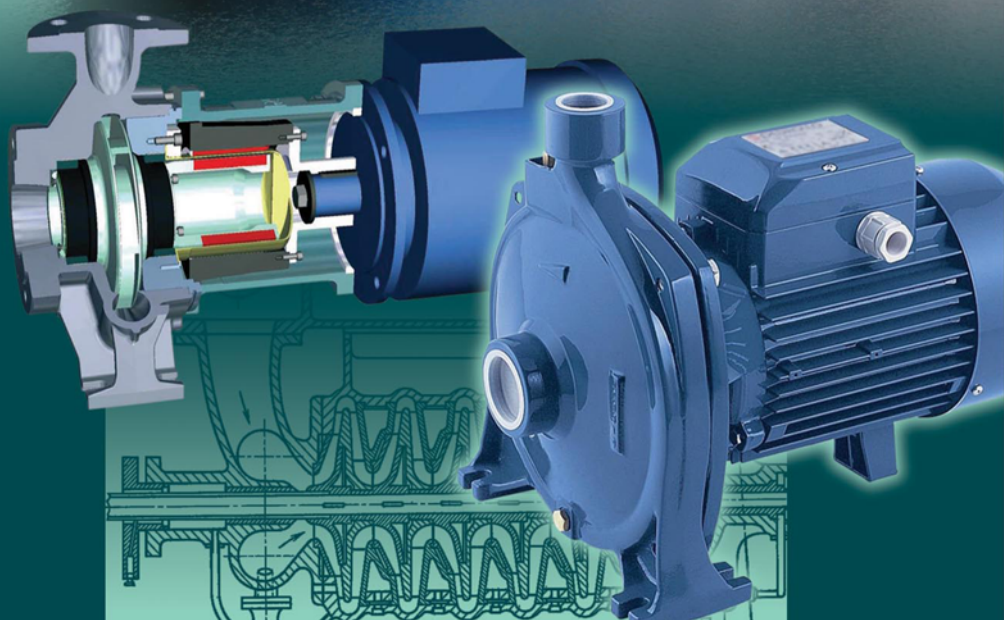




Д. В. Гроховский

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ГИДРОПРИВОД



Электронный аналог печатного издания: Гроховский, Д. В. Основы гидравлики и гидропривод: Учеб. пособие / Д. В. Гроховский. — СПб.: Политехника, 2011. — 236 с. : ил.

УДК 532.5
ББК 34.447
Г86



ПОЛИТЕХНИКА
ИЗДАТЕЛЬСТВО
Санкт-Петербург 2012

www.polytechnics.ru

Рецензенты: **В. К. Ломоть**, заведующий кафедрой механики и гидравлики, доктор технических наук, профессор;
А. Ш. Ачкинадзе, заведующий кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики СПбГМТУ, доктор технических наук, профессор

Гроховский, Д. В.
Г86 Основы гидравлики и гидропривод: Учеб. пособие / Д. В. Гроховский. — СПб.: Политехника, 2012. — 236 с. : ил.

ISBN 978-5-7325-0962-5

Учебное пособие по программе курса «Гидравлика» для студентов машиностроительных и механических специальностей высших технических учебных заведений России призвано заложить основу конструкторской подготовки специалистов в области гидравлических машин и гидропривода.

Изложены теоретические основы расчета и проектирования гидравлических систем, узлов и деталей гидропривода. Содержатся сведения о жидкостях и их свойствах, а также о гидромашинах, особенностях их устройства, работы, условиях применения и эксплуатации.

УДК 532.5
ББК 34.447

© Д. В. Гроховский, 2011
© Издательство «Политехника»,
лит. обработка, оригинал-макет,
2012

ISBN 978-5-7325-0962-5

О Г Л А В Л Е Н И Е

Часть 1. Основы гидравлики	7
Глава 1. Основные свойства жидкостей	7
1.1. Определение гидравлики как науки и ее задачи	7
1.2. Краткие исторические сведения	8
1.3. Понятие о жидкости и ее основных физических и механических (феноменологических) свойствах	10
1.4. Краткая характеристика типовых жидкостей, применяемых в технике	22
Контрольные вопросы	24
Глава 2. Статика жидкости	24
2.1. Силы, действующие на жидкость в состоянии покоя	24
2.2. Гидростатическое давление и его свойства	26
2.2.1. Вертикально движущийся с постоянным ускорением j сосуд (31). 2.2.2. Горизонтально движущийся с постоянным ускорением j сосуд (31). 2.2.3. Цилиндр, вращающийся вокруг своей вертикальной оси (32).	
2.3. Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля. Сообщающиеся сосуды	32
2.3.1. Основное уравнение гидростатики (32). 2.3.2. Закон Паскаля (34). 2.3.3. Сообщающиеся сосуды (34).	
Контрольные вопросы	37
Глава 3. Статика твердого тела, погруженного в жидкость	37
3.1. Гидростатическая подъемная сила	37
3.2. Плаучесть и остойчивость тел	41
3.3. Понятия о метацентре и метацентрической высоте	43
Контрольные вопросы	50
Глава 4. Физико-технические приложения основного уравнения гидростатики	50
4.1. Виды гидростатического давления	50
4.2. Давление жидкости на ограждающие поверхности (стенки)	51
4.3. Сила гидростатического давления на цилиндрические (криволинейные) поверхности	56
4.4. Расчет трубопроводов на гидростатическое давление	58
Контрольные вопросы	59
Глава 5. Техническая гидродинамика, ее задачи и методы	59
5.1. Основные понятия и параметры, характеризующие движение жидкости	59
5.1.1. Основные понятия кинематики жидкости (59). 5.1.2. Основные параметры кинематики жидкости (64).	

5.2. Режимы напорного движения вязкой жидкости	65
5.2.1. Основные понятия (65). 5.2.2. Сопоставление параметров движения ламинарного и турбулентного потоков в круглой трубе (67).	
5.3. Уравнение непрерывности потока	68
Контрольные вопросы	70
Глава 6. Основы теории гидродинамического подобия	70
6.1. Критерии гидродинамического подобия	70
6.2. Режимы движения вязкой жидкости	73
6.3. Уравнение движения реальной жидкости (уравнение Бернулли)	75
6.3.1. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости (75). 6.3.2. Уравнение Бернулли для элементарной струйки реальной (вязкой) жидкости (76). 6.3.3. Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости (77).	
6.4. Геометрическая, энергетическая и механическая интерпретации уравнения Бернулли	78
Контрольные вопросы	81
Глава 7. Движение жидкости в трубах	81
7.1. Виды сопротивлений при движении жидкости в трубах	81
7.1.1. Распределенные (путевые) потери напора (81). 7.1.2. Сосредоточенные (местные) потери напора (86).	
7.2. Расчет диаметра трубопровода	91
7.3. Гидравлический удар в трубопроводе	93
Контрольные вопросы	97
Глава 8. Физико-технические приложения закономерностей движения жидкости в трубах	97
8.1. Гидравлический таран	97
8.2. Виды трубопроводов	100
8.3. Особенности расчета трубопроводных сетей	101
8.3.1. Простой трубопровод (104). 8.3.2. Сложный трубопровод (104). 8.3.3. Сложный трубопровод с параллельным соединением отдельных участков (104). 8.3.4. Кольцевой трубопровод (105). 8.3.5. Сифонный трубопровод (105).	
8.4. Приборы для измерения расхода жидкости	108
Контрольные вопросы	111
Глава 9. Истечение жидкости из отверстий и насадков	111
9.1. Истечение жидкости из отверстий	111
9.1.1. Виды отверстий и их характеристики (111). 9.1.2. Расчет скорости истечения и расхода жидкости из отверстия (113).	

9.2. Истечение жидкости из насадков	116
9.2.1. Типы насадков и их характеристики (116). 9.2.2. Расчет расхода и скорости истечения жидкости из насадков (117).	
Контрольные вопросы	119
Глава 10. Общие теоремы динамики сплошной среды	120
10.1. Уравнение динамики «в напряжениях»	120
10.2. Уравнение Навье—Стокса	123
10.2.1. Вывод уравнений Навье—Стокса на основе уравнений Эйлера (123). 10.2.2. Вывод уравнений Навье—Стокса на основе сочетания уравнений динамики сплошной среды «в напряжениях» и уравнения непрерывности потока (127).	
Контрольные вопросы	133
Часть 2. ГИДРОПРИВОД	134
Глава 11. Общие сведения о гидравлических машинах и гидроприводе	134
11.1. Классификация гидромашин	134
11.2. Основные параметры и область применения гидромашин	135
11.2.1. Объемная подача (136). 11.2.2. Напор насоса (136). 11.2.3. Потребляемая мощность (137). 11.2.4. Максимальный кавитационный запас (138). 11.2.5. Использование гидромашин и гидропривода в технике (138).	
11.3. Сравнительная характеристика механического и гидравлического приводов	140
11.4. Специальные гидромшины	142
11.4.1. Струйный насос (142). 11.4.2. Эрлифт (144).	
Контрольные вопросы	145
Глава 12. Объемные гидромшины (насосы и двигатели)	146
12.1. Классификация, принцип работы и общие свойства	146
12.1.1. Объемные насосы (146). 12.1.2. Объемные гидродвигатели (147).	
12.2. Объемные гидромшины с возвратно-поступательным движением рабочего органа	148
12.2.1. Поршневые насосы и двигатели (148). 12.2.2. Неравномерность подачи насоса (151). 12.2.3. Применение поршневых насосов в технике (152). 12.2.4. Диафрагмовые (мембранные) насосы (155). 12.2.5. Кавитация (156).	
12.3. Объемные гидромшины с ограниченным вращательным перемещением рабочего органа (поворотные насосы и двигатели)	159
12.3.1. Поворотный гидродвигатель пластинчатого типа (160). 12.3.2. Объемные гидромшины с вращательным движением рабочего органа (160).	

Контрольные вопросы	169
Глава 13. Объемный гидропривод	169
13.1. Основные понятия, назначение и классификация	169
13.2. Способы регулирования	173
13.2.1. Объемное регулирование (173). 13.2.2. Дроссельное регулирование (175). 13.2.3. Конструктивные особенности дросселей (177).	
13.3. Следящий гидропривод	177
13.4. Объемные гидроприводы и способы их регулирования в различных технических системах, включая системы жизнеобеспечения боевых машин	179
Контрольные вопросы	180
Глава 14. Динамические гидромашины (насосы и турбины)	181
14.1. Классификация и принцип работы	181
14.2. Центробежные насосы	183
14.2.1. Устройство и принцип работы (183). 14.2.2. Конструктивные особенности (185). 14.2.3. Виброактивность (188). 14.2.4. Коэффициент быстроходности (190). 14.2.5. Основное уравнение лопастного (центробежного) насоса (192). 14.2.6. Основные соотношения рабочих параметров (196). 14.2.7. Регулирование параметров (198). 14.2.8. Применение в различных областях техники (199).	
14.3. Вихревые насосы	201
14.4. Осевые насосы	203
14.4.1. Конструкция и принцип работы (203). 14.4.2. Основные параметры (205).	
Контрольные вопросы	207
Глава 15. Динамическая гидропередача	208
15.1. Принцип работы	208
15.2. Виды динамических гидропередач, их достоинства и недостатки	208
15.2.1. Динамическая гидромурфта (209). 15.2.2. Динамический гидротрансформатор (ДГТ) (215).	
Контрольные вопросы	221
Глава 16. Взаимодействие твердого тела с жидкостью	221
16.1. Система сил, действующих на плавающее тело	221
16.2. Мероприятия по снижению сил сопротивления движению тела	222
Заключение	225
Приложение	226
Рекомендуемая литература	236

Часть 1

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ

Глава 1

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИКИ КАК НАУКИ И ЕЕ ЗАДАЧИ

Гидравлика — прикладная наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей и разрабатывающая способы практического приложения этих законов к решению инженерных задач.

Различие между гидравликой и гидромеханикой как двух отраслями научных знаний заключается в том, что в первом случае используется экспериментально-теоретический метод исследований, а во втором — строгий математический, базирующийся, как правило, на решении точных или приближенных дифференциальных уравнений. В настоящее время благодаря практически неограниченным возможностям вычислительной техники гидравлика и гидромеханика соединяются в единую науку о жидкостях, которую, если говорить достаточно строго, необходимо называть одним более общим термином — механикой жидкости и газа (МЖГ).

Однако, учитывая ограниченность учебных задач изучаемого раздела, будем употреблять более узкий термин — *гидравлика*, тем более что далее будут встречаться производные этого слова: гидравлические машины, гидравлический удар, гидропривод, гидропередача и др.

Предметом гидравлики служит модель сплошной деформируемой среды, обладающей, в отличие от упругого тела, неограниченной деформацией — текучестью.

История гидравлики насчитывает сотни имен выдающихся ученых, внесших важный вклад в развитие и становление гидравлики как науки.

1.2. КРАТКИЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Первым шагом в использовании гидравлики стало копанье простейших канав, превратившихся со временем в оросительные системы (иригационные сети). Люди на практике использовали закон сообщающихся сосудов, даже не подозревая о существовании столь сложного закона. Раннее Средневековье (VI и VII века нашей эры) узнало водяное колесо. Привод водяного колеса вначале осуществлялся человеком (с помощью ворота), потом стали использовать животных и, наконец, силу текущей воды. В XI веке водяное колесо стало применяться в сукновальном и кузнечном производствах, мелиорации, в XIII веке — на лесопилках и бумагоделательных фабриках, а в XIV веке — при дроблении руд, волочении проволоки, растирании красок, в приводе станков. При этом оказалось, что лошадь в усовершенствованной упряжи заменяла работу 10 человек, а хорошее водяное колесо — 100 человек.

В это же время ученые стран Ближнего Востока и Испании продолжили античные исследования. Так, араб *аль-Гаццини* дал объяснение функционированию артезианских колодцев, связанному с принципом сообщающихся сосудов, совместно с *аль-Бируни* уточнил ряд понятий физики (плотность жидких и твердых тел, влияние температуры на эту характеристику и др.). В середине XVI века *Тарталья* публикует трактат по гидростатике, приводит таблицу плотностей различных минералов и предлагает способ подъема затонувших судов.

Здесь необходимо отметить, что именно Тарталья назвал возникновение подъемной гидростатической силы «законом Архимеда», механика и математика, который родился в Сиракузах, на острове Сицилия. *Архимеду* приписывают согласно легенде создание новых военных и многих других (до 40) машин, изобретение водоподъемного винта, формулировку закона его имени, усовершенствование зубчатого колеса и множество других чудес. Однако, когда через 137 лет после гибели Архимеда в Сиракузы приехал квестор Цицерон, он не смог убедить местных жителей в том, что у них жил такой выдающийся меха-

ник. Ему пришлось лично разыскать и указать неблагодарным потомкам могилу гения — достойное завершение сказок и легенд об Архимеде. Добавим, что имя Архимеда до XV века не было широко известно.

Работу Тартальи продолжил *Леонардо да Винчи*, изучавший закономерности течения жидкости в каналах, возникновение наносов на дне рек, исследовавший водосливы и причины появления волн и вихрей. Он предположил существование закона сообщающихся сосудов и описал парадокс равенства давления на дно сосудов различной формы. В дальнейшем эти результаты были обобщены *Паскалем* и *Торричелли* и получили известность под их именами.

Стевину, инспектору плотин Голландии, принадлежит заслуга формулировки важнейших законов гидростатики, теории гидростатического давления и положений, связанных с определением устойчивости судов. В 1632 г. *Галилей* изложил теорию, доказывающую равновесие жидкости в сообщающихся сосудах и равновесие плавающего на воде тела. Его ученик, *Кастелли*, рассмотрел вопрос о влиянии поперечного сечения русла канала на скорость движения воды в нем.

В 1644 г. Торричелли вывел формулу для расчета скорости истечения водяной струи из отверстия сосуда, что было крайне важно для создания водяных часов. В том же году Паскаль показал сущность принципа передачи давления в сообщающихся сосудах, продвинув вперед известную ранее теорию.

Отметим, что в 1791 г. Калмыковым была издана «Карманная книжка для вычисления количества воды, протекающей через трубы, отверстия или по желобам, а также силы, с какой воды ударяют, стремясь с данной скоростью, с приложением правил для вычисления трений, производимых в машинах». В начале XX века мировую известность получили работы *Н. Е. Жуковского* по теории гидравлического удара, теории крыла в воздушном потоке (знаменитые профили крыльев НЕЖ, названные так в честь ученого), теории фильтрации грунтовых вод и др.

Можно гордиться тем, что в России уже в XVIII веке велось большое строительство, связанное с водным хозяй-

ством (водопроводные системы, плотины, каналы, шлюзы и т. п.), например: Вышневолоцкая система соединения Волги с Балтийским морем (проект Сердюкова), водные системы соединения Азовского с Каспийским морем, Северной Двины с Камой, Западной Двины с Днепром, а также инженерные сооружения фонтанов Петергофа (пригород Санкт-Петербурга). На Алтае мастеровым Фроловым была построена плотина высотой 18 м с подземным водяным колесом диаметром 17 м (!).

К сожалению, творческая мысль русских умельцев и просто талантливых людей была реализована в советское время жутким, бесчеловечным способом: рабским трудом сотен тысяч политзаключенных были построены с помощью лишь лопат и тачек самые длинные в мире каналы — Беломорско-Балтийский канал им. Сталина (длина 227 км, причем собственно канал имел длину 37 км, остальное — водный путь) и канал имени Москвы (длина 128 км), причем первый оказался малопригодным для судоходства из-за малых глубины и ширины. На его строительстве, продолжавшемся всего 18 месяцев, погибло 250 тыс. человек (по официальным данным — 12,5 тысяч) от невыносимых, точнее каторжных, условий работы.

Для сравнения укажем, что Суэцкий канал длиной 161 км (без шлюзов) строился 10 лет, Панамский — 28 лет (при длине 81,6 км).

Несмотря на длительную историю, гидравлика и по сей день развивается: продолжают исследования в области теории удара тел о свободную поверхность, теории гидродинамической смазки, проблем распространения ударных волн в жидкости и газе и др. Над каждой из них работают десятки ученых во всем мире.

1.3. ПОНЯТИЕ О ЖИДКОСТИ И ЕЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ (ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ) СВОЙСТВАХ

В современной технической литературе физические и механические свойства тел объединяются одним термином — феноменологические свойства.

Все материальные тела независимо от их агрегатного состояния (твердого, жидкого, газообразного, плазменного) обладают внутренней молекулярной структурой с характерным внутренним тепловым микроскопическим движением молекул, являющимся причиной наблюдаемых макроскопических процессов.

В связи с этим жидкостью называется физическое тело, силы сцепления между отдельными частицами которого незначительны, что обеспечивает им большую подвижность и легкость перемещения относительно друг друга.

Последнее свойство обеспечивает неопределенность формы жидкости, растекающейся по всем направлениям и принимающей форму сосуда, в котором она находится, что и демонстрирует ее текучесть.

Жидкости подразделяются на *капельные* (малосжимаемые), способные в незначительных объемах сохранять форму капли, и *газообразные* (сжимаемые), стремящиеся заполнить весь возможный объем. Для жидких и газообразных сред характерно отсутствие определенной формы даже в состоянии покоя, при этом жидкость занимает только часть ограждаемого объема, так что одной из ее границ является так называемая свободная поверхность.

Непосредственно в гидравлике рассматриваются только капельные и (более строго) ньютоновские жидкости, законы их равновесия и движения. Другими жидкостями занимается общая наука о текучести сред — реология.

Из приведенных определений следует, что для жидкости характерны два достаточно общих свойства: *сплошность* и *текучесть*, в результате чего ее физические характеристики носят непрерывный характер, то есть скорость движения, давление, плотность и прочие параметры являются непрерывными функциями координат и времени, образуя поля соответствующих величин.

При рассмотрении задач механики жидкости существенными являются основные параметры: плотность и вязкость; в некоторых случаях (например, при течении тонких струй, образовании капель, капиллярных волн и др.) имеет значение и поверхностное натяжение жидкости.

Дадим определения введенным понятиям.

Плотность ρ — это физическая величина, измеряемая количеством массы M в единице объема V :

$$\rho = M/V \text{ [кг/м}^3\text{]}. \quad (1.1)$$

Для дистиллированной воды при температуре $T = 4$ °С и нормальном давлении ($p = 0,98$ МПа) величина $\rho_w = 1000$ кг/м³; для воздуха при тех же условиях величина $\rho_a = 1,2$ кг/м³, или примерно в 800 раз меньше; для керосина — $\rho_k = 790$ кг/м³; для индустриального масла (при 4 °С) — $\rho_m = 880...910$ кг/м³. Измерение плотности жидкости производится плотномерами поплавкового типа (ареометрами), основанными на законе гидростатики.

Между плотностью ρ и объемным весом γ существует простое соотношение:

$$\gamma = \rho g, \quad (1.2)$$

где g — ускорение свободного падения.

Вязкость, или *внутреннее трение* — это свойство среды оказывать сопротивление перемещениям частиц по отношению друг к другу, то есть оказывать сопротивление деформации объема. При этом изменение форм элементов среды при движении и относительные смещения частиц сопровождаются возникновением сдвигающих усилий, которые проявляются только при различных скоростях движения соседних частиц, то есть при наличии относительных скоростей движения. Очевидно, что в покоящихся жидкостях силы вязкости не проявляются. Именно этим обстоятельством объясняется возможность подтягивания к причалу даже крупных судов усилием одного человека.

Количественно вязкость определяется значением динамического коэффициента μ вязкости или кинематического коэффициента ν вязкости, связанного с величиной μ зависимостью:

$$\mu = \rho \nu. \quad (1.3)$$

По своему физическому смыслу величина ν представляет собой отношение сил вязкости к силам инерции, а величину, равную μ^{-1} , нередко называют *текучестью*.

Здесь необходимо отметить, что, несмотря на наличие международных стандартов на единицы физических величин, в отечественной литературе по-прежнему встречаются выражения типа «кинематическая вязкость» и «динамическая вязкость», что методологически неверно, ибо невозможно дать физическое истолкование этим понятиям. Кроме того, определение вязкости как внутреннего трения дает возможность определить силу внутреннего трения (сопротивления), аналогично силе трения твердых тел при их относительном скольжении по поверхностям друг друга. Но для твердых тел существует коэффициент трения — аналогично для жидкостей существуют коэффициенты вязкости: кинематический и динамический, причем динамический коэффициент вязкости учитывает физические свойства среды (ее плотность), а кинематический коэффициент вязкости характеризует параметры движения тела в жидкости.

В то же время согласно отечественному ГОСТ 33–2000 (ИСО 3104–94) (введен в действие в 2002 г.) введено понятие «кинематическая вязкость», которая определяется как **сопротивление жидкости течению под действием гравитации**. Также введено понятие «динамическая вязкость», которая определяется как **отношение применяемого напряжения сдвига к скорости сдвига жидкости**. Иногда это отношение называют коэффициентом динамической вязкости или просто вязкостью. Таким образом, **динамическая вязкость является мерой сопротивления истечению или деформации жидкости**. Упомянутый ГОСТ 33–2000 устанавливает метод определения кинематической вязкости жидких нефтепродуктов, прозрачных и непрозрачных жидкостей измерением времени истечения определенного объема жидкости под действием силы тяжести через комбинированный стеклянный капиллярный вискозиметр. Поэтому в дальнейшем будем пользоваться терминами ГОСТ 33–2000.

Понятие вязкости иллюстрируется следующим образом. Пусть жидкость течет вдоль плоской стенки параллельными ей слоями (рис. 1). Вследствие тормозящего влияния стенки слои жидкости будут двигаться с разными скоростями, значения которых возрастают по мере удаления от стенки.

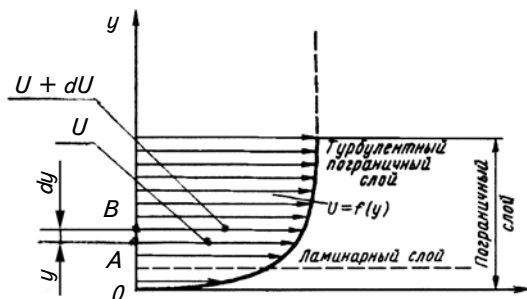


Рис. 1. Движение вязкой жидкости вблизи твердой стенки

Рассмотрим два слоя жидкости A и B , двигающиеся на расстоянии dy друг от друга с соответствующими скоростями U и $U + dU$. Из-за разности скоростей (вполне очевидного явления) слой B переместится относительно слоя A за единицу времени на величину ΔU (абсолютный сдвиг слоев жидкости), тогда величина dU/dy есть относительный сдвиг, или градиент скорости по нормали к вектору скорости (иногда используется обозначение dU/dn , где n — направление нормали).

По контактными поверхностям между слоями возникнут силы трения, которые, будучи отнесенными к площади соприкосновения слоев, называются касательными напряжениями τ .

Тогда, аналогично явлению сдвига в твердых телах, можно записать следующую зависимость между напряжением и деформацией:

$$\tau = \mu dU/dy = \mu dU/dn. \quad (1.4)$$

Выражение (1.4) есть закон трения Ньютона, или реологическое уравнение Ньютона, которое гласит:

при прямолинейном слоистом движении сила внутреннего трения прямо пропорциональна относительной скорости движения слоев (dU) и площади их соприкосновения, зависит от физических свойств жидкости и не зависит от давления.

Закон трения Ньютона справедлив для многих однородных сред (таких, как вода, воздух, бензин и др.), которые поэтому называют ньютоновскими жидкостями. Для ано-

мальных жидкостей, то есть не подчиняющихся закону трения Ньютона (например, для глинистых растворов, жидкого бетона, масляных красок, коллоидов, суспензий и др.), касательные напряжения описываются законом Шведова—Бингема в виде:

$$\tau = \tau_0 + \mu dU/dy,$$

где τ_0 — начальное напряжение сдвига.

Аномальные, или бингемовские, жидкости отличаются от ньютоновских жидкостей тем, что их вязкость не является постоянной, а зависит от градиента скорости. В этом суть «засасывания» тела в болото, особенно при его активном движении.

Кинематический коэффициент вязкости ν , или кинематическая вязкость (ГОСТ 33–2000), измеряется в $\text{м}^2/\text{с}$, то есть в единицах параметров движения тела, поэтому и называется кинематическим коэффициентом вязкости; динамический коэффициент вязкости μ измеряется в $\text{Па} \times \text{с}$. (В старых учебниках и пособиях, а также в технических руководствах величина μ указывалась в пуазах (П) — в честь французского врача Пуазейля, изучавшего движение крови в сосудах. Между старой и новой единицами существует соотношение $1 \text{ Па} \times \text{с} = 10 \text{ П}$, то есть в нем присутствует размерность силы, поэтому он и назван динамическим).

Отметим, что до введения системы измерений СИ величина ν измерялась в стоксах (Ст) — в честь английского ученого Стокса, изучавшего законы гидродинамики, при этом $1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^4 \text{ сСт}$, или $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$.

Вязкость жидкостей измеряют с помощью специальных приборов — вискозиметров различных отечественных и зарубежных конструкций, которых насчитывается более двух десятков, разделенных на три типа: **А** — вискозиметры для прозрачных жидкостей, **Б** — вискозиметры с висячим уровнем и **В** — вискозиметры для прозрачных и непрозрачных жидкостей. В России наибольшее распространение получили вискозиметры Пинкевича типа ВПЖ-1, ВПЖ-2, ВПЖ-4, ВПЖТ-1, ВПЖТ-2, ВПЖТ-4 и др. (ГОСТ 10028), суть работы которых заключается в измерении

калиброванным стеклянным вискозиметром времени истечения (в секундах) определенного объема жидкости под влиянием силы тяжести при постоянной температуре. Кинематическая вязкость является произведением измеренного времени T истечения (в секундах) на постоянную C ($\text{см}^2/\text{с}^2$) вискозиметра:

$$\nu = CT. \quad (1.5)$$

Согласно основному требованию к вискозиметрам различных конструкций, минимальное время истечения должно быть более 200 с. В противном случае вводятся различные поправки, в частности на кинетическую энергию. Более подробно — см.: Инженерный журнал. 2003. № 7. С. 7–11.

Для сравнения укажем, что кинематическая вязкость для воды (при нормальных условиях) $\nu_w = 0,01 \text{ см}^2/\text{с} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и для воздуха $\nu_a = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, то есть в 15 раз больше, что объясняется меньшей плотностью воздуха.

Помимо сдвиговой вязкости, о которой шла речь ранее, существует и **объемная вязкость**, которая проявляется во время объемной деформации среды с большими скоростями в виде возрастания диссипации механической энергии. При этом релаксационные процессы, вызванные как сдвигом слоев среды, так и ее объемной деформацией, имеют одинаковую природу, в связи с чем влияние температуры и давления на оба вида вязкости подчиняются близким закономерностям. Объемная вязкость значительно отличается от динамической вязкости различных жидкостей. Так, для воды при 15 °С объемная вязкость превосходит динамическую вязкость в 2,81 раза, для минерального масла — в 1,33 раза, а для глицерина — всего в 1,03 раза (при температуре 14 °С).

Различные условия нахождения молекул жидкости внутри объема и на поверхности контакта с другой жидкостью обуславливают то обстоятельство, что энергия молекул на поверхности жидкости отличается от энергии молекул в объеме жидкости на некоторую величину, называемую поверхностной энергией $E_{\text{п}}$, которая пропорциональна площади S поверхности раздела сред:

$$E_{\Pi} = \sigma S, \quad (1.6)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения,

$$\sigma = -P/l, \text{ или } \sigma = E_{\Pi}/S,$$

где P — сила поверхностного натяжения; l — длина линии раздела сред.

Укажем, что для границы раздела сред вода—воздух коэффициент поверхностного натяжения $\sigma_{wa} = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/м}^2$ при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (в некоторых пособиях коэффициент поверхностного натяжения для воды указывается в других величинах — $7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$).

Влиянием поверхностного натяжения обычно пренебрегают, однако в трубках малого диаметра этого делать нельзя. В узких сосудах жидкость поднимается на высоту h , равную

$$h = 2\sigma/(\rho gr),$$

где r — радиус капилляра.

Более точная формула учитывает смачиваемость поверхности введением в формулу $\cos \theta$, где угол $\theta \leq 90^\circ$ — для смачиваемой поверхности и 150° для несмачиваемой твердой стенки.

Способность жидкости подниматься или опускаться в окрестностях твердой стенки называется капиллярностью.

Поверхностное натяжение жидкости чувствительно к чистоте и температуре жидкости, причем существуют вещества, способные уменьшить это натяжение. Они называются поверхностно-активными веществами (ПАВ). К ним относятся масла, жиры и нефтепродукты. Они понижают поверхностное натяжение воды и стремятся растечься по ее поверхности как можно шире, быстро образуя на воде очень тонкие пленки. Наблюдения показывают, что медленно стекающий в воду жир (примерно литр в час) способен умирять волны вокруг судна в радиусе до десяти метров и даже больше, чем и пользовались в старину моряки парусных судов.

Наличие поверхностного натяжения жидкости объясняет явление смачивания жидкостью твердых поверхностей,

подъем жидкости в узких и тонких сосудах (капиллярах), наличие мениска в сосудах (мениск — выпуклая или вогнутая поверхность жидкости в капиллярах или между близко расположенными твердыми стенками), вязкость газов и др.

Деформативность жидкости может быть оценена изменением плотности и вязкости при воздействии внешнего давления и температуры. Сжимаемость капельных жидкостей под действием давления характеризуется коэффициентом $\beta_{\text{сж}}$ объемного сжатия, который представляет собой относительное изменение объема жидкости на единицу изменения давления Δp :

$$\beta_{\text{сж}} = -\Delta V / (\Delta p V), \quad (1.7)$$

где V — первоначальный объем жидкости; ΔV — изменение объема при увеличении давления, причем знак минус обусловлен тем, что положительному приращению давления соответствует отрицательное приращение (уменьшение) объема жидкости.

Величина $E_0 = 1/\beta_{\text{сж}}$ называется модулем объемной упругости жидкости. Для воды величина $E_0 = 2$ ГПа.

Отметим, что величина $\beta_{\text{сж}}$ мало меняется с изменением давления и температуры: так, при увеличении давления на 10 МПа уменьшение первоначального объема может составлять для воды всего 0,5 %, для масел — 0,68 %. Из приведенных данных следует, что сжимаемость жидкостей незначительна, и в обычных гидравлических расчетах жидкости считаются несжимаемыми. Однако в отдельных случаях сжимаемость жидкостей определяет работу соответствующих устройств и ее необходимо учитывать. Например, в гидравлических амортизаторах шасси самолетов (при посадке последних) и гидравлических подвесках тяжелых машин, как правило, типа танков (при их движении по пересеченной местности с повышенной скоростью) возникают давления до 500 МПа. Это приводит к существенному уменьшению первоначального объема рабочей жидкости. В случае применения минерального масла уменьшение объема достигает 17 % от номинальной величины.

В соответствии с изменением объема жидкости может быть записано изменение плотности жидкости в виде зависимости:

$$\rho_p = \rho_0(1 - \beta_{сж}\Delta p)^{-1}. \quad (1.8)$$

Так как модуль объемной упругости зависит от температуры, увеличиваясь пропорционально ей, то температурное расширение капельных жидкостей характеризуется коэффициентом β_t температурного расширения, выражающим относительное увеличение объема жидкости при увеличении температуры на один градус:

$$\beta_t = \Delta V/(\Delta TV), \quad (1.9)$$

где ΔT — относительное изменение температуры.

Величина β_t зависит от температуры и давления при расширении. Например, для воды при $p = 50$ МПа и $\Delta T = 96$ °С величина β_t изменяется в 50 раз. Однако для обычных условий принимается условие $\beta_t = \text{const}$.

В основном от температуры сильно зависит лишь вязкость жидкости и в меньшей степени — плотность. Так, для воды кинематическая вязкость при изменении температуры от 0 до 100 °С уменьшается в 7 раз; для смазочного масла — в 6...30 раз. В то же время вода становится твердым телом при следующих условиях: $T = 20$ °С и $p = 840$ МПа; впрочем, вода переходит в твердую фазу и при нулевой температуре.

Зависимость величины v_t от температуры T описывается следующими формулами Пуазейля для воды и масел соответственно:

$$v_t^w = 1,78 \cdot 10^{-2} / (1 + 3,37 \cdot 10^{-2}T + 2,21 \cdot 10^{-4}T^2); \quad (1.10)$$

$$v_t^M = v_{50}^M (50/T)^n, \quad (1.11)$$

где v_{50}^M — кинематическая вязкость при $T = 50$ °С, а $n = 1,4...2,6$ в интервале температур $T = 30...150$ °С.

С увеличением давления вязкость жидкостей возрастает, например: при $p = 7$ МПа вязкость увеличивается на 20...25 %, при $p = 60$ МПа — на 250...350 %, при $p = 200...300$ МПа — в несколько сотен раз. Для газов в области умеренных давлений вязкость остается практически постоянной.

Необходимо отметить, что физико-механические свойства жидкостей изменяются под действием различного рода облучений.

Поэтому под радиационной стойкостью жидкости понимается ее способность сохранять свои свойства при действии ядерного излучения, хотя изменения вязкости и других параметров жидкости могут быть существенными.

При продолжительном облучении возможно заметное на глаз потемнение жидкостей: бесцветные смазочные жидкости получают светло-желтую окраску, смазочные масла становятся красно-коричневыми. При повышенных дозах облучения увеличивается вязкость минеральных масел, переходящих в гелеобразное состояние с одновременным изменением испаряемости в несколько раз. При облучении понижается температура вспышки, существенно снижаются антикоррозионные свойства масел, особенно при наличии присадок; а наличие серы в масле увеличивает наведенную радиоактивность и т. п.

Почти все жидкости, как и металлы, электропроводны, что требует соблюдения особых мер предосторожности и правил техники безопасности при обслуживании электроагрегатов корабельных систем и бронетехники. Кроме того, некоторые жидкости изменяют свои свойства при воздействии магнитных полей, что используется в медицине, а также в атомной энергетике.

Несмотря на малую зависимость плотности жидкости от давления, все жидкие среды являются упругими телами. Вызванное какой-либо причиной местное нарушение плотности или давления передается во все точки объема жидкости в виде упругого возмущения. При так называемых малых возмущениях скорость их распространения равна скорости звука в данной среде и определяется по формуле:

$$C = (E_0/\rho)^{0,5}. \quad (1.12)$$

Полезно запомнить, что скорость звука в воздухе C_a (процесс его распространения считается адиабатическим из-за быстротечности) составляет $C_a = 342$ м/с, в воде — $C_w = 1435$ м/с, в металлах — $C_m = 4200$ м/с.

Рассмотрим еще одну особенность жидкости. Речь пойдет о так называемой идеальной жидкости.

Все жидкости в природе в той или иной мере вязкие, или, как их называют, реальные. Уже отмечалось, что вязкость жидкости проявляется только в движении, при наличии относительных скоростей движения частиц или слоев жидкости. В покое отмеченные относительные скорости отсутствуют и вязкость вообще не проявляется.

В различных исследованиях пользуются условным понятием идеальная жидкость, под которой понимают некоторую абстрактную жидкость, полностью лишенную вязкости. При этом предполагают также полное отсутствие сил сцепления между частицами жидкости и пренебрегают теплопроводностью.

Идеальная (или совершенная) жидкость не может оказывать сопротивление растягивающим силам и в какой-либо мере сохранять свою форму, то есть является абсолютно текучей. В литературе понятие идеальная жидкость применяют к капельным жидкостям.

Во многих задачах жидкость считают также и несжимаемой, то есть пренебрегают изменениями объема от воздействия давления и температуры. Получаемые с учетом указанных упрощений и предположений результаты часто удовлетворяют практическим потребностям, что служит обоснованием использования понятия «идеальная жидкость».

Реальные жидкости в зависимости от вязкости делятся на легкоподвижные (вода, керосин и др.) и малоподвижные (смолы, консистентные смазки и т. п.). При этом легкоподвижные жидкости могут быть однородными, то есть иметь постоянную плотность в любой точке.

Кривые, соединяющие точки объема жидкости с одинаковой плотностью, называются изотостерами.

В гидравлике рассматриваются только легкоподвижные однородные жидкости. Двух- и многофазные жидкости, а также жидкости с переменной плотностью рассматриваются в специальных курсах.

1.4. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТИПОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТЕХНИКЕ

В различных областях техники применяются следующие жидкости.

Вода — прозрачная бесцветная жидкость без запаха и вкуса, в толстых слоях имеет голубоватый цвет. Она закипает при 100 °С (при нормальном давлении) и превращается в лед при нулевой температуре. Плотность льда меньше плотности воды, что обуславливает увеличение объема замерзшей жидкости. Это является причиной разрыва при низких температурах коммуникаций различного рода и приборов, заполненных водой, например систем охлаждения двигателей внутреннего сгорания. Отметим, что известно 11 модификаций льда, из которых 10 являются кристаллическими. Любопытно и то обстоятельство, что на 65 % из воды состоит человеческое тело.

Бензин — прозрачная, легко испаряющаяся жидкость со специфическим запахом, образующая в смеси с воздухом взрывчатую смесь. Температура его кипения — 30... ..200 °С. Бензин является топливом для карбюраторных двигателей, а также служит растворителем и экстрагентом жиров, смол, каучуков (*экстракция* — избирательное извлечение того или иного вещества из смеси).

Важнейшей характеристикой бензина является **октановое число (ОЧ)** — это условная количественная характеристика стойкости бензина к детонации, численно равная процентному содержанию изооктана (**ОЧ = 100**) в смеси с **Н-гептаном**. Чем выше ОЧ, тем выше стойкость к детонации топлива. Для отечественных автомобильных бензинов величина ОЧ = 80...98.

Дизельное топливо — жидкое нефтяное топливо темного цвета или керосиновые, газойлевые и соляровые фракции прямой перегонки нефти.

Важнейшей характеристикой этого вида топлива является **цетановое число (ЦЧ)** — условная количественная характеристика воспламенительных свойств топлива, численно равная процентному (по объему) содержанию **цетана (ЦЧ = 100)** в смеси с **α -метил-нафталином**.

Укажем, что для малооборотных дизелей (МОД) используются более тяжелые или остаточные нефтепродукты. Для дизельных топлив величина ЦЧ = 45, для экстра-марок — ЦЧ = 52.

Керосин — прозрачная жидкость (смесь углеводородов) со специфическим запахом, выкипающая при температуре 150...300 °С. Керосин используется в качестве топлива в реактивных двигателях, а также в быту.

Моторные масла — смазочные масла, используемые в двигателях внутреннего сгорания всех типов и предназначенные для уменьшения изнашивания, снижения трения скольжения, отвода теплоты от трущихся деталей (отвод теплоты составляет 8...12 %) и для уплотнения зазоров в паре поршень—цилиндр (весьма важное свойство). К моторным маслам предъявляются дополнительные требования, связанные с условиями их работы в широком диапазоне температур. Смазочные масла характеризуются смазывающей способностью, то есть снижением трения между двумя контактирующими поверхностями. Так, при толщине масляной пленки, равной 0,7 мкм, коэффициент трения уменьшается в десятки раз.

Основное применение в машинах имеют минеральные индустриальные масла, содержащие в обозначении букву **И**. По назначению они делятся на четыре группы, обозначаемые второй буквой (**Л**, **Г**, **Т** и **Н**), причем для масел гидросистем употребляется буква **Г**. Остальные буквы обозначают: **Л** — для легконагруженных узлов (типа подшипников), **Н** — для направляющих скольжения и **Т** — для тяжелонагруженных узлов (типа зубчатых передач).

По эксплуатационным свойствам и составу индустриальные масла делятся на пять подгрупп, обозначаемых третьей буквой (**А**, **В**, **С**, **Д**, **Е**), в зависимости от наличия и вида присадок, причем указывается кинематическая вязкость в мм²/с (при $T = 40$ °С). В гидравлических системах используются следующие марки индустриальных масел: И-Г-А (32, 46, 68); И-Г-С (32, 46, 68, 100, 150, 220); И-Г-В (46, 68); И-Г-Н-Е (32, 68), где в скобках указана кинематическая вязкость; буква **А** означает отсутствие присадок; **В** — наличие антиокислительных и антикоррозионных при-

садок; *С* — наличие дополнительных противоизносных присадок; *Е* — наличие дополнительных противозадирных и противоскачковых присадок (для направляющих трения, о чем свидетельствует буква *Н* в марке масла).

Присадки вводятся в масла в очень небольших количествах: от 0,5 до 5 % исходного объема. Однако наличие присадок в масле значительно улучшает их эксплуатационные свойства и эксплуатационные свойства двигателей внутреннего сгорания, позволяя в некоторых случаях, особенно в случае использования присадок на молибденовой основе, проехать без замены масла до 10 000...20 000 км без опасения вывести двигатель из строя. Последнее обстоятельство проверено автором книги на собственном автомобиле «ВАЗ-21061».

Контрольные вопросы

1. Что такое жидкость и каковы ее феноменологические свойства?
2. Что такое вязкость жидкости и чем она характеризуется?
3. Каковы основные параметры жидкости и единицы их измерения?
4. В чем смысл реологического уравнения Ньютона?
5. Что такое модуль объемной упругости жидкости и от чего он зависит?
6. Как определяется скорость звука при малых возмущениях в среде (в воздухе, воде)?

Г л а в а 2

СТАТИКА ЖИДКОСТИ

2.1. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЖИДКОСТЬ В СОСТОЯНИИ ПОКОЯ

Гидростатика является разделом гидравлики, в котором изучаются законы равновесия жидкостей и воздействие покоящихся жидкостей на погруженные в них тела.

В соответствии с этим определением различают статику жидкости и статику твердого тела, погруженного в жидкость. Рассмотрим вначале статику жидкости.