

2.1. Основные свойства капельных жидкостей.

Основная система единиц, применяемая в настоящее время, как мы уже говорили, это система СИ. Основными механическими единицами системы СИ являются: *длина, измеряемая в метрах; масса, измеряемая в кг; время, измеряемое в секундах.*

Одной из основных механических характеристик жидкости, рассматриваемой в гидравлике как сплошная среда (*континуум*), является **плотность**, под которой понимается масса жидкости, заключённая в единице объёма.

Различают абсолютную и относительную плотность.

Абсолютная плотность для однородной жидкости равняется величине массы m жидкости в объёме V , поделённой на величину этого объёма V

$$\rho = m/V. \quad (2.1)$$

$$\rho = f(p, t).$$

Плотность измеряется в системе СИ в кг/м^3 .

При НУ, имеем:

<i>Название</i>	<i>ρ, кг/м³</i>
<i>Вода</i>	<i>1000</i>
<i>Ртуть</i>	<i>13600</i>
<i>Минеральное масло</i>	<i>890</i>
<i>Ацетон</i>	<i>790</i>
<i>Бензин</i>	<i>700</i>
<i>Керосин</i>	<i>800</i>
<i>Спирт этиловый</i>	<i>790</i>
<i>Воздух</i>	<i>1,225</i>

Относительной плотностью называется отношение плотности жидкости при заданной температуре к плотности воды:

$$\delta = \rho_{ж}/\rho_в.$$

Например, относительная плотность ртути равна: $\delta_{рт} = \rho_{рт}/\rho_в = 13600/1000 = 13,6$.

На практике также часто пользуются внесистемным параметром, который называется **удельным весом** – это вес единицы объёма жидкости.

Для однородной жидкости удельный вес равняется величине веса G жидкости, поделённой на величину объёма V , который она занимает:

$$\gamma = G/V. \quad (2.2)$$

Удельный вес измеряется в системе СИ в Н/м^3 .

В системе СИ удельный вес воды при 4°C составляет: $\gamma = \rho_в * g = 1000 * 9,81 = 9,81 * 10^3 \text{ Н/м}^3$;
удельный вес рабочей жидкости МГ-30 при 20 °C составляет: $\gamma = 890 * 9,81 = 8,73 * 10^3 \text{ Н/м}^3$.

Связь между удельным весом γ и плотностью ρ :

$$G = mg, \quad \gamma V = \rho V g, \quad \gamma = \rho g. \quad (2.3)$$

Плотность и удельный вес капельной жидкости незначительно изменяются при изменении её температуры и давления. На практике этим изменением очень часто пренебрегают.

Коротко рассмотрим основные физические свойства капельных жидкостей.

1. Вязкость жидкости.

Вязкостью называется способность жидкости сопротивляться сдвигу её слоёв.

Вязкость есть свойство противоположное текучести.

Вязкость проявляется в том, что в жидкости при определённых условиях возникают касательные напряжения трения. Гипотеза о возникновении касательных напряжений между слоями жидкости впервые была высказана Ньютоном.

Кроме обычных подвижных жидкостей существуют очень вязкие жидкости, сопротивление малым деформациям которых значительно, но в состоянии покоя равно нулю. По мере увеличения вязкости такая жидкость все больше похожа на твёрдое тело.

Например, асфальт. Если бочку с горячим асфальтом опрокинуть, он весь вытечет за некоторое время и примет форму лепешки, с течением времени по этой лепешке можно будет ходить, а при ударе она разлетается на куски.

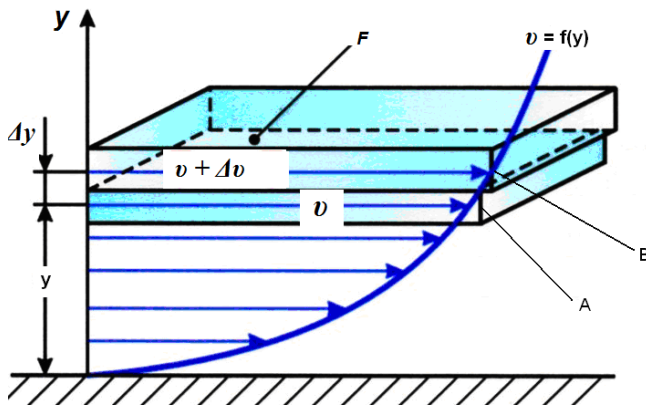


Рис. 2.1. Эпюра скоростей при течении вязкой жидкости

Для медленной деформации обычной жидкости необходимы весьма малые силы, при быстрой деформации жидкость подобно твёрдому телу оказывает значительное сопротивление. Но как только движение жидкости прекращается, это сопротивление исчезает.

При течении вязкой жидкости из-за тормозящего влияния неподвижного дна и трения слои жидкости будут двигаться с разными скоростями, значения которых возрастают при удалении от твёрдого дна (см. рисунок).

Скорость v тем меньше, чем ближе слой жидкости к неподвижной стенке, при $y = 0, v = 0$.

Рассмотрим два слоя жидкости,двигающиеся на расстоянии Δy .

Слой А движется со скоростью v ; Слой В - со скоростью $v + \Delta v$. Из-за разности скоростей слой В сдвигается относительно слоя А на величину Δv (за единицу времени).

Δv - абсолютный сдвиг слоя В;

$\Delta v / \Delta y$ – относительный сдвиг или градиент скорости (определяет насколько нарастает продольная скорость частиц жидкости в потоке при увеличении расстояния от стенки, т.е. характеризует интенсивность сдвига в данном месте потока).

При сдвиге аналогично явлению сдвига в твёрдых телах появляются касательные напряжения τ . Ньютон получил зависимость между касательным напряжением и деформацией (закон жидкостного трения):

$$\tau = \mu \frac{\Delta v}{\Delta y}. \quad (2.4)$$

Коэффициент пропорциональности μ в формуле для определения касательного напряжения в жидкости называется динамической вязкостью и характеризует сопротивляемость жидкости сдвигу.

Экспериментально этот закон был подтверждён нашим соотечественником профессором Н.П. Петровым в 1883 г.

Вывод: напряжения трения возможны только в движущейся жидкости, вязкость проявляется при течении жидкости, в покоящейся жидкости касательные напряжения считаются равными нулю.

В системе СИ единица измерения динамической вязкости - [Па·сек].

В системе СГС единица динамической вязкости называется «Пуаз» в честь французского врача Пуазейля, исследовавшего законы движения крови в сосудах.

$$1 \text{ П} = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{сек.}$$

При нуле имеем:

- вода $\mu \approx 1$ сП;
- минеральное масло $\mu \approx 10 - 1000$ сП;
- бензин $\mu \approx 0,5 - 1,0$ сП;
- ртуть $\mu \approx 1,5$ сП.

Наряду с понятием динамической вязкости в гидравлике используют понятие **кинематической вязкости**.

Кинематической вязкостью называется отношение динамической вязкости к плотности:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.5)$$

Единицей измерения кинематической вязкости в системе СИ является [$\text{м}^2/\text{с}$], например, вода при $t = 20^\circ\text{C}$ имеет кинематическую вязкость - $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

В системе СГС единица измерения кинематической вязкости равна $1 \text{ см}^2/\text{с}$ и называется **Стокс(Ст)** в честь английского учёного Стокса, сотая доля стокса называется сантиСтокс (сСт).

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

Вязкость капельных жидкостей при увеличении температуры уменьшается.

Вязкость газов, с увеличением температуры возрастает.

Объясняется это различием молекулярного строения. В жидкостях молекулы расположены гораздо ближе друг к другу, чем в газах, и вязкость вызывается силами молекулярного сцепления.

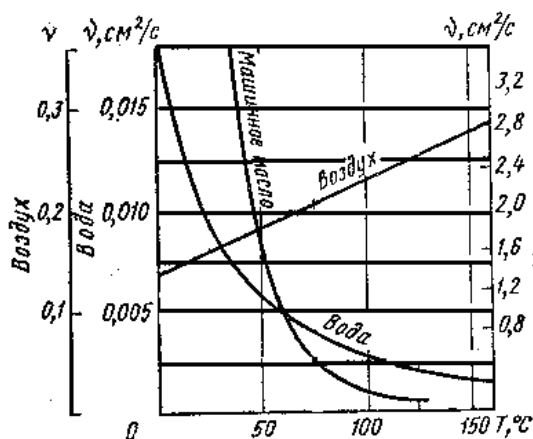


Рис.2.2. Зависимость кинематической вязкости от температуры

Обычно влияние температуры на вязкость оценивается с помощью экспериментальных графиков в справочной литературе.

Вязкость рабочей жидкости при увеличении температуры уменьшается, при этом теряется смазывающая способность рабочей жидкости. Возникает износ, прогорание трущихся поверхностей насосов и подшипников, что может привести к авариям.

Зависимость вязкости от давления проявляется при давлениях в несколько десятков МПа.

С увеличением давления вязкость большинства жидкостей возрастает.

Например, если вязкость воды при давлении **1 атм** и **20 °C** принять за единицу, при той же температуре и давлении **100 МПа** она вырастет в **4** раза.

2. Сжимаемость - свойство жидкости изменять объём под действием давления. Она характеризуется **коэффициентом объёмного сжатия**, который представляет собой относительное изменение объёма ΔV при изменении давления Δp на единицу давления, V_1 – первоначальный объём, V_2 – конечный объём .

$$\beta_p = -\frac{1}{V_1} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} . \quad (2.6)$$

Коэффициент объёмного сжатия в системе СИ измеряется в $[\text{м}^2/\text{Н}]$ или $[\text{Па}^{-1}]$.

Увеличению давления $p_2 > p_1$ соответствует уменьшение объёма $V_2 < V_1$, поэтому в формуле имеется знак минус.

Рассматривая конечные приращения $\Delta p = p_2 - p_1$ и $\Delta V = V_2 - V_1$ и, считая β_p постоянным, получаем,

$$V_2 \approx V_1 \cdot (1 - \beta_p \cdot \Delta p) , \quad (2.7)$$

и учитывая равенство $\rho = m/V$ (1.4), находим приближённую формулу для определения плотности при увеличении давления

$$\rho_2 \approx \rho_1 / (1 - \beta_p \cdot \Delta p) , \quad (2.8)$$

где ρ_2 и ρ_1 - плотности при p_2 и p_1 .

Величина обратная коэффициенту β_p , называется **объёмным модулем упругости (ОМУ)**

$$k = 1 / \beta_p \quad (2.9)$$

Изменение объёма может быть выражено через ОМУ:

$$V_2 \approx V_1 \cdot (1 - \Delta p / k) . \quad (2.10)$$

Размерность ОМУ – $[\text{Н}/\text{м}^2]$ такая же, как размерность давления.

Используя объёмный модуль упругости k и разности объёмов, можно записать зависимость, которую называют **обобщённым законом Гука для жидкости:**

$$\Delta p = -k \frac{\Delta V}{V_1} . \quad (2.11)$$

Объёмный модуль упругости k уменьшается с увеличением температуры и возрастает с повышением давления.

Для воды он составляет при атмосферном давлении приблизительно $k_{\text{воды}} = 2000 \text{ МПа}$.

Следовательно, при повышении давления на 0,1 МПа (1 ат) объём воды уменьшается всего лишь на 1/20 000 (одна двадцатитысячную) часть.

Вывод – капельные жидкости практически несжимаемы.

3. Температурное расширение характеризуется **коэффициентом объёмного расширения**, который представляет собой относительное изменение объёма при изменении температуры T на 1°C и постоянном давлении, т.е.

$$\beta_T = \frac{1}{V_1} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T} . \quad (2.12)$$

Рассматривая разности $\Delta V = V_2 - V_1$ и $\Delta T = T_2 - T_1$ и, принимая β_T постоянным, получаем объём жидкости при изменении температуры:

$$V_2 = V_1 (1 + \beta_T \cdot \Delta T) ,$$

и, учитывая равенство $\rho = m / V$, находим приближенную формулу для определения плотности жидкости при изменении температуры

$$\rho_2 = \rho_1 / (1 + \beta_T \cdot \Delta T), \quad (2.13)$$

где ρ_2 и ρ_1 — плотности при температурах T_2 и T_1 .

Для воды коэффициент β_T возрастает с увеличением давления и температуры, при 100°C и 10 МПа, $\beta_T = 700 \cdot 10^{-6} [1 / \text{сек}]$.

4. Сопротивление растяжению.

Сопротивление растяжению внутри капельных жидкостей по молекулярной теории может быть весьма значительным. При опытах с тщательно очищенной и дегазированной водой в ней были получены кратковременные напряжения растяжения до 23—28 МПа.

Однако, технически чистые жидкости, содержащие взвешенные твердые частицы и мельчайшие пузырьки газов, не выдерживают даже незначительных напряжений растяжения.

Поэтому считают, что напряжения растяжения в капельных жидкостях невозможны.

5. Силы поверхностного натяжения.

СП жидкости горизонтальна по всей поверхности раздела между жидкой и газообразной средой, кроме точек вблизи твердой стенки сосуда, где проявляются молекулярные силы взаимодействия твердых стенок с жидкостью (рис. 2.3, а).

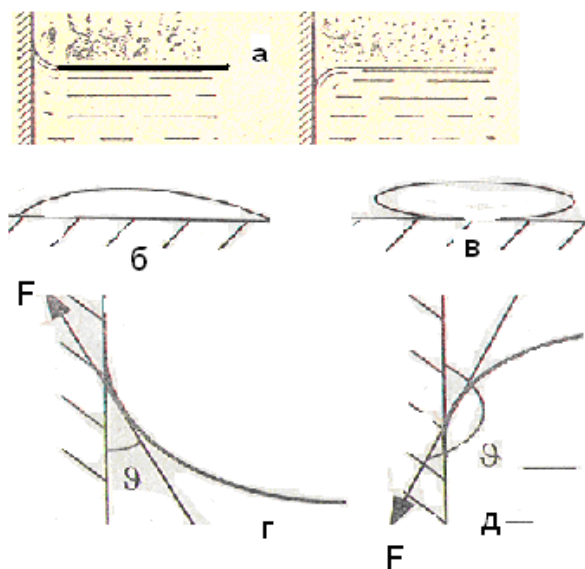


Рис.2.3. Форма СП вблизи твердой стенки сосуда

На поверхности раздела жидкости и воздуха действуют силы поверхностного натяжения, стремящиеся придать объёму жидкости сферическую форму (это свойство заметно проявляется лишь для малых объёмов жидкости).

Оно проявляется также при выливании капли жидкости на твердую поверхность:

рис. 2.3,б – форма капли для смачивающей жидкости;

рис. 2.3,в – форма капли для несмачивающей жидкости.

Поверхность у стенок сосуда искривлена (рис.2.3,г,д), и искривление сопровождается появлением дополнительного давления.

Касательная к проекции сферической поверхности (F), направленная в сторону стенок трубки в зависимости от смачивания (рис.2.3,г) или не смачивания (рис.2.3,д) твердой поверхности жидкостью может иметь разный краевой угол θ , соответствующий смачиванию или его отсутствию.

Со свойством поверхностного натяжения тесно связано явление капиллярности, под которым понимают свойство капельной жидкости подниматься или опускаться в трубках малого диаметра под действием дополнительного давления, вызванного силами поверхностного натяжения.

Трубка небольшого диаметра, в которой отсутствует горизонтальный участок поверхности раздела, называется капилляром. В этой трубке дополнительное давление может поднимать уровень жидкости (при смачивании – рис.2.4(а) – вода-стекло) или опускать его (при несмачивании – рис. 2.4(б) – ртуть-стекло).

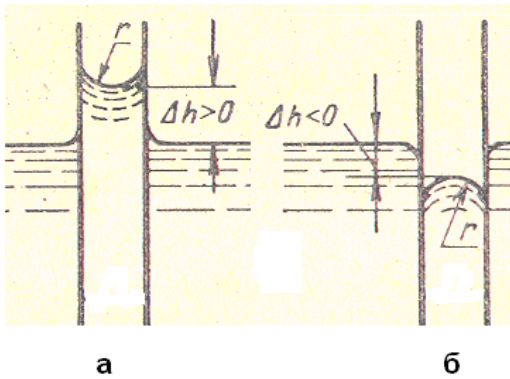


Рис. 2.4. Формирование подъёма жидкости в капилляре: при смачивании (а) и опускания при несмачивании (б).

Дополнительное давление, возникающее в капилляре определяется формулой

$$p = 2\sigma / r,$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости;
 r — радиус сферы (приблизительно равен радиусу капилляра).

Коэффициент σ , размерность которого [Н/м], имеет следующие значения для разных жидкостей, граничащих с воздухом при температуре 20°C:

для воды -	$\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$,
для спирта -	$\sigma = 22 \cdot 10^{-3}$,
для керосина -	$\sigma = 27 \cdot 10^{-3}$,
для ртути -	$\sigma = 460 \cdot 10^{-3}$.

С ростом температуры поверхностное натяжение уменьшается.

Высоту подъёма смачивающей жидкости или опускания несмачивающей жидкости в стеклянной трубке диаметром d определяют по формуле для полусферического мениска:

$$\Delta h = \frac{4\sigma}{d\rho g}. \quad (2.14)$$

Однако, при большой площади свободной поверхности (СП) влияние этого давления невелико и в технических расчётах его можно не учитывать.

6. Испаряемость.

Испаряемость свойственна всем капельным жидкостям, однако, интенсивность испарения неодинакова и зависит от условий, в которых они находятся.

Испарение – процесс перехода жидкости в газообразное состояние.

Если объём пространства над жидкостью достаточно велик, испарение продолжается до исчезновения жидкости (выкипание чайника).

Если объём недостаточно велик, часть молекул жидкости конденсируется и возвращается в жидкое состояние и испарение продолжается до наступления динамического равновесия, когда число испаряющихся и конденсирующихся молекул выравниваются. В окружающем жидкость пространстве устанавливается давление, называемое давлением насыщенных паров $P_{нп}$.

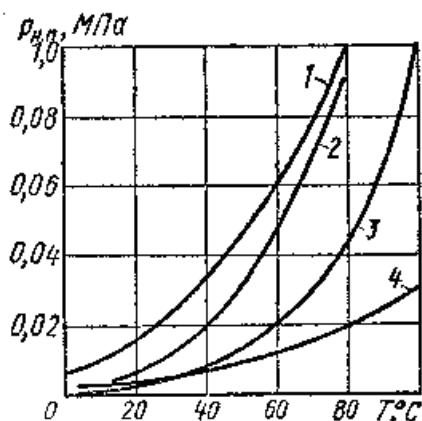


Рис. 2.5. Зависимость давления насыщенных паров от температуры:
 1 - бензин; 2 - спирт; 3 - вода; 4 - керосин.

Давление насыщенных паров $P_{нп}$ может быть выражено в функции температуры. Чем больше давление насыщенных паров при данной температуре, тем больше испаряемость жидкости.

С увеличением температуры давление $P_{нп}$ увеличивается, однако, у разных жидкостей в разной степени (рис. 2.5).

7. Растворимость.

Растворимость газов в жидкостях характеризуется количеством растворенного газа в единице объёма жидкости. Она различна для разных жидкостей и изменяется с увеличением давления.

Относительный объём газа, растворённого в жидкости до её полного насыщения, можно считать по закону Генри прямо пропорциональным давлению, т. е.

$$V_{Г} = kV_{ж} \frac{p}{p_0},$$

где $V_{Г}$ — объём растворённого газа, приведенный к нормальным условиям, (p_0, T_0);
 $V_{ж}$ — объём жидкости;
 k — коэффициент растворимости;
 p — давление жидкости.

Коэффициент k имеет следующие значения при 20 °С:

- для воды $k = 0,016$;
- для керосина $k = 0,13$;
- для минеральных масел $k = 0,08 - 0,1$.

При понижении давления выделяется растворённый в жидкости газ, причём интенсивнее, чем растворятся в ней. Это явление может отрицательно сказываться на работе гидросистем (в результате жидкость может даже превратиться в пену).

8. Смазывающая способность.

Смазывающая способность — свойство жидкости обеспечивать наименьшее трение и износ металлических поверхностей деталей под нагрузкой.

При пуске механизмов или при разрыве несущего слоя масляной плёнки, неровности соприкасающихся деталей контактируют друг с другом, возникают значительные силы трения, если смазывающая способность не будет обеспечена.

2.2. Основные свойства газов.

Газы отличаются от жидкостей тем, что при большом давлении они могут быть сжаты до очень малого объёма.

Если предоставить любому газу большее пространство, чем он занимает, происходит расширение газа, а его давление уменьшается.

Закон, связывающий между собой давление и объём газа, впервые был открыт в начале 17-го века Р.Бойлем, а позже Мариоттом (закон Бойля-Мариотта).

Согласно этому закону давления одного и того же количества газа при постоянной температуре обратно пропорциональны объёмам, занимаемым этим количеством газа.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad \text{или} \quad p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (2.15)$$

Кривая зависимости p от V называется изотермой.

Давление газа зависит также и от температуры.

Гей-Люсак в 1816 году нашёл, что эта связь выражается формулой при $p = \text{const}$ (закон Гей – Люсака):

$$V = V_0(1 + \alpha T), \quad (2.16)$$

где V_0 – объём газа при 0°C ;

T – температура в градусах Цельсия;

$\alpha = 1/273$ – термический коэффициент расширения.

Клайперон, связав законы Бойля-Мариотта и Гей-Люсака, получил уравнение состояния идеальных газов

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad (2.17)$$

где $\frac{pV}{T} = B$ – удельная газовая постоянная, различная для различных газов.