

Лекция 2 «Характеристика и свойства рабочих жидкостей»

Цель: Приведите уравнения состояния и объёмных деформаций. Дайте характеристику сжимаемости жидкости и модулю объёмной упругости. Опишите плотность сплошной среды. Охарактеризуйте вязкость рабочих жидкостей. Дайте описание поверхностного натяжения. Проанализируйте растворимость газов в жидкостях.

Краткий конспект лекции: Обычно в гидравлике принимается гипотеза сплошности жидкости, в соответствии с которой жидкость рассматривается как непрерывная, сплошная среда, заполняющая пространство без пустот и промежутков. Исходя из этого, считают, что и физические характеристики, определяющие состояние и движение жидкости, распределяются и изменяются в занятом ею объеме непрерывно.

Уравнение состояния и объёмные деформации

Уравнение состояния, устанавливающее связь объёма, давления и температуры, в неявной форме записывается:

$$W = f(p, T). \quad (1)$$

Уравнение состояния в дифференциальной форме

$$dW = df(p, T) = \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial W}{\partial p}\right)_T dp. \quad (2)$$

Первый член этого уравнения $\left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)_p dT$ отражает тепловое расширение среды при $p = \text{const}$, а второй член $\left(\frac{\partial W}{\partial p}\right)_T dp$ – сжимаемость среды при $T = \text{const}$. Частные производные $\left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)_p$ и $\left(\frac{\partial W}{\partial p}\right)_T$ в определённых интервалах изменения давления и температуры могут быть приняты постоянными.

Относительное изменение объёма среды при изменении температуры на один градус определяется коэффициентом температурного расширения:

$$\beta_T = \frac{1}{W_0} \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)_p, \quad (3)$$

или приближенно:

$$\beta_T \approx \frac{\Delta W_T}{W_0} \frac{1}{\Delta T}. \quad (4)$$

Относительное изменение объёма $\overline{\Delta W_T}$ за счет изменения температуры на величину $\Delta T = T - T_0$ (T – текущая температура; T_0 – начальная температура) можно рассчитать по известному коэффициенту температурного расширения по формуле 5:

$$\overline{\Delta W_T} = \frac{\Delta W_T}{W_0} = \beta_T \Delta T. \quad (5)$$

Коэффициент температурного расширения β_T обычно определяют при атмосферном давлении и температурах $t = 20...70^\circ\text{C}$. При этих условиях коэффициент температурного расширения β_T рабочих жидкостей, используемых в гидроприводах, находится в диапазоне:

$$\beta_T = (3...9) \cdot 10^{-4}, \text{ 1/град.}$$

Для минеральных масел коэффициент температурного расширения существенно уменьшается с ростом плотности. Так, при температуре 20°C с изменением плотности от 800 до 1000 кг/м^3 (для разных минеральных масел) величина коэффициента β_T изменяется от $9,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}$ до $5,1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}$, т.е. уменьшается почти в 2 раза.

Относительное изменение объёма ΔW_p при изменении давления на одну единицу при постоянной температуре $T = \text{const}$ определяется коэффициентом объёмного сжатия:

$$\beta_p = -\frac{1}{W_0} \left(\frac{\partial W}{\partial p} \right)_T \quad (6)$$

или приближенно

$$\beta_p \approx -\frac{\Delta W_p}{W_0} \frac{1}{\Delta p}. \quad (7)$$

Величина, обратная коэффициенту объёмного сжатия

$$E = \frac{1}{\beta_p}, \quad (8)$$

называется модулем объёмной упругости. Относительное изменение объёма жидкости при повышении давления на величину Δp равно:

$$\Delta \overline{W}_p = \frac{W - W_0}{W_0} = -\beta_p \Delta p = -\frac{\Delta p}{E}. \quad (9)$$

Это уравнение называют обобщённым законом Гука.

В последнем выражении учтено, что при увеличении давления объём среды уменьшается, поэтому в формуле появляется знак минус.

При одновременном изменении температуры и давления первоначальный объём изменяется на величину ΔW :

$$\Delta W = \Delta W_T + \Delta W_p = (\beta_T \Delta T - \beta_p \Delta p) W_0. \quad (10)$$

При повышении температуры среды на величину ΔT в замкнутом, недеформируемом объёме ($W = \text{const}$) происходит увеличение давления:

$$\Delta W = (\beta_T \Delta T - \beta_p \Delta p) W_0 = 0; \quad (11)$$

$$\Delta p = \frac{\beta_T \Delta T}{\beta_p} = \beta_T E \Delta T. \quad (12)$$

При охлаждении жидкости ($\Delta T < 0$) произойдёт понижение давления ($\Delta p < 0$).

Данная формула справедлива в пределах ограниченного диапазона изменения давления и температуры. Средние значения β_T и β_p в этих зависимостях получают экспериментальным путём.

При приближении температуры к абсолютному нулю, свободный объём W_F стремится к нулю, коэффициент температурного расширения при этом уменьшается. С ростом температуры коэффициенты температурного расширения и объёмного сжатия увеличиваются, а модуль объёмной упругости уменьшается.

С увеличением давления p увеличивается плотность упаковки молекул в жидкости и уменьшается свободный объём W_F , что приводит к увеличению плотности ρ , уменьшению коэффициента объёмного сжатия и, наоборот, увеличению модуля упругости.

Сжимаемость жидкости и модуль объёмной упругости

Деформация жидкости при изменении давления имеет релаксационную природу, т.е. изменение давления и объёма не совпадают по времени (рис. 1), а имеют между собой некоторый сдвиг (запаздывание). Первый случай, представленный на рис. 1, *a*, имеет место в гидроприводах при резком возрастании нагрузки, второй, представленный на рис. 1, *б* – при внезапном (резком) закрытии гидроаккумулятора в линии.

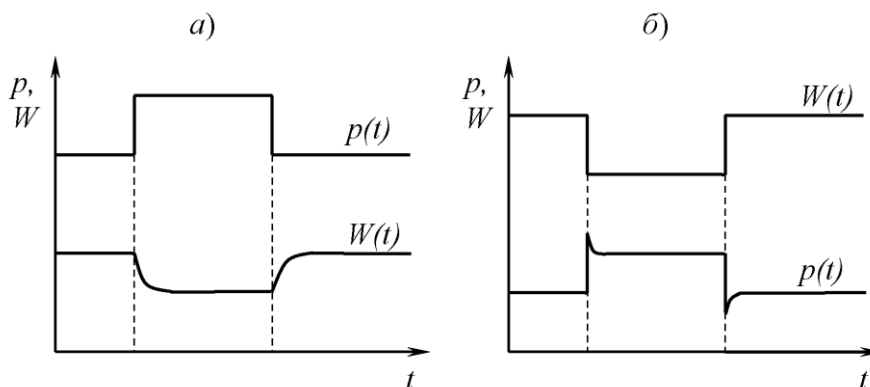


Рис. 1. График изменения давления и объема

Процесс изменения давления и объёма может совершаться многократно и происходить, например, по гармоническому закону:

$$p = p_0 \sin \omega t \quad \text{или} \quad W = W_0 \sin \omega t. \quad (13)$$

При медленно протекающем процессе ($\omega \rightarrow 0$) теплообмен рабочей жидкости с окружающей средой успевает завершиться и будет соблюдаться постоянство температуры — $T = const$, в этом случае модуль упругости называют изотермическим и обозначают E_T .

При быстро протекающем процессе ($\omega \rightarrow \infty$), например, ультразвуковых колебаниях, теплообмен не успевает завершиться, процесс идёт без отвода и подвода

тепла (адиабатический процесс). Модуль упругости в этом случае называют адиабатическим и обозначают E_A .

Таким образом, модуль объёмной упругости жидкости зависит от давления, температуры и частоты процесса:

$$E = f(p, T, \omega). \quad (14)$$

Качественная зависимость модуля объёмной упругости от частоты процесса представлена на рис. 2 ($E_T < E_A$). При исследовании акустических процессов следует пользоваться адиабатическим модулем упругости.

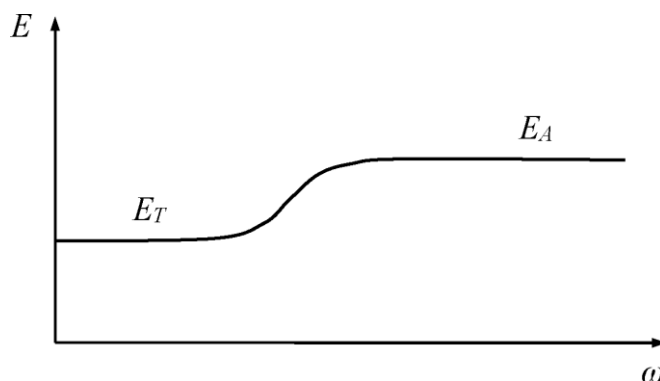


Рис. 2. Изменение модуля объёмной упругости от частоты процесса

Экспериментально установлено, что модули упругости E_T и E_A для различных масел линейно возрастают с увеличением давления:

$$E_T = E_{T_0} + m_T p, \quad (15)$$

$$E_A = E_{A_0} + m_A p, \quad (16)$$

где E_{T_0} и E_{A_0} – начальные значения модулей упругости при $p = 0,1$ МПа. Коэффициенты m_T и m_A называются угловыми коэффициентами, их значения лежат в диапазонах:

$$m_T = 12 \dots 14, \quad m_A = 10 \dots 12.$$

Изотермический и адиабатический модули объёмной упругости зависят от температуры. При повышении температуры начальные значения модулей E_{T_0} и E_{A_0} уменьшаются.

Существенное влияние на модуль упругости оказывает содержащийся в жидкости воздух, который значительно снижает его величину. При давлениях больше 10 МПа (100 ат), наличие воздуха в жидкости не оказывает существенного влияния на модуль упругости, так как при больших давлениях содержание воздуха в жидкости незначительно.

Каждая рабочая жидкость имеет свой модуль упругости. Модуль упругости минеральных масел при температуре 20°C и атмосферном давлении лежит в пределах (1300...1700) МПа, воды – 2000 МПа.

Плотность сплошной среды

Одной из основных характеристик жидкой среды является плотность распределения массы среды по объёму, или просто плотность среды, которая в произвольной точке определяется соотношением:

$$\rho = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta W}, \quad (17)$$

где ΔM – масса среды; ΔW – объём, в котором заключена эта масса.

В системе СИ размерность плотности

$$[\rho] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

В общем случае плотность жидкой или газообразной среды может изменяться в пространстве от точки к точке и в каждой точке изменяться во времени, т.е.

$$\rho = f(x, y, z, t). \quad (18)$$

Ввиду того, что объём W является функцией термодинамических параметров p и T , плотность сплошной среды также оказывается функцией давления и температуры и определяется уравнением состояния. В зависимости от давления и температуры плотность может быть вычислена по выражению

$$\rho = \frac{M}{W} = \frac{M}{W_0(1+\beta_T\Delta T-\beta_p\Delta p)} = \frac{\rho_0}{1+\beta_T\Delta T-\beta_p\Delta p}. \quad (19)$$

где ρ_0 – плотность при начальных значениях температуры и давления.

Вязкость рабочих жидкостей

Вязкостью называют способность жидкости оказывать сопротивление сдвигающим усилиям. Это свойство проявляется только при движении жидкости. Пусть некоторое количество жидкости заключено между двумя плоскими неограниченными пластинами (рис. 3); расстояние между ними – n ; скорость движения верхней пластины относительно нижней – V .

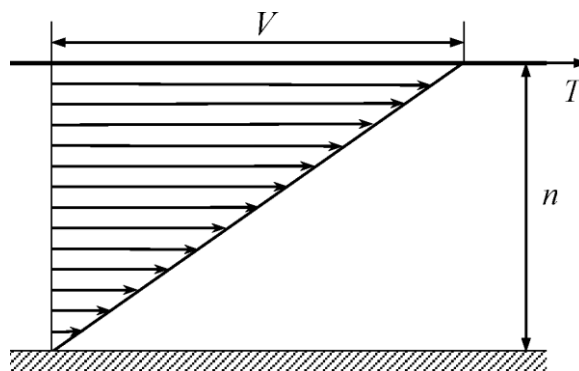


Рис. 3. Схема представления тангенциальной вязкости

Опыт показывает, что слой жидкости, непосредственно прилегающий к стенке, прилипает к ней. Отсюда следует, что скорость движения жидкости, прилегающей к нижней стенке, равна нулю, а к верхней – V . Промежуточные слои движутся со скоростью, постепенно возрастающей от 0 до V .

Таким образом, существует разность скоростей между слоями и возникает взаимное скольжение слоев, которое приводит к возникновению силы внутреннего трения.

Для перемещения одной пластины относительно другой необходимо приложить к движущейся пластине некоторую силу T , равную силе сопротивления жидкости обусловленную внутренним трением. Ньютон установил, что эта сила пропорциональна скорости V , площади поверхности соприкасающихся слоев S и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами n , т.е.

$$T = \mu \frac{\Delta V}{\Delta n} S, \quad (20)$$

где ΔV – относительная скорость движения соседних слоев; Δn – расстояние между ними; μ – коэффициент пропорциональности, который называется динамическим коэффициентом вязкости.

В пределе для силы внутреннего трения

$$T = \mu \frac{dV}{dn} S. \quad (21)$$

Формула (21) была предложена Ньютоном в 1686 г.

Величина касательного напряжения $\tau = T/S$, которая принимается всегда положительной, определяется отношением

$$\tau = \pm \mu \frac{dV}{dn}, \quad (22)$$

где знак «+» будет соответствовать положительному значению dV/dn , а «-» – отрицательному; знак dV/dn зависит от закона изменения скорости по сечению потока и выбора направления нормали n .

Из формулы Ньютона можно получить выражение для определения величины динамического коэффициента вязкости

$$\mu = \left| \tau / \frac{dV}{dn} \right|, \quad (23)$$

из которого следует, что динамический коэффициент вязкости численно равен касательному напряжению τ при градиенте скорости равном единице $dV/dn = 1$.

Коэффициент μ в системе СИ имеет размерность:

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{\left[\frac{dV}{dn}\right]} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \text{с} = \text{Па} \cdot \text{с}.$$

Жидкости, подчиняющиеся закону Ньютона, называют ньютоновскими (вода, минеральные масла, керосин, бензин, глицерин). Жидкости, не подчиняющиеся этому закону – неньютоновскими или аномальными жидкостями. К их числу относятся некоторые масла при отрицательных температурах, парафинистые нефтепродукты при низких температурах, эмульсии, коллоидные растворы, гудрон, асфальт, целлюлозно-бумажная масса, суспензии.

Если движение жидкости начинается только при достижении некоторого начального касательного напряжения, то в таких жидкостях касательные напряжения определяют по формуле Бингама

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dV}{dn}. \quad (24)$$

Кроме динамического коэффициента вязкости в гидравлике широко используется кинематический коэффициент вязкости:

$$[\nu] = \frac{[\mu]}{[\rho]} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \text{с} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} = \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \frac{\text{с}}{\text{м}^2}\right) \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} = \left(\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}\right) \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}. \quad (25)$$

Этот коэффициент получил такое название потому, что в размерность ν входят только метры и секунды (и не входит размерность массы).

В литературе встречается также единица измерения динамического коэффициента вязкости в Пуазах (в честь французского врача Ж. Пуазейля, выполнившего фундаментальные исследования течения вязкой жидкости в трубах):

$$1 \text{ Пуаз} = \frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}} = \frac{10^{-3} \text{ кг}}{10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}} = 10^{-1} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = 10^{-1} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2} = 10^{-1} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{с},$$

и кинематического коэффициента вязкости в Стоксах (в честь английского гидромеханика Дж. Стокса, который получил дифференциальные уравнения движения вязкой жидкости):

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

Сотая доля стокса называется сантистоксом. Например, кинематическая вязкость воды при температуре 20°C равна:

$$\nu_{\text{воды}} = 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = 10^{-2} \text{ Ст} = 1 \text{ сСт}.$$

Механизмы внутреннего трения, являющиеся следствием вязкости, в жидкостях и газах различны. В жидкостях молекулы расположены ближе друг к другу, чем в газах, и природа вязкости в жидкостях заключается в наличии сил межмолекулярного

взаимодействия. С ростом температуры увеличивается амплитуда колебаний молекул относительно их центров, что ведёт к уменьшению сил межмолекулярного взаимодействия и снижает вязкость жидкости.

Вязкость газов, наоборот, с повышением температуры увеличивается. В газах вязкость обусловлена, главным образом, беспорядочным тепловым движением молекул. Интенсивность этого движения увеличивается с повышением температуры. Поэтому вязкость газов увеличивается с повышением температуры.

Влияние температуры на вязкость рабочих жидкостей, используемых в гидроприводах, определяется эмпирической зависимостью:

$$\mu = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)}, \quad (26)$$

где μ_0 – вязкость при температуре 20°C; β – экспериментальный коэффициент, который для минеральных масел изменяется в пределах $\beta = 0,02 \dots 0,03$. Для минеральных масел с вязкостью менее 80 сСт при температурах от 20°C до 150°C при расчете кинематического коэффициента вязкости используют формулу

$$\nu_t = \nu_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n, \quad (27)$$

где ν_{50} – кинематический коэффициент вязкости при $t = 50$ °C; t – температура в градусах Цельсия; n – опытный коэффициент (табл. 1).

Таблица 1

ν_{50} , сСт	2,8	6,25	9,0	21,2	29,3	37,3	45,1	60,6	80,0
n	1,39	1,59	1,72	1,99	2,13	2,24	2,32	2,49	2,56

Динамический коэффициент вязкости газа в зависимости от температуры может быть вычислен по формуле Э. Сазерленда:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2}, \quad (28)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости при заданной температуре T , [Па·с]; μ_0 – контрольная вязкость при контрольной температуре T_0 , [Па·с]; T – заданная абсолютная температура; T_0 – контрольная абсолютная температура в градусах Кельвина; C – постоянная Сазерленда, зависящая от рода газа.

Эта формула показывает, что с ростом температуры вязкость газов растет. Постоянная Сазерленда и контрольные вязкости газов при различных контрольных температурах приведены в таблице 2.

Таблица 2

Газ	C	T_0	μ_0
	°К	°К	мкПа·с
Воздух	120	291,15	18,27
Азот	111	300,55	17,81
Кислород	127	292,25	20,18
Углекислый газ	240	293,15	14,8
Водород	72	293,15	8,76
Аммиак	370	293,15	9,82
Гелий	79,4	273	19,0

Поверхностное натяжение

Условия, в которых находятся молекулы жидкости на границе с газами или твёрдыми телами, отличаются от условий, в которых молекулы находятся внутри жидкого объёма. Если молекула находится внутри объёма, то её окружают соседние молекулы с такими же свойствами, поэтому силы, действующие со стороны окружающих молекул, уравновешены. У молекул, расположенных на границе жидкости, силы, действующие со стороны граничного тела, могут отличаться от сил, действующих внутри объёма. Система сил оказывается неуравновешенной и появляется равнодействующая, направленная внутрь или наружу объёма жидкости. Эту силу называют силой поверхностного натяжения. Благодаря действию силы поверхностного натяжения, объём жидкости, на который не действуют никакие другие силы, стремясь иметь минимум энергии, принимает сферическую форму. Наличием поверхностного натяжения объясняется способность жидкостей образовывать капли. Из-за этой способности жидкости называют капельными.

Жидкость, имеющая криволинейную свободную поверхность, испытывает дополнительное усилие, увеличивающее или уменьшающее давление в жидкости. Увеличение давления происходит, когда поверхность жидкости выпукла, уменьшение – когда поверхность жидкости вогнута. Капиллярностью называется свойство жидкостей подниматься или опускаться в трубках малого диаметра под действием дополнительного давления, вызванного силами поверхностного натяжения. Подъём жидкости происходит в капиллярной трубке, поверхность которой смачивается (например, вода - стекло), опускание – в трубке, поверхность которой жидкостью не смачивается (например, ртуть - стекло) (рис. 4).

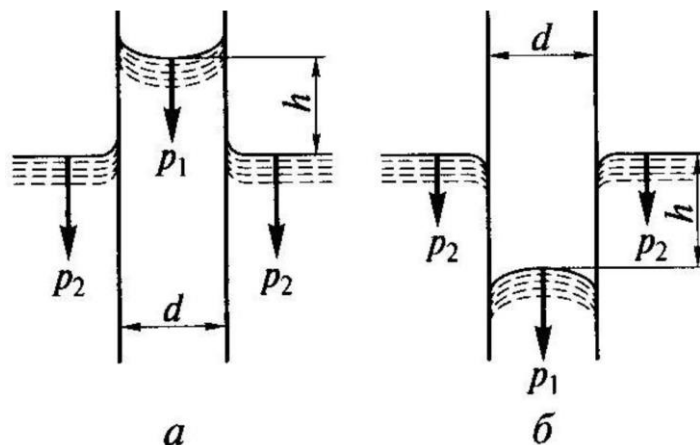


Рис. 4. Изменение уровня жидкости в капиллярах:

a – смачиваемая поверхность капилляра; *б* – несмачиваемая поверхность капилляра;
 p_1 – давление на поверхности в трубке; p_2 – давление на поверхности в резервуаре;
 h – высота уровня жидкости в капилляре

Вогнутая поверхность уменьшает давление, а выпуклая увеличивает. В первом случае возникает перепад давления $\delta p_{\text{пов}} = p_2 - p_1$, под воздействием которого жидкость в трубке поднимается на высоту h и уравнивается весом столба поднятой жидкости (см. рис. 4, *a*). В случае несмачиваемой поверхности под действием перепада давлений $\delta p_{\text{пов}} = p_1 - p_2$ жидкость в трубке опускается (см. рис. 4, *б*).

В стеклянной трубке диаметром d (мм) вода при температуре 20°C поднимается дополнительно на высоту h :

$$h = \frac{29,8}{d}, \text{ мм} \quad (29)$$

В такой же трубке ртуть опускается на высоту:

$$h = \frac{10,15}{d}, \text{ мм} \quad (30)$$

Влияние капиллярности приходится учитывать, например, при работе с жидкостными приборами для измерения давления.

Растворимость газов в жидкостях

Растворимость газов в жидкостях характеризуется количеством растворенного газа в единице объема. Она различна для разных газов и жидкостей и зависит от давления газа над свободной поверхностью. Относительный объем газа, растворенного в жидкости при данной температуре до ее полного насыщения, в соответствии с законом Генри прямо пропорционален величине давления:

$$W_{\text{г}}/W_{\text{ж}} = k(p/p_0), \quad (31)$$

где $W_{\text{г}}$ – объем растворенного газа, приведенный к нормальным условиям (p_0, T_0); $W_{\text{ж}}$ – объем жидкости; k – коэффициент пропорциональности (коэффициент растворимости газа в жидкости); p – давление в жидкости.

Для воды коэффициент растворимости газов при разных температурах приведен в табл. 3.

Таблица 3 – Коэффициент растворимости некоторых газов в воде (г/л)

Газ	Температура, °C		
	0	20	40
Азот	0,0293	0,0164	0,0118
Аргон	0,058	0,037	0,027
Кислород	0,049	0,031	0,023
Углекислый газ	1,713	0,878	0,53

Из таблицы можно видеть, что при температуре 20°C и атмосферном давлении в воде содержится 1,6 % растворенного воздуха по объему ($k = 0,016$). С увеличением температуры коэффициент растворимости воздуха в воде уменьшается. Коэффициент растворимости воздуха в минеральных маслах при температуре 20°C лежит в диапазоне 0,08...0,1.

Количество растворенного газа, как следует из приведенной выше формулы для $W_{\text{г}}/W_{\text{ж}}$, зависит от давления. Например, при повышении абсолютного давления с 7,09 до 10,9 МПа объем растворенного воздуха в масле увеличивается на 50 %.

Вопросы для самоконтроля:

1. Приведите уравнения состояния и объёмных деформаций.
2. Дайте характеристику сжимаемости жидкости и модулю объёмной упругости.
3. Опишите плотность сплошной среды.
4. Охарактеризуйте вязкость рабочих жидкостей.
5. Дайте описание поверхностного натяжения.
6. Проанализируйте растворимость газов в жидкостях.

Литература

1. Лекции по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии»: учебно-методическое пособие / составители: Ж.Т. Ешова, Д.Н. Акбаева. – Алматы: Қазақ университеті, 2017. – 392 с. – 40 экз.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с.
4. Вайсман Н.М. Механика жидкости и газа. Гидравлика: учеб. пособие / Н.М. Вайсман, В.А. Голиков, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 222 с.