S, \quad (1.12)$$

где: σ – коэффициент пропорциональности, или коэффициент поверхностного натяжения, зависящий от природы соприкасающихся сред, [Н/м].

Этот коэффициент можно представить в виде:

$$\sigma = -\frac{F}{l}, \quad (1.13)$$

где: F – сила поверхностного натяжения; l – длина линии, ограничивающей поверхность раздела.

Особенно сильно поверхностное натяжение проявляется в трубках малого диаметра (капиллярных), где, благодаря действию дополнительного давления, вызываемого этим натяжением, положение поверхности жидкости изменяется по сравнению с нормальным его уровнем. Для сферических поверхностей (капилляров) :

$$p = \frac{2\sigma}{R}, \quad (1.15)$$

где: R – радиус трубки.

Средние значения коэффициента поверхностного натяжения σ для некоторых жидкостей на границе раздела с воздухом представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2.

Значения коэффициента поверхностного натяжения

Жидкость	Вода	Спирт	Бензол	Нефть	Глицерин	Ртуть
σ , Н/м	0,073	0,0225	0,029	0,025	0,065	0,490

Результирующая поверхностных сил для выпуклой поверхности направлена внутрь жидкости, а для вогнутой поверхности – наоборот, поэтому поведение жидкости в капиллярах, погруженных в жидкость, будет зависеть от взаимодействия жидкости с трубкой, т.е. от явления смачиваемости. Если жидкость будет смачивающая (вода в стеклянной трубке), то мениск будет вогнутый и результирующая поверхностных сил будет направлена наружу. При несмачивающей жидкости (ртуть в стеклянной трубке) мениск будет выпуклым и результирующая сила направлена внутрь жидкости. Высоту подъема (опускания) жидкости определяют по формуле для полусферического мениска:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot g \cdot R} = \frac{4 \cdot \sigma}{\rho \cdot g \cdot d}, \quad (1.16)$$

где: d – диаметр трубки [мм],

1.6. Вязкость жидкостей.

Вязкостью называется свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу ее слоев. Это свойство проявляется в том, что в жидкости при определенных условиях возникают касательные напряжения. Вязкость есть свойство, противополо-

ложное текучести: более вязкие жидкости (глицерин) являются менее текучими и наоборот. Для дальнейших рассуждений примем гипотезу, что при движении жидкости вдоль твердой стенки скорость жидкости на самой стенке равна 0, т.е. $u = 0$. Законы движения жидкости, где эта гипотеза неверна, т.е. скорость на стенке $u \neq 0$ изучает несимметричная гидромеханика

При течении жидкости вдоль твердой стенки происходит торможение потока, обусловленное вязкостью (рис.1.2).

Скорость u уменьшается по мере уменьшения расстояния от стенки вплоть до $u = 0$ при $y=0$, а между слоями происходит проскальзывание, сопровождающееся возникновением касательных напряжений (напряжений трения). Аналогично явлению сдвига в твердых телах можно предположить зависимость между напряжением и деформацией в виде:

лению сдвига в твердых телах можно предположить зависимость между напряжением и деформацией в виде:

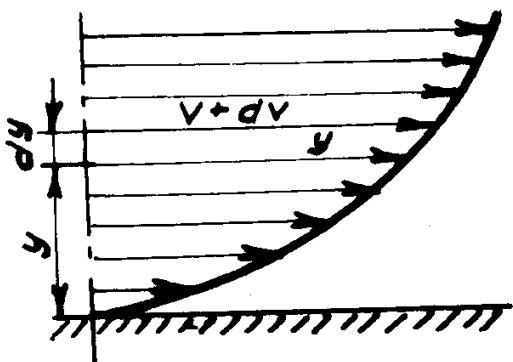


Рис. 1.2. Распределение скорости вдоль стенки

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} , \quad (1.17)$$

где: μ – коэффициент пропорциональности, который получил название *динамической вязкости жидкости*, du – приращение скорости;

dy – приращение координаты.

Впервые эту гипотезу высказал Ньютон в 1686 г., а затем она получила экспериментальное подтверждение, т.е. касательное напряжение в жидкости зависит от ее рода и характера течения и при слоистом течении изменяется прямо пропорционально так называемому поперечному градиенту скорости,

Единицы измерения динамической вязкости в системе СИ - [Па·с], которая получила название *Пуазейль*; На практике динамическую вязкость часто измеряют в *пуазах* (П) или сантипуазах (сП). $1\text{П} = 1(\text{дин}/\text{см}^2) \cdot \text{с}$

$$1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 10 \text{ П}$$

Из закона трения Ньютона, выражаемого уравнением (1.17), следует, что напряжения трения возможны только в движущейся жидкости, т.е. вязкость жидкости проявляется лишь при ее течении. В покоящейся жидкости касательные напряжения будем считать равными нулю. Однако, существуют так называемые аномальные, неньютоновские жидкости, в которых касательные напряжения возможны также при покое, а вязкость зависит от градиента скорости. Физические свойства таких жидкостей в классической гидроаэромеханике не рассматриваются, их свойства изучают в курсе «Реология жидкостей».

Полная сила трения при условии постоянства касательных напряжений по поверхности S равна:

$$T = \mu \cdot \frac{du}{dy} \cdot S, \quad (1.18)$$

Вязкость жидкостей в большей степени зависит от температуры, при этом вязкость капельных жидкостей при увеличении температуры уменьшается, а вязкость газов возрастает, и, наоборот, что объясняется различием природы вязкости в капельных и газообразных жидкостях. В жидкостях вязкость вызывается силами молекулярного сцепления, которые с увеличением температуры уменьшаются, а в газах вязкость обусловлена беспорядочным, тепловым движением молекул, интенсивность которого увеличивается с ростом температуры. Влияние температуры на вязкость жидкостей можно оценить формулой:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-\beta(T-T_0)} \quad (1.19)$$

где: μ и μ_0 – динамические вязкости при температуре T и T_0 ;

β – коэффициент, зависящий от рода жидкости, для минеральных масел

$$\beta = 0,02 \dots 0,03.$$

Зависимость динамической вязкости пресной воды от температуры можно определить по эмпирической формуле Пуазейля:

$$\mu = \frac{0,00179}{1 + 0,0368 \cdot t + 0,000221t^2}, \quad [\text{П}]$$

(В этой формуле размерность μ дана в пуазах [П], t – температура воды в $^{\circ}\text{C}$).

Для определения динамической вязкости воздуха применяется формула Милликена:

$$\mu = 1,745 \cdot 10^{-6} + 5,03 \cdot 10^{-9} \cdot t,$$

что дает при $t = 15^{\circ}\text{C}$ $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Динамическая вязкость других газов имеет примерно такое же значение.

Наряду с динамической вязкостью μ применяют кинематическую вязкость ν , представляющей собой отношение динамической вязкости жидкости к ее плотности:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad [\text{м}^2/\text{с}]. \quad (1.20)$$

Кроме размерности кинематической вязкости в системе СИ [$\text{м}^2/\text{с}$] используется размерность Стокс [Ст], или сантистокс (сСт),

$$1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}, \text{ или } 1 \text{ сСт} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Вязкость жидкости определяют также в условных (технических) единицах по времени истечения определенного количества жидкости через заданный капилляр. Для определения условной вязкости в различных странах пользуются вискозиметрами Энглера, Сейболта, Редвуда, Барбэ и т.д. В странах СНГ для

определения вязкости служит вискозиметр ВУ (значения условной вязкости в градусах Энглера ($^{\circ}E$) и градусах ВУ ($^{\circ}ВУ$) одинаковы. Соотношения между наиболее распространенными единицами условной вязкости приведены в литературе.

Вязкость капельных жидкостей зависит также и от давления, однако в большинстве случаев, для давления до $2 \cdot 10^7$ Па (200 ат), этим изменением в обычных гидравлических расчетах пренебрегают. Значения динамической и кинематической вязкости для некоторых жидкостей представлены в таблице 1.4.

Жидкость	μ , Па·с	$\nu \cdot 10^4$, м ² /с
Вода пресная (t=20 ⁰ С)	0,00101	0,01012
Глицерин безводный (t=20 ⁰ С)	0,512	4,1
Керосин (t=15 ⁰ С)	0,0016...0,0025	0,02...0,03
Бензин (t=15 ⁰ С)	0,0006...0,00065	0,0083...0,0093
Ртуть (t=20 ⁰ С)	0,0015	0,00111
Спирт этиловый, безводный (t=20 ⁰ С)	0,00119	0.0151
Масло минеральное (t=20 ⁰ С)	0,0275...1,29	0,313...14,5

Кинематическая вязкость газов зависит как от температуры, так и от давления, возрастая с увеличением температуры и уменьшаясь с увеличением давления (таблица 1.6 и 1.7).

Таблица 1.6.

Зависимость кинематической вязкости газов от температуры

Газ	$\nu \cdot 10^4$, м ² /с, при температуре, $^{\circ}C$				R, Дж/кг· $^{\circ}K$
	0	20	50	100	
Воздух	0,133	0,151	0,178	0,232	287

Зависимость кинематической вязкости воздуха от давления

Давление, кПа	104,1	98,7	93,3
ν , Ст, при $t=15^{\circ}\text{C}$	0,14	1,148	0,152
ν , Ст, при $t=30^{\circ}\text{C}$	0,156	0,164	0,174

1.7. Испаряемость. Давление насыщенных паров.

Испаряемость свойственна всем капельным жидкостям. Одним из показателей, характеризующим это явление, является температура кипения жидкости. Но более полной характеристикой испаряемости является давление (упругость) насыщенных паров $p_{н.п.}$, т.е. такое давление, при котором пары жидкости находятся в равновесии с жидкостью и число молекул, переходящих из жидкости в пар, равно числу молекул, совершающих обратный переход. Давление насыщенных паров можно определить также как давление, соответствующее точке кипения жидкости при данной температуре. Чем больше давление насыщенных паров при данной температуре, тем больше испаряемость жидкостей. Давление насыщенных паров различных жидкостей в значительной степени зависит от температуры и, как правило, увеличивается с ее повышением

В машиностроительной гидравлике изучаются и другие физические свойства жидкостей, такие, как испаряемость, растворимость газов в жидкостях и др. Для изучения данного курса вполне достаточно и вышеизложенных основных свойств.