

3. Понятие гидравлики как механики сплошной среды.
4. Разделы гидравлики.
5. Методологические основы гидравлики.
6. Частные законы гидравлики и их связь с общими и всеобщими законами
7. Абстрактные модели в гидравлике.
8. Методы исследований в гидравлике.
9. Математическое моделирование в гидравлике

10. Зарождение гидравлики
11. Работы по гидравлике в период XVI—XVII вв.
12. Работы М. В. Ломоносова, Д. Бернулли, Л. Эйлера в области гидравлики
13. Развитие гидравлики во Франции в XVIII веке.
14. Развитие гидравлики в России в конце XIX и начале XX вв
15. Развитие гидравлики в СССР.

## Глава 2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

### § 2.1. Жидкости и их отличие от твердых и газообразных тел

*Жидкость* — агрегатное состояние вещества, сочетающее в себе черты как твердого, так и газообразного состояния.

Подобно веществам, находящимся в твердом состоянии, жидкость сохраняет свой объем и обладает определенной прочностью на разрыв, однако при этом обладает изменчивостью формы, что роднит ее с газами.

Благодаря легкоподвижности частиц, обусловленной слабостью сил межмолекулярного сцепления и, следовательно, неспособностью воспринимать в состоянии покоя даже малые касательные напряжения, жидкости и газы легко, не дробясь на части, изменяют свою форму, принимая форму того сосуда, в котором они находятся. Эта их способность неограниченно деформироваться под действием сколь угодно малых сил называется *текучестью*.

Когда жидкости и газы можно рассматривать как сплошную легкоподвижную среду, их объединяют единым понятием «жидкости», подразделяя на *капельные*, такие как вода, органические масла, нефть, ртуть, образующие капли, и *газообразные* — воздух и другие газы, в обычном состоянии капель не образующие.

Если объем капельной жидкости меньше объема сосуда, в который она

заклучена, эта жидкость занимает часть последнего; при этом образуется граница раздела жидкости и газа (воздуха, пара жидкости и т. д.), называемая *свободной поверхностью*.

В дальнейшем будет, как правило, рассматриваться свойство *однородных жидкостей*, имеющих в данный момент во всех точках занятого ею пространства одинаковые физико-механические свойства, такие как плотность, вязкость, сжимаемость, упругость и др.

Многие свойства жидкости известны изучающим курс гидравлики из физики, ряда смежных дисциплин и повседневной практики. Ниже кратко рассмотрены некоторые из них.

### § 2.2. Плотность и удельный вес жидкостей

Одна из важнейших физических характеристик жидкости — ее *плотность*  $\rho$ , то есть масса единичного объема жидкости.

Плотность однородной жидкости

$$\rho = \frac{M}{W}, \quad (2.1)$$

где  $M$  — масса рассматриваемой жидкости;  $W$  — объем этой массы.

Плотность — это характеристика среды, определяющая распределение масс. В произвольной точке она может быть

определена соотношением

$$\rho = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta W}. \quad (2.2)$$

В единицах СИ плотность выражается в килограммах на кубический метр (кг/м<sup>3</sup>).

Для примера укажем средние значения плотности  $\rho$  некоторых жидкостей, кг/м<sup>3</sup>, при температуре 20 °С:

Вода	998
Дизельное топливо	850
Керосин	820
Нефть	900
Ртуть	13 550

Вес единицы объема жидкости называется *удельным весом*.

Удельный вес выражается в ньютонах на кубический метр (Н/м<sup>3</sup>).

Удельный вес однородной жидкости

$$\gamma = \frac{G}{W}, \quad (2.3)$$

где  $G$  — вес рассматриваемого объема жидкости, Н.

Поскольку вес тела

$$G = Mg, \quad (2.4)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, то подставляя выражение в уравнение (2.3), найдем связь между удельным весом и плотностью:

$$\gamma = \rho g. \quad (2.5)$$

Строго говоря, удельный вес, в отличие от плотности, не является физико-химической характеристикой вещества, в том числе и жидкости, так как зависит от места измерения географической широты и высоты над уровнем моря. Однако при этом следует учитывать обстоятельство, что величина  $g$ , входящая в приведенные выше и многие другие зависимости гидравлики, изменяется по земной поверхности в пределах 0,5 %, а точность гидравлических расчетов составляет обычно 3—5 %. Это позволяет во всех случаях прини-

мать осредненное значение ускорения свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>) и, следовательно, не считаться с фактической переменностью этой величины при определении удельного веса.

Таким образом, средние значения удельного веса  $\gamma$ , приведенных ниже жидкостей, Н/м<sup>3</sup>, при 20 °С будут:

Вода	9790
Дизельное топливо	8300
Керосин	8000
Нефть	8830
Ртуть	132 900

Плотность и удельный вес жидкостей зависят от температуры.

В качестве примера приведем значения плотности и удельного веса воды при различной температуре:

$t$ , °С	0	4	25	50	100
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	999,9	1000	997	998	959
$\gamma$ , Н/м <sup>3</sup>	9809	9810	9782	9694	9404

Отношение  $\delta$  плотности (удельных весов) двух жидкостей называется *относительной плотностью (относительным удельным весом)*, которая определяется как отношение массы (веса) рассматриваемой жидкости при заданной температуре  $t$  °С к весу (массе) равновеликого объема дистиллированной воды при температуре 4 °С и атмосферном давлении; обозначается она  $\delta_t^t$ .

Для примера приведем значения относительной плотности (относительного удельного веса)  $\delta_4^{20}$  тех же, что и ранее, жидкостей при 20 °С:

Вода	0,998
Дизельное топливо	0,89
Керосин	0,82
Нефть	0,9
Ртуть	13,55

Знание удельного веса жидкости необходимо для решения многих практических задач гидравлики (например, при определении давления внутри жидкости и жидкости на твердые тела и

т. д.); различие в плотности жидкостей, жидкостей и твердых тел играет существенную роль при решении вопросов, связанных с плаванием тел, и ряда других.

### § 2.3. Сжимаемость и упругость жидкостей

*Сжимаемость* — обратимое изменение объема жидких тел под воздействием всестороннего давления.

Сжимаемость жидкости характеризуется *коэффициентом объемного сжатия*  $\beta_p$ , численно равным относительному уменьшению ее объема  $W$  при повышении на единицу давления  $p$ :

$$\beta_p = - \frac{1}{W} \frac{dW}{dp}. \quad (2.6)$$

Знак минус в формуле (2.6) обусловлен тем, что положительному приращению (увеличению) давления  $p$  соответствует отрицательное приращение (уменьшение) объема  $W$ .

Средние значения коэффициента объемного сжатия  $\beta_p$ ,  $1/\text{кПа}$ :

Вода	0,0000051
Керосин	0,0000059
Нефть	0,0000074
Дизельное топливо	0,0000064
Ртуть	0,00000313

Считая, что масса жидкого тела  $M = \text{const}$ , коэффициент объемного сжатия можно принимать равным относительному увеличению плотности  $\rho$  при возрастании на единицу давления  $p$ :

$$\beta_p = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}. \quad (2.7)$$

*Упругость* — свойство жидких тел восстанавливать свой объем после прекращения действия внешних сил.

Количественной характеристикой упругих свойств жидкости является *модуль объемной упругости*  $E_0$  — величина, обратная коэффициенту объемного

сжатия:

$$E_0 = \frac{1}{\beta_p}, \quad (2.8)$$

или

$$E_0 = \rho \frac{dp}{d\rho}. \quad (2.9)$$

Средние значения модуля объемной упругости  $E_0$ , МПа:

Вода	1960
Дизельное топливо	1660
Керосин	1690
Нефть	1350
Ртуть	32 000

Для капельных жидкостей модуль  $E_0$  несколько уменьшается с увеличением температуры и возрастает с повышением давления. В этой связи различают адиабатный (когда жидкое тело не получает теплоты извне и не отдает ее) и изотермический (при постоянной температуре) модуль упругости (первый больше второго приблизительно в 1,5 раза и проявляется при быстротечных процессах сжатия жидкости без теплообмена). Приведенные выше средние значения  $E_0$  являются значениями изотермического модуля объемной упругости при атмосферном давлении.

Сжимаемость и упругость жидкостей обусловлены взаимодействием между атомами и молекулами и их тепловым движением.

Для обычно встречающихся на практике изменений давления можно принимать с точностью, вполне достаточной для большинства инженерных расчетов, плотность капельных жидкостей постоянной и считать, что они не сжимаемы. Однако в некоторых случаях, в частности, при изучении явления гидравлического удара в трубах, где сжимаемость и упругость жидкости являются определяющими, пренебрегать этими свойствами нельзя.

## § 2.4. Вязкость жидкостей.

### Понятие о реальной и идеальной жидкости

*Вязкость* (внутреннее трение) — свойство жидкостей оказывать сопротивление действию внешних сил, вызывающих их течение. Это свойство противоположное текучести: более вязкие жидкости (глицерин, смазочные масла, жидкий битум) — менее текучие, и наоборот.

Если жидкость движется слоями, то вязкость проявляется в том, что при сдвиге соседних слоев относительно друг друга возникает сила противодействия — напряжение сдвига, которое для обычных жидкостей пропорционально скорости относительного сдвига слоев (гипотеза Ньютона). Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом динамической вязкости или просто *динамической вязкостью*.

Таким образом, динамическая вязкость  $\mu_v$  характеризует силу внутреннего трения, которая возникает на квадратном метре поверхности двух перемещающихся относительно друг друга слоев жидкости толщиной  $dn$  при градиенте скорости  $\frac{du}{dn}$ , равном 1 (см. рис. 2.1). Динамическая вязкость выражается в паскалях-секундах ( $\text{Па} \cdot \text{с}$ ) и зависит от рода жидкости и ее температуры. Например, при температуре  $20^\circ\text{C}$  значения динамической вязкости  $\mu_v$  такие:

Вода	$101 \cdot 10^{-5}$ Па·с
Ртуть	$155 \cdot 10^{-5}$ Па·с

Повышение температуры ослабляет межмолекулярные связи в жидкости и способствует снижению ее динамической вязкости.

Отношение динамической вязкости жидкости к ее плотности называется

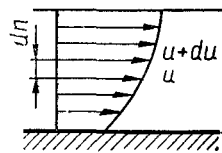


Рис. 2.1

*кинематической вязкостью:*

$$\nu = \frac{\mu_v}{\rho}. \quad (2.10)$$

Кинематическая вязкость выражается в квадратных метрах на секунду ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). Например, при температуре  $20^\circ\text{C}$  кинематическая вязкость  $\nu$  имеет следующие значения:

Вода	$101 \cdot 10^{-8}$ $\text{м}^2/\text{с}$
Ртуть	$11,4 \cdot 10^{-8}$ $\text{м}^2/\text{с}$

Вязкость является определяющим фактором в решении вопроса о возникающих при движении жидкости силах трения и характере течения.

Строго говоря, вязкость капельных жидкостей меняется с изменением не только температуры, но и давления. Однако в диапазоне обычно имеющих место на практике малых давлений (до 1 МПа) это изменение незначительно и поэтому им в большинстве случаев пренебрегают. При больших же давлениях изменение вязкости для ряда капельных жидкостей (например, для некоторых видов масел) весьма значительно и им уже пренебрегать нельзя.

Иногда приходится считаться с так называемой *объемной вязкостью* — свойством жидкой среды необратимо превращать в ней механическую энергию в теплоту при объемных деформациях. Проявляется объемная вязкость, например, при распространении в жидкости звуковых (особенно ультразвуковых) волн.

Существующие в природе, или, как их обычно называют, «реальные» жидкости, обладают практически постоян-

ной плотностью, а также характеризуются наличием очень малых сил сцепления между отдельными частицами. Эти физические свойства капельных жидкостей позволили ввести в гидравлику понятие «идеальной» (или «совершенной») жидкости с целью облегчения решения многих задач и проблем гидромеханики и инженерной гидравлики.

*Идеальной жидкостью* называется такая условная жидкость, которая считается совершенно несжимаемой и нерасширяющейся, обладает абсолютной подвижностью частиц. В природе подобные жидкости не встречаются; в определенной степени к ним приближается жидкий гелий в состоянии сверхтекучести (при охлаждении ниже 2,2 °К).

Совершенно очевидно, что, пренебрегая сжимаемостью и расширяемостью жидкости, а также силами сцепления и силами внутреннего трения, мы значительно облегчаем решение многих задач. В ряде случаев учет всех этих факторов не позволил бы вообще получить никаких решений в конечном виде. Поэтому использование понятия об идеальной жидкости оказалось весьма плодотворным

Рассматривая вместо реальной жидкости идеальную, мы как правило, не делаем большой ошибки. Если идеальная жидкость считается абсолютно несжимаемой и нерасширяющейся, то и в реальных жидкостях объемы и плотности можно считать практически постоянными. Если в идеальной жидкости частицы ее считаются абсолютно подвижными, то и в реальных они являются очень подвижными. Следовательно, только пренебрежение вязкостью жидкостей (силами внутреннего трения) может дать более или менее существенное расхождение в получаемых результатах с действительными условиями.

При переходе от модели невязкой жидкости к реальным (вязким) жидко-

стям в полученные теоретические зависимости или количественные результаты приходится вводить опытные поправки, учитывающие свойство фактически существующих жидкостей.

## § 2.5. Поверхностное натяжение. Смачиваемость. Капиллярность

В результате притяжения между отдельными молекулами жидкости и контактирующих с ней газов и твердых тел возникают силы сцепления. Эти силы, возникающие между отдельными частицами, находящимися внутри жидкости, взаимно уравниваются. Однако эта однородность молекулярных связей внутри жидкого тела нарушается на его границах (рис. 2.2).

Так, поверхность жидкости на границах раздела ее с другой неперемешивающейся жидкостью, воздухом, газом или насыщенным паром благодаря силам взаимного притяжения молекул поверхностного слоя находится в состоянии равномерного натяжения.

В общем случае работу образования единицы площади поверхности раздела фаз при постоянной температуре называют *поверхностным натяжением*. Для жидкости поверхностное натяжение часто определяют как силу, действующую на единицу длины контура раздела фаз и стремящуюся сократить эту поверхность до минимума.

Поверхностное натяжение, таким образом, выражается в единицах силы, отнесенных к длине, то есть в ньютонах на метр.

Поверхностное натяжение  $\sigma$ , на границе раздела некоторых жидкостей с воздухом при 20 °С и нормальном барометрическом давлении, Н/м, имеет такие значения:

Вода	0,081
Керосин	0,026
Ртуть	0,541

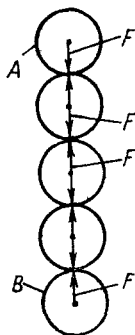


Рис 2 2

Поверхностное натяжение, стремясь сократить поверхность жидкости, искривляет ее. Однако маловязкие жидкости (например, вода), взятые в достаточном количестве, принимают форму сосуда, в который они заключены и их свободная поверхность оказывается практически плоской, поскольку силы земного притяжения преодолевают действие поверхностного натяжения.

Когда внешние силы отсутствуют (например, в условиях невесомости) или компенсированы (жидкость находится в другой не смешивающейся жидкости, но равной ей по плотности), поверхность жидкости всегда искривлена, причем ограниченный объем жидкости, не соприкасающейся с другими телами, принимает в этом случае форму шара. Эта форма отвечает устойчивому равновесию жидкости, поскольку при данном объеме шар обладает минимальной поверхностью и, следовательно, поверхностная энергия жидкости в этом случае также минимальна.

При контакте жидкости с твердыми телами на форму ее поверхности существенно влияют явления смачивания, обусловленные взаимодействием молекул жидкости и твердого тела. Молекулярным давлением на поверхности жидкости и силами взаимодействия между нею и близко расположенными стенками (трубки малого диаметра, мелкопо-

ристые твердые тела) обусловлено явление капиллярности.

Силы притяжения, действующие между молекулами твердого тела и смачивающей его жидкости, заставляют последнюю подниматься по стенкам сосуда, образуя так называемый вогнутый мениск. Создающееся при этом отрицательное (капиллярное) давление вызывает подъем жидкости (рис. 2.3, б).

Так, высота капиллярного поднятия при температуре 20 °С в стеклянной трубке диаметром  $d$ , мм:

Вода	$h_{\text{кап}} = \frac{30}{d}$
Спирт	$h_{\text{кап}} = \frac{10}{d}$ ,

между двумя стеклянными пластинками, расположенными на расстоянии  $S$ , мм:

Вода	$h_{\text{кап}} = \frac{15}{S}$
Спирт	$h_{\text{кап}} = \frac{5}{S}$ .

Капиллярное впитывание играет существенную роль в снабжении водой растений, передвижении влаги в почве и других пористых грунтах. На высоту капиллярного поднятия в грунтах влияет степень их уплотнения, гранулометрический и химико-минералогический состав, структура, текстурные осо-

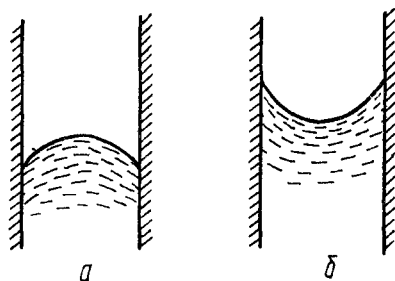


Рис. 2.3

бенности, а также состав водного раствора.

Капиллярная пропитка различных материалов широко применяется в процессе химической технологии, используется в быту. Отрицательное капиллярное давление оказывает стягивающее действие на ограничивающие жидкость подвижные стенки. Многие свойства дисперсных систем (проницаемость, прочность, усадка при высушивании, поглощение жидкости) обусловлены возникновением высокого капиллярного давления в тонких порах.

Жидкость, не смачивающая поверхность, образует выпуклый мениск (рис. 2.3, а), что вызывает опускание жидкости у стенок.

Например, в стеклянной трубочке диаметром  $d$ , мм, при  $20^\circ\text{C}$  ртуть опускается на величину

$$h_{\text{кап}} = \frac{10,15}{d}.$$

Как уже отмечалось, силы межмолекулярного сцепления жидкости и несмешивающихся с ней сред оказываются слабее на границах с газом и несмачиваемыми твердыми телами, чем внутри самой жидкости, и прочнее на поверхности раздела со смачиваемыми твердыми поверхностями.

В большинстве случаев движения, рассматриваемых в гидравлике, жидкость по части (открытые русла) или всей поверхности (напорные трубы) контактирует с твердой, обычно смачиваемой, поверхностью. Если силы сцепления жидкости в местах контакта со стенками превышают молекулярные силы внутри самой жидкости, то слой жидкости, ближайший к смоченной поверхности, прилипает к ней и в движении не участвует. Отсюда непосредственно следует широко используемое во многих расчетах «граничное» условие: скорость движения у смоченной поверхности равна нулю.

## § 2.6. Растворение газов в жидкостях. Испарение и кипение жидкостей, кавитация

Рассматривая физические свойства жидкостей, необходимо отметить некоторые их особые состояния — газонаполнение, испарение, кипение, кавитацию.

Жидкости обладают способностью поглощать и растворять соприкасающиеся с ними газы, образуя макроскопически однородные смеси, либо захватывать газы, образуя с их пузырьками двухфазные системы.

Например, если к движущемуся с большими скоростями потоку воды имеется доступ наружного воздуха, то последний частично растворяется в воде, а частично образует с ней двухфазную систему из смеси воды и пузырьков воздуха. Происходит *аэрация потока* (от греческого слова «аэр» — воздух), которую необходимо учитывать при расчете быстротоков, крупных водоводов и т. д. На практике широко используется искусственное пополнение жидкости газом. Для примера укажем пополнение воды воздухом для быстрого окисления содержащихся в ней органических веществ (аэрация для очистки питьевых и сточных вод), приготовление горючей смеси из легкого жидкого топлива и воздуха для питания карбюраторных двигателей внутреннего сгорания.

Растворимость газа в жидкостях зависит от рода последних (характеризуется *коэффициентом растворимости  $k_p$* ) и изменяется с изменением давления. При  $20^\circ\text{C}$  коэффициент  $k_p$  имеет следующие значения: для воды 0,016, керосина 0,13, минеральных масел 0,08.

Относительный объем газа, растворенного в жидкости до ее полного насыщения, прямо пропорционален давлению и коэффициенту растворимости. При понижении давления растворенный газ выделяется из жидкости, причем обыч-

но интенсивнее, чем растворяется в ней. Это явление в ряде случаев отрицательно сказывается на работе гидросистем.

Жидкости в зависимости от температуры могут переходить в твердое состояние (превращение воды в лед) или газообразное состояние, образуя *пар*. Парообразование, происходящее на свободной поверхности жидкости, называется *испарением*.

Испаряемость свойственна всем капельным жидкостям, однако интенсивность испарения зависит от рода жидкости и условий, в которых она находится.

Испарение жидкостей используется во многих технологических процессах и аппаратах (холодильные машины, аппараты для опреснения воды), учитывается при гидрологических расчетах. Это понятие лежит в основе уравнения баланса круговорота воды в природе.

Одним из показателей, характеризующих испаряемость жидкости, является температура ее кипения  $t_s^0$  при нормальном атмосферном давлении — чем выше температура кипения, тем меньше испаряемость.

Температура кипения жидкости зависит от давления. Для примера приведем температуру  $t_s^0$  кипения воды в зависимости от давления на ее поверхности:

$p$ , кПа	0,6	0,9	1,2	2,4	12,6	100,3	485
$t_s^0$ , °C	0	5	10	20	50	100	150

На практике (емкости, баки, гидросистемы) обычно приходится иметь дело с испарением, а часто и кипением жидкости в замкнутых объемах при различных температурах и давлениях. Поэтому более полной характеристикой испаряемости является так называемое *давление (упругость) насыщенных паров*.

*Насыщенным паром* называется пар, находящийся в замкнутом пространстве в термодинамическом равновесии с

жидкостью того же химического состава (число молекул, вырывающихся в единицу времени из жидкости и переходящих в паровую фазу, равно числу молекул пара, возвращающихся в жидкость за то же время). В интервалах температур и давления, в которых возможно подобное равновесие, каждой заданной температуре соответствует определенное *давление насыщенного пара*.

Чем больше давление насыщенных паров при заданной температуре, тем больше испаряемость жидкости. Кипение возникает, когда давление насыщенных паров при данной температуре ставится равным внешнему давлению. Для сложных жидкостей, представляющих собой многокомпонентные смеси (например, для бензина), давление насыщенного пара зависит не только от температуры и физико-химического состава жидкости, но и от соотношения объемов жидкой и паровой фаз. Давление насыщенных паров в этом случае возрастает с увеличением части объема, занятого жидкой фазой. Поэтому значения упругости паров сложных жидкостей обычно приводятся для соотношения жидкой и паровой фаз, равного 1 : 4.

*Кавитация* (от латинского слова, означающего «пустота», «полость») — образование в капельной жидкости полостей, заполненных газом, паром или их смесью (так называемых *кавитационных пузырьков*).

Кавитационные пузырьки образуются в местах, где давление в жидкости становится ниже некоторого критического значения, приблизительно равного давлению насыщенного пара этой жидкости при данной температуре. Такое понижение давления может происходить вследствие больших местных скоростей в потоке жидкости (*гидродинамическая кавитация*) или вследствие прохождения акустической волны большой интенсивности (*акустическая кавитация*).



Локальное понижение давления в движущейся с большой скоростью жидкости возникает, например, при обтекании твердых тел. Так, в трубе с местным сужением создается довольно четко ограниченная «кавитационная зона», заполненная движущимися пузырьками. Перемещаясь затем в область с более высоким давлением, кавитационные пузырьки могут резко захлопываться, излучая при этом ударную волну. Многократно повторяющиеся удары разрушают поверхность обтекаемого тела. Такой *кавитационной эрозии* особенно подвержены гребные винты кораблей, лопасти гидротурбин и жидкостных насосов, подводные акустические излучатели.

С другой стороны, эффект кавитации широко используется в ряде технологических процессов (ультразвуковая очистка поверхности деталей, эмульгирование жидкостей, ускорение химических реакций и т. д.). Количественные проявления кипения и кавитации зависят не только от рода жидкости, температуры и давления, но и концентрации, а также состава заключенных в ней примесей.

Кипение и кавитация нарушают сплошность жидкости, не позволяя, строго говоря, рассматривать ее как однородную среду, с одинаковыми свойствами по всему объему, ограничивая тем самым область применения законов и зависимостей гидравлики.

## § 2.7. Другие физико-механические свойства и состояния жидкостей

Свойства жидкостей изменять свой объем (следовательно, и плотность) при изменении температуры называется *температурным расширением*.

Относительное изменение объема жидкости при соответствующем изменении температуры характеризуется *температурным коэффициентом объ-*

*емного расширения*

$$\beta_t = \frac{1}{W} \frac{dW}{dt^{\circ}}. \quad (2.11)$$

Этот коэффициент показывает изменение объема жидкости  $W$  при изменении температуры  $t$  на  $1^{\circ}\text{C}$ .

Ниже в качестве примера приводят средние значения температурного коэффициента объемного расширения  $\beta_t$ ,  $1/^{\circ}\text{C}$ , для некоторых жидкостей:

Вода	0,00021
Керосин	0,001
Нефть	0,0007
Ртуть	0,00018

*Теплоемкость жидкостей* — количество теплоты, необходимое для повышения температуры единицы массы жидкого тела на  $1^{\circ}\text{C}$  или  $1^{\circ}\text{K}$ .

Благодаря слабости сил межмолекулярного сцепления жидкости практически не воспринимают растягивающих нагрузок. Однако при определенных условиях, например, при попытке оторвать поршень от жидкости, заполняющей цилиндр, реакция жидкости на растяжение становится достаточно ощутимой.

Физическими опытами было показано, что покоящиеся жидкости, в частности, вода, ртуть и другие иногда способны сопротивляться очень большим *растягивающим усилиям*. Например, в особых условиях, не имеющих места в обыденной жизни (тщательно очищенная и дегазированная) вода кратковременно выдерживала напряжения растяжения до 28 МПа. Однако технически чистые жидкости, содержащие взвешенные твердые частицы и мельчайшие пузырьки газов, не выдерживают даже незначительных напряжений растяжения. Поэтому в дальнейшем мы будем считать, что в капельных жидкостях напряжения растяжения отсутствуют.

Выше говорилось о двухфазной системе «вода — пузырьки газа». При дви-

жении жидкости может иметь место присоединение к ней твердых тел, находящихся в жидкости во взвешенном состоянии, и образование двухфазной системы «жидкость — наносы», учет условий которой имеет немаловажное практическое значение.

Для жидкостей, используемых в качестве топлива, смазки, растворителей, теплоносителей, рабочих тел и других целей большое значение имеют и такие свойства, как *теплопроводность, преломление, химическая, механическая и радиационная стойкость, коррозионность* и другие, сведения о которых приводятся в специальных курсах гидравлики, справочниках и других пособиях.

## § 2.8. Особые свойства воды. Аномальные жидкости

Самое распространенное на Земле химическое соединение — вода — феномен природы. Ее свойства во многом резко отличны от подавляющего большинства других жидкостей.

Необычно, прежде всего, тепловое расширение воды. Практически все тела, в том числе и жидкие, при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. Вода также уменьшает свой объем при охлаждении от  $+100$  до  $+4$  °С. Однако в интервале температур от  $+4$  до  $0$  °С она при охлаждении не сжимается, а расширяется, имея, таким образом, наибольшую плотность при  $4$  °С. Жизнь в замерзающих зимой пресноводных бассейнах существует прежде всего благодаря этой особенности. Поверхностный слой, охлажденный до  $+4$  градусов, опускается на дно и уже никуда не перемещается, поскольку имеет наибольшую плотность. Дальнейшее охлаждение происходит на поверхности, с постепенным образованием ледяного покрова.

И тут своя особенность. За редким

исключением все вещества тонут в жидкостях, образующихся при их плавлении. У воды же в момент перехода в твердое состояние происходит резкое, примерно на 10 %, приращение объема и соответствующее уменьшение плотности. Поэтому лед плавает на поверхности воды и благодаря низкой теплопроводности предохраняет водоем от промерзания.

Вода имеет наибольшее из всех широко распространенных жидкостей поверхностное натяжение. Именно это отличие позволяет грунтовой воде подниматься вверх (от 0,6 до 4,5 м) по порам земли к корням растений.

У воды необычайно высокая скрытая теплота плавления, которая с повышением давления уменьшается, а не возрастает, как можно было ожидать, и аномальная дисперсия в области электрических (высокая диэлектрическая постоянная) и тепловых лучей.

Чрезвычайно велика по сравнению с другими телами удельная теплоемкость воды —  $C = 4200$  Дж/(кг·°С). В этой связи она весьма эффективна в качестве рабочего тела в системах водяного отопления и охлаждения. Кубометр воды открытых водоемов, охлаждаясь на один градус, нагревает за счет своего тепла три тысячи кубометров воздуха; именно поэтому теплые течения так активно смягчают климат планеты. Необычно и изменение теплоемкости воды. Как правило, теплоемкость тел по мере повышения их температуры возрастает. У воды же такой рост наблюдается при увеличении температуры в интервале  $+35...+100$  °С; при нагревании от  $0^\circ$  до  $+35$  °С теплоемкость воды падает.

Обычная вода — смесь 18 различных веществ (существует несколько водородов и кислорода, отличающихся атомными весами), соединения которых образуют более сотни разновидностей воды.

Вода меняет свои свойства под воздействием магнитного поля и растворении в ней солей. Например, у соленой морской воды, в отличие от воды пресной, плотность при охлаждении непрерывно повышается. Магнитная обработка воды снижает образование накипи, ускоряет твердение бетона, улучшает извлечение металлов из руд.

При конденсации воды в капиллярных кварцевых трубках образуется «сверхплотная» вода, удельная плотность которой достигает 1,4, а показатель преломления 1,49 (против 1,33 у обычной воды). Сверхплотная вода по консистенции напоминает вазелин, не растворяется в обычной воде, весьма стойка по структуре, кипит при температуре  $+300^{\circ}\text{C}$  и не замерзает при весьма низких температурах — до  $50^{\circ}\text{C}$ .

Вода, доведенная до граничной чистоты и подвергнутая давлению в 400 МПа в тонких (0,2—0,05 мм) стеклянных капиллярах, не замерзала и при охлаждении ниже  $70^{\circ}\text{C}$ , причем текала, оставаясь вязкой подобно пчелиному меду.

В природе кроме обычных, так называемых «*ньютоновских жидкостей*» существуют *аномальные* или «*неньютоновские жидкости*». К ним относятся некоторые смазочные масла, краски, суспензии, коллоидные растворы, жидкие полимеры. Их сопротивление при относительном перемещении слоев не отвечает гипотезе Ньютона и характеризуется наличием эффективной вязкости (жидкость приходит в движение после преодоления некоторого касательного напряжения, имеющегося в состоянии покоя). К числу аномальных (необычных, отклоняющихся от нормы) жидкостей относятся также феррожидкости, ферромагнитные, электрореологические, переохлажденные (типа смолы) жидкости.

И хотя последние классы жидкостей в обычном курсе гидравлики не изучаются, необходимо отметить, что они, об-

ладая многими специфическими и часто уникальными свойствами, с каждым днем находят все более широкое практическое применение.

Неньютоновские жидкие полимеры обладают, например, своеобразной «памятью». Пройдя через отверстие, они разбухают, выплескиваются из сосуда, как бы «припоминая» ранее проделанный путь. Будучи добавленными в воду, они своеобразно организуют прилегающий к стенкам трубы пограничный слой, упорядочивают поры, чем резко снижают сопротивление при движении. В результате при тех же напорах можно увеличить подачу жидкости к потребителю, ничего не изменяя в brandспойте увеличить дальность его действия и т. д. «Неньютоновские» жидкости открывают перспективу создания долговечных подшипников и решения ряда других практических вопросов.

*Феррожидкости* — жидкости, в которых взвешены магнитные частички размером в тысячные доли микрона. Тепловое движение частичек столь малого размера не позволяет им осесть на дно или слипнуться в комочки, обеспечивая стабильность состава и свойств.

Подобные жидкости были использованы, например, для уменьшения размеров и повышения электроакустических качеств громкоговорителей. Обладая большей теплопроводностью и вязкостью, чем воздух, они, помещенные в зазор между кольцевым магнитом и звуковой катушкой диффузора и удерживаемые магнитным полем, эффективно решили проблему теплоотведения и гашения вредных колебаний.

Вода, керосин, глицерин, если в них разместить мельчайшие частицы железа, никеля, кобальта, магнетита могут стать ферромагнитной жидкостью. Такие жидкости уже используются в качестве своеобразных магнитных весов. По силе магнитного напряжения, составляющего тот или иной материал

всплывать в подобной жидкости, можно определить его удельный вес. Это, в частности, позволяет взвешивать соединения, к которым нельзя прикасаться.

*Электрореологические жидкости* — довольно несложные композиции из жидкой фазы и диспергированных в ней ультрадисперсных частиц полимерной природы. Не отличаясь в обычных условиях от обычных жидкостей, они, будучи помещенными в электрическое поле, почти мгновенно переходят из жидкого в твердое агрегатное состояние. Снятие электрического поля сопровождается мгновенным обратным переходом из твердого в жидкое состояние. Способность принимать перед отверждением любую требуемую форму, позволяет использовать подобные жидкости в сложнопрофильных гидравлических системах, в том числе в робототехнике, авиационной и автомобильной технике, в принципиально новых системах сцепления, торможения, демпфирования.

## Глава 3. ГИДРОСТАТИКА

### § 3.1. Гидростатика и ее приложение. Силы, действующие на покоящуюся жидкость

*Гидростатика* — раздел гидравлики, в котором изучается равновесие жидкостей и воздействие покоящихся жидкостей на погруженные в них тела и поверхности, ограничивающие жидкости.

Одна из основных задач гидростатики — изучение распределения давления в жидкости и определение на этой основе сил, действующих со стороны жидкости на соприкасающиеся с ней твердые тела.

Знание законов гидростатики позволяет рассчитать силы, действующие на дно и стенки сосудов различной формы

Концентрированные ферромагнитные суспензии с успехом применяются для немеханического удержания заготовок в машиностроении. Окунув заготовку в такую жидкость и пропустив через нее электрический ток, ее можно накрепко соединить с подставкой и обрабатывать любыми способами.

#### Вопросы для самопроверки

1. Жидкости. Сходство и различие тел жидких и твердых.
2. Капельные и газообразные жидкости, их сходство и различие.
3. Плотность, удельный вес жидкости и связь между ними.
4. Динамическая и кинематическая вязкость жидкостей.
5. Какие явления возникают на границах жидкости и несмешивающихся с ней сред.
6. Понятие о кавитации, газонаполнении, кипении и испарении жидкости.
7. Сжимаемость, упругость, температурное расширение жидкостей.
8. Особые физические свойства воды.
9. «Неньютоновские» и аномальные жидкости, их особенности и перспективы практического использования.

и назначения (баки, емкости, цистерны), на поверхность плотины, шпунтовой стенки, подводной лодки, вывести условия плавания тел на поверхности и внутри жидкости. На законах гидростатики основано действие гидравлических подъемников, прессов и тормозов, жидкостных манометров и многих других машин, механизмов и приборов.

Жидкость, в том числе и однородная, представляет собой тело, состоящее из расположенных на некотором, хотя и весьма небольшом, расстоянии друг от друга молекул, то есть имеет, строго говоря, прерывную (дискретную) структуру. Однако при решении различных задач гидравлики мы пренебрегаем указанным обстоятельством и рассматриваем жидкость как сплошную (непре-