

О. Н. БРЮХАНОВ, А. Т. МЕЛИК-АРАКЕЛЯН, В. И. КОРОБКО

# ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ

**УЧЕБНИК**

*Допущено  
Министерством образования Российской Федерации  
в качестве учебника для студентов  
образовательных учреждений среднего профессионального  
образования, обучающихся по специальности  
«Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования  
промышленных и гражданских зданий»*

4-е издание, стереотипное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2011

УДК 681.587.34:621.1(075.32)

ББК 30.123:31.3я723

Б89

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. МАИ *Ю. К. Виноградов*;  
зав. кафедрой «Монтаж и эксплуатация оборудования  
и систем газоснабжения» Московского колледжа  
архитектуры и строительных искусств *Н. И. Павлова*

### **Брюханов О. Н.**

**Б89** Основы гидравлики и теплотехники : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / О. Н. Брюханов, А. Т. Мелик-Аракелян, В. И. Коробко. — 4-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2011. — 240 с.

ISBN 978-5-7695-7778-9

Изложены основные законы гидростатики, движения жидкости по трубам, особенности движения газов по трубопроводам, виды и характеристики насосов и вентиляторов, основные законы термодинамики, термодинамических процессов и тепломассообмена.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования. Может быть полезен специалистам, занимающимся эксплуатацией систем водо- и газоснабжения, отопления и вентиляции.

УДК 681.587.34:621.1(075.32)

ББК 30.123:31.3я723

*Учебное издание*

**Брюханов Олег Николаевич,  
Мелик-Аракелян Аркадий Телемакович,  
Коробко Владимир Иванович**

**Основы гидравлики и теплотехники**

**Учебник**

4-е издание, стереотипное

Редактор *Е. М. Зубкович*. Технический редактор *Н. И. Горбачева*  
Компьютерная верстка: *Г. Ю. Никитина*. Корректор *М. В. Дьяконова*

Изд. № 104103909. Подписано в печать 20.10.2010. Формат 60×90/16. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Бумага офсетная № 1. Усл. печ. л. 15,0. Тираж 1000 экз. Заказ №

Издательский центр «Академия». [www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)  
125252, Москва, ул. Зорге, д. 15, корп. 1, пом. 26б.

Адрес для корреспонденции: 129085, г. Москва, пр-т Мира, д. 101в, стр. 1, а/я 48.

Тел. 8 (495) 648-05-07, факс 8 (495) 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.60.953.Д.007831.07.09 от 06.07.2009.

Отпечатано в соответствии с качеством электронных носителей, представленных издательством в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат». [www.sarpk.ru](http://www.sarpk.ru)  
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.

© Брюханов О. Н., Мелик-Аракелян А. Т., Коробко В. И., 2004

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2004

ISBN 978-5-7695-7778-9

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2004

*Гидравликой* называется наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей и разрабатывающая методы их применения для решения практических задач.

Название «гидравлика» происходит от сочетания греческих слов «*hýdōr*» — вода и «*aulós*» — труба, желоб. Первоначально она представляла собой учение о движении воды по трубам. С развитием техники область применения законов гидравлики существенно расширилась. На законах гидравлики основан расчет разнообразных гидротехнических сооружений (например, плотин, каналов, водосливов), трубопроводов для подачи различных жидкостей, гидромашин (насосов, гидротурбин, гидропередат), а также других гидравлических устройств, применяемых во многих областях техники.

*Теплотехникой* называется наука, изучающая технические средства превращения природных энергоресурсов (топлива, в том числе ядерного, теплоты недр Земли, излучения Солнца) в непосредственно используемые формы энергии: тепловую, механическую, электрическую. Она включает в себя техническую термодинамику, теорию тепломассообмена, рассматривает тепловые двигатели, холодильные машины и термопреобразователи, компрессоры и вентиляторы, топливосжигающие устройства и котельные установки.

Гидравлика зародилась в Древней Греции. Первым научным трудом по гидравлике считается работа Архимеда (287—212 до н. э.) «О плавающих телах», содержащая его известный закон о равновесии тела, погруженного в жидкость.

В средние века гидравлика практически не развивалась, так как эпоха феодализма с ее натуральным хозяйством и отсутствием развитой промышленности не ставила перед этой наукой задач, требующих разрешения. Только с зарождением капитализма появилась необходимость в развитии гидравлики быстрыми темпами.

В конце XV в. великий итальянский ученый, инженер, живописец, скульптор и архитектор Леонардо да Винчи (1452—1519) написал труд «О движении воды в речных сооружениях». Он первым ввел понятие сопротивления движению твердых тел в жидкостях и газах и положил начало экспериментальной гидравлике, поставив лабораторные опыты. В 1586 г. нидерландский математик

и инженер Симон Стевин (1548—1620) опубликовал книгу «Начала гидростатики», в которой дал правила определения силы давления жидкости на дно и стенки сосудов. В 1612 г. появился трактат итальянского ученого Галилео Галилея (1564—1642) «Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и тех, которые в ней движутся». В 1643 г. ученик Г. Галилея Эванджелеста Торричелли (1608—1647) установил закон вытекания жидкости из отверстия в сосуде. В 1663 г. был опубликован установленный французским математиком и физиком Блезом Паскалем (1623—1662) закон о передаче внешнего давления в жидкости. В 1687 г. английский математик, механик и физик Исаак Ньютон (1643—1727) сформулировал законы внутреннего трения в движущейся жидкости. Все перечисленные работы представляли собой лишь отдельные разрозненные труды по гидравлике.

Основоположниками гидравлики как науки были действительные члены Петербургской академии наук М. В. Ломоносов (1711—1765), Леонард Эйлер (1707—1783) и Даниил Бернулли (1700—1782), в результате исследований которых гидравлика получила теоретическую базу.

Великий русский ученый М. В. Ломоносов опубликовал ряд трудов по гидравлике. В работе «Рассуждение о твердости и жидкости тела» он изложил закон сохранения массы и энергии, положенный в основу современной гидравлики.

Л. Эйлер первым дал ясное определение понятия движения жидкости и вывел уравнения движения идеальной жидкости. Он раскрыл природу взаимодействия тела с натекающей на него жидкостью, ввел понятие давления в точке движущейся или покоящейся жидкости, вывел уравнение неразрывности жидкости и так называемое турбинное уравнение, которое находит широкое применение при расчете насосов, турбин и компрессоров.

В 1738 г. Д. Бернулли опубликовал капитальный труд по гидравлике «Гидродинамика», в котором дал метод изучения законов движения жидкости, ввел понятие «гидродинамика» и предложил теорему о запасе энергии движущейся жидкости. Эта теорема носит теперь имя Д. Бернулли и лежит в основе ряда разделов гидравлики.

Выдающийся русский ученый Д. И. Менделеев (1834—1907) в 1880 г. впервые указал на существование в природе двух режимов движения жидкости, что несколько позже было подтверждено английским ученым Осборном Рейнольдсом (1842—1912). Тонкие экспериментальные исследования закона внутреннего трения в жидкостях при ламинарном режиме были проведены русским ученым и инженером Н. П. Петровым (1836—1920). Эти работы позволили глубже проникнуть в физическую природу гидравлических сопротивлений и положили начало учению о турбулентном движении.

Отец русской авиации Н. Е. Жуковский (1847—1921) внес огромный вклад в развитие гидравлики. Им впервые была разработана теория гидравлического удара в трубах и дано классическое решение большого круга технических вопросов в области авиации, водоснабжения и гидротехники.

Трудами советского ученого Н. Н. Павловского (1884—1937) и его учеников развита новая отрасль гидравлики — гидравлика сооружений.

В настоящее время гидравлика и аэродинамика бурно развиваются, основываясь на синтезе теоретических и экспериментальных методов.

Зарождение теплотехники связывают с именем древнегреческого ученого Герона Александрийского (II в. н.э.), построившего с использованием принципа «движущейся силы огня» множество различных паровых машин-игрушек, вершиной которых был прообраз реактивно-турбинного двигателя Эолопил (Эол — бог ветра в греческой мифологии; тогда считали, что вода при нагревании превращается в воздух). Он представлял собой полый металлический шар с впаянными в его противоположные полушария открытыми трубками, загибавшимися в разные стороны. В шар наливалась вода и подогревалась до кипения. Образовавшийся пар выбрасывался из трубок, создавая реактивные силы, под действием которых шар вращался в трубчатых опорах. Низкий уровень науки и техники и отсутствие потребности в новом двигателе у общества остановили его разработку почти на 1700 лет.

В 1681 г. французский физик Дени Папен (1647—1714) изобрел паровой котел, снабженный предохранительным клапаном, позволявшим регулировать давление пара. Чуть позже нидерландский ученый Христиан Гюйгенс (1629—1695), развивая идею Г. Галилея о получении вакуума, предложил взрывать для этого порох на дне цилиндра под поршнем. Обратный поршень должен был падать под действием атмосферного давления. С этим устройством родилось сразу два новых принципа — атмосферной паровой машины и двигателя внутреннего сгорания.

Трудности работы с порохом заставили Д. Папена заменить его в 1690 г. водой, подогревавшейся на дне цилиндра до образования пара. Обратный поршень опускался после конденсации пара, которую ускоряли обливанием цилиндра холодной водой или впрыскиванием ее внутрь.

Д. Папен впервые дал правильное термодинамическое описание процессов в цилиндре своей машины, но ни ему, ни другим изобретателям не пришло в голову разделить эти процессы по разным агрегатам, что сразу повысило бы ее эффективность и решило бы проблему создания двигателя внутреннего сгорания.

Весьма острой в то время была проблема откачки воды из все углублявшихся шахт. И первое применение сила пара нашла в

паровытеснительных насосах (английский инженер Томас Севери (1650—1715) получил патент на один из них в 1698 г.), не имевших ни одной движущей части. Однако из-за низкой экономичности эти насосы были вытеснены паропоршневыми, разработанными в 1705—1712 гг. английским изобретателем Томасом Ньюкоменом (1663—1729). В них пар приготавливался в отдельном котле, а поршневой двигатель был отделен от откачивавшего воду поршневого насоса. Система клапанов регулировала поступление пара и воды в цилиндры. Эти машины широко применялись в течение многих лет, последняя из них демонтировалась в Англии в 1934 г.

С развитием производства промышленность все более остро нуждалась в универсальном двигателе, не зависящем ни от места расположения, как водяные колеса, ни от погоды, как ветряные двигатели. В 1763 г. русский инженер И. И. Ползунов (1728—1766) предложил и к 1766 г. построил такую машину. Она работала на угле, холостой ход исключался благодаря наличию двух цилиндров, работавших на общий вал, парораспределение было автоматическим, правда, машина оставалась пароатмосферной. Изобретатель умер до пуска машины, которая после небольшой неполадки была остановлена и забыта.

В результате слава создания первого универсального паропоршневого двигателя досталась английскому изобретателю Джеймсу Уатту (1736—1819). В 1769 г. он получил патент на усовершенствование ньюкоменовской водоподъемной машины: отделение конденсатора от цилиндра и использование в качестве движущей силы вместо атмосферного давления упругости пара, подаваемого сверху поршня. В 1782 г. Д. Уатт ввел в конструкцию новые усовершенствования: двойное действие (пар поочередно поступал сверху и снизу поршня), золотниковое парораспределение, преобразование поступательно-возвратного движения во вращательное, а в 1788 г. применил центробежный регулятор частоты вращения. Схема установки стала почти современной.

В 1801 г. французский инженер Филипп Лебон (1769—1804) получил патент на поршневой двигатель, работающий на горючих газах от сухой перегонки древесины с зажиганием их электрической искрой и сгоранием внутри цилиндра. В 1805 г. швейцарец И. Риваз предложил двигатель, работающий на водороде.

В 1816 г. английский священник Роберт Стирлинг получил патент на универсальную тепловую машину, состоящую из цилиндра с двумя по-разному движущимися поршнями и регенератора-теплообменника, способную работать на разных топливах как двигатель внешнего сгорания, как холодильник и как тепловой насос (отопитель).

В 1824 г. французский инженер Никола Леонар Сади Карно (1796—1832) опубликовал первый фундаментальный труд по те-

ории теплотехники «Размышления о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу». Он предсказал, что тепловым машинам «суждено совершить большой переворот в цивилизованном мире», и задался целью определить причины их несовершенства. В своем труде Карно заложил основы термодинамики, поскольку там содержались (хотя и полученные с помощью теории «теплорода») и оба начала термодинамики, и ее основные понятия, и идеальный цикл тепловых машин, и другие важные положения.

Опубликование работы Карно осталось почти незамеченным, и лишь через 10 лет, после издания «Мемуара о движущей силе теплоты» Б. Клапейрона, она стала почти сенсацией. Французский физик и инженер Бенуа Клапейрон (1799—1864) «перевел» ее на математический язык, вскрыв великое содержание этого труда, и первым применил графический метод исследования работы тепловых машин — метод циклов.

В 1845—1853 гг. труды Р. Майера, Д. Джоуля, Г. Гельмгольца, У. Томсона (лорда Кельвина), Р. Клаузиуса, У. Ренкина и других ученых позволили окончательно сформулировать закон сохранения и превращения энергии.

В 1855—1865 гг. были введены понятия обратимых и необратимых процессов и энтропии (Р. Клаузиусом) — величины, рост которой в необратимых процессах характеризует ту часть энергии тел, которая не может быть превращена в работу, а рассеивается в виде теплоты. Поскольку все реальные процессы вследствие трения, теплопроводности и конечности времени их протекания необратимы, энтропия изолированных систем всегда возрастает. Так был заложен фундамент одного из разделов теплотехники — технической термодинамики.

Другой раздел теплотехники — теория тепломассообмена — уходит своими корнями в труды Г. Галилея и И. Ньютона. Последний еще в 1701 г. установил закон конвективного теплообмена. В 1822 г. французский математик и физик Жан Батист Фурье (1768—1830) издал «Аналитическую теорию теплопроводности». Ученый полагал, что он привел теорию теплообмена в такое же состояние, в какое была приведена механика трудами И. Ньютона. Однако для этого потребовалось еще более 100 лет. Только современные ученые развили вопросы теплообмена до законченной теории.

---

# Раздел I

## ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ

---

### Глава 1

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКОСТЯХ

##### 1.1. Основные физические свойства и механические характеристики жидкости

*Жидкость* — агрегатное состояние вещества, промежуточное между твердым и газообразным состояниями. Жидкость, сохраняя отдельные черты как твердого тела, так и газа, обладает рядом особенностей, из которых наиболее характерная — текучесть. Подобно твердому телу, жидкость сохраняет свой объем, имеет свободную поверхность, обладает определенной прочностью на разрыв при всестороннем растяжении и т.д. С другой стороны, взятая в достаточном количестве жидкость принимает форму сосуда, в котором находится.

Принципиальная возможность непрерывного перехода жидкости в газ также свидетельствует о близости жидкого и газообразного состояний.

Наличие сильного межмолекулярного взаимодействия обуславливает существование поверхностного натяжения жидкости на ее границе с любой другой средой, что заставляет жидкость принимать такую форму, при которой ее поверхность минимальна. Небольшие объемы жидкости обычно имеют форму капли. В силу этого жидкости в гидравлике называют капельными.

При соприкосновении жидкости с твердыми телами или другими несмешивающимися жидкостями возникают капиллярные явления.

Основными физическими свойствами жидкости являются текучесть, испарение и кипение.

*Текучесть* — смещение жидкости в направлении действия силы. Жидкости отличаются сильным межмолекулярным взаимодействием и малой сжимаемостью вследствие больших сил межмолекулярного отталкивания.

*Испарение* — процесс парообразования, происходящий на свободной поверхности жидкости. Испарение происходит при любой температуре и увеличивается при ее повышении. Испарение объясняется вылетом из поверхностного слоя жидкости молекул, обла-



дающих наибольшей скоростью и кинетической энергией, поэтому в результате испарения жидкость охлаждается.

*Кипение* — процесс интенсивного испарения жидкости по всему ее объему внутри образующихся пузырьков пара. Температура, при которой давление насыщенного пара равно внешнему давлению, называется температурой кипения, или точкой кипения.

Основной механической характеристикой жидкости является *плотность*  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, определяемая для однородной жидкости отношением ее массы  $m$  к ее объему  $W$ :

$$\rho = m/W.$$

Плотность пресной воды при температуре 4 °С  $\rho_{4^{\circ}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

*Удельным объемом* жидкости  $w$ , м<sup>3</sup>/кг, называется объем, занимаемый единицей массы жидкости:

$$w = W/m = 1/\rho.$$

*Удельным весом* однородной жидкости  $\gamma$ , Н/м<sup>3</sup>, называется отношение веса  $G$  жидкости к ее объему:

$$\gamma = G/W.$$

Удельный вес называют также объемным весом. Удельный вес пресной воды при температуре 4 °С  $\gamma_{4^{\circ}} = 9810$  Н/м<sup>3</sup>.

*Относительным удельным весом* жидкости  $\delta$  называется отношение ее удельного веса к удельному весу пресной воды при температуре 4 °С:

$$\delta = \gamma/\gamma_{4^{\circ}}.$$

Между плотностью и удельным весом существует связь:

$$\gamma = \rho g,$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Значения плотности воды при различных температурах приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Плотность воды при различных температурах**

| $t, ^{\circ}\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $t, ^{\circ}\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0                     | 999,87                | 50                    | 988,07                |
| 4                     | 1000                  | 60                    | 983,24                |
| 10                    | 999,73                | 70                    | 977,81                |
| 20                    | 998,23                | 80                    | 971,83                |
| 30                    | 995,67                | 90                    | 965,34                |
| 40                    | 992,24                | 99                    | 959,09                |

## 1.2. Сжимаемость и температурное расширение жидкостей

Сопротивление жидкости изменению ее объема характеризуется коэффициентами объемного сжатия и температурного расширения.

*Коэффициент объемного сжатия*  $\beta_W$ ,  $\text{Па}^{-1}$  — относительное изменение объема жидкости на единицу изменения давления:

$$\beta_W = \frac{\Delta W}{W \Delta p},$$

где  $\Delta W$  — изменение объема  $W$ , соответствующее изменению давления на  $\Delta p$ .

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия, представляет собой *объемный модуль упругости* жидкости  $E$ , Па:

$$E = 1/\beta_W.$$

Для воды при нормальных условиях можно принимать следующее:  $\beta_W \approx \frac{1}{2 \cdot 10^9} \text{Па}^{-1}$ ;  $E \approx 2 \cdot 10^9 \text{Па}$ .

*Коэффициент температурного расширения*  $\beta_t$ ,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$  — относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на один градус:

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{W \Delta t},$$

где  $\Delta W$  — изменение объема, соответствующее изменению температуры на  $\Delta t$ .

Для воды при нормальных условиях можно принимать  $\beta_t \approx \frac{1}{10000} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

Указанный коэффициент называют также коэффициентом объемного теплового расширения.

Значения коэффициента объемного сжатия воды  $\beta_W$  в зависимости от давления и температуры приведены в табл. 1.2, объемного модуля упругости воды  $E$  — в табл. 1.3, коэффициента температурного расширения воды  $\beta_t$  — в табл. 1.4.

Таблица 1.2

**Значения коэффициента объемного сжатия воды**

| $t, ^{\circ}\text{C}$ | $\beta_W \cdot 10^{10}, \text{Па}^{-1}$ , при давлении, $\text{Па} \cdot 10^4$ |      |      |      |      |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
|                       | 50                                                                             | 100  | 200  | 390  | 780  |
| 0                     | 5,4                                                                            | 5,37 | 5,31 | 5,23 | 5,15 |
| 5                     | 5,29                                                                           | 5,23 | 5,18 | 5,08 | 4,93 |
| 10                    | 5,23                                                                           | 5,18 | 5,08 | 4,98 | 4,81 |
| 15                    | 5,18                                                                           | 5,1  | 5,03 | 4,88 | 4,7  |
| 20                    | 5,15                                                                           | 5,05 | 4,95 | 4,81 | 4,6  |

Значения объемного модуля упругости воды

| $t, ^\circ\text{C}$ | $E, \text{Па} \cdot 10^4, \text{ при давлении, Па} \cdot 10^4$ |         |         |         |         |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                     | 50                                                             | 100     | 200     | 390     | 780     |
| 0                   | 185 400                                                        | 186 400 | 188 400 | 191 300 | 197 200 |
| 5                   | 189 300                                                        | 191 300 | 193 300 | 197 200 | 203 100 |
| 10                  | 191 300                                                        | 193 300 | 197 200 | 201 100 | 208 000 |
| 15                  | 193 300                                                        | 196 200 | 199 100 | 205 000 | 212 900 |
| 20                  | 194 200                                                        | 198 200 | 202 100 | 208 000 | 217 800 |

Таблица 1.4

Значения коэффициента температурного расширения воды

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\beta_t \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}, \text{ при давлении, Па} \cdot 10^5$ |     |     |     |     |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                     | 1                                                                              | 100 | 200 | 500 | 900 |
| 1 ... 10            | 14                                                                             | 43  | 72  | 149 | 229 |
| 11 ... 20           | 150                                                                            | 165 | 183 | 236 | 289 |
| 40 ... 50           | 420                                                                            | 422 | 426 | 429 | 437 |
| 60 ... 70           | 556                                                                            | 548 | 539 | 523 | 514 |
| 90 ... 100          | 719                                                                            | 704 | 696 | 661 | 621 |

### 1.3. Вязкость жидкостей.

#### Закон Ньютона о силе внутреннего трения

Физическое свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу называют *вязкостью*. Любая реальная жидкость обладает только ей присущей вязкостью. При относительном перемещении смежных частиц жидкости возникают силы внутреннего сопротивления (внутреннее трение).

Наряду с легкоподвижными жидкостями (например, водой) существуют очень вязкие жидкости, сопротивление которых сдвигу весьма значительно (глицерин, тяжелые масла и др.). Вязкость характеризует степень текучести жидкости или подвижности ее частиц.

Пусть жидкость течет вдоль плоской стенки параллельными ей слоями (рис. 1.1), как это наблюдается при ламинарном движении. Вследствие тормозящего влияния стенки слои жидкости будут двигаться с разными скоростями, значения которых возрастают по мере отдаления от стенки.

Рассмотрим два слоя жидкости, движущиеся на расстоянии  $\Delta u$  друг от друга.

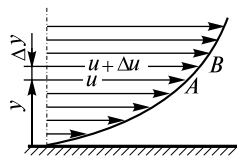


Рис. 1.1. Распределение скоростей при течении жидкости вдоль твердой стенки

Слой  $A$  движется со скоростью  $u$ , а слой  $B$  — со скоростью  $u + \Delta u$ . Вследствие разности скоростей слой  $B$  сдвигается относительно слоя  $A$  за единицу времени на величину  $\Delta u$ , которая является абсолютным сдвигом слоя  $A$  по слою  $B$ . Отношение  $\Delta u/\Delta y$  представляет собой градиент скорости (относительный сдвиг). Появляющееся при этом движении касательное напряжение (сила внутреннего трения, приходящаяся на единицу площади) обозначим через  $\tau$ . Тогда аналогично явлению сдвига в твердых телах получаем следующую зависимость между напряжением и скоростью деформации:

$$\tau = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y}.$$

Если слои находятся бесконечно близко друг к другу, то

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}. \quad (1.1)$$

Коэффициент  $\mu$ , аналогичный коэффициенту сдвига в твердых телах и характеризующий сопротивляемость жидкости сдвигу, называется *динамической*, или *абсолютной*, *вязкостью*. На существование зависимости (1.1) впервые указал Ньютон, поэтому она называется *законом трения Ньютона*. Жидкости, подчиняющиеся этому закону, называются *ньютоновскими*.

Сила внутреннего трения в жидкости

$$T = \tau \omega = \mu \omega \frac{du}{dy}.$$

Как следует из этого уравнения, она прямо пропорциональна градиенту скорости, площади трущихся слоев  $\omega$  и динамической вязкости. Таким образом, трение в жидкости отличается от трения в твердых телах, где сила трения зависит от нормального давления и не зависит от площади трущихся поверхностей.

Динамическая вязкость  $\mu$  измеряется в паскаль-секундах (Па · с). Значение динамической вязкости зависит от рода жидкости и ее температуры.

Отношение динамической вязкости жидкости к ее плотности называется *относительной*, или *кинематической*, *вязкостью*:

$$\nu = \mu/\rho.$$

Кинематическая вязкость измеряется в квадратных метрах на секунду ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). Кинематическая вязкость воды при температуре  $20^\circ\text{C}$   $\nu_{20^\circ} \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Вязкость жидкостей практически не зависит от давления, но значительно уменьшается с увеличением температуры. Значения динамической вязкости воды при разных температурах приведены в табл. 1.5.

## Значения динамической вязкости воды

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$ |
|---------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 0                   | 0,00179                       | 12                  | 0,00124                       | 24                  | 0,00092                       | 36                  | 0,000706                      | 48                  | 0,000568                      |
| 1                   | 0,00173                       | 13                  | 0,00120                       | 25                  | 0,00089                       | 37                  | 0,000693                      | 49                  | 0,000558                      |
| 2                   | 0,00167                       | 14                  | 0,00117                       | 26                  | 0,00087                       | 38                  | 0,000679                      | 50                  | 0,000549                      |
| 3                   | 0,00162                       | 15                  | 0,00114                       | 27                  | 0,00086                       | 39                  | 0,000666                      | 51                  | 0,000541                      |
| 4                   | 0,00157                       | 16                  | 0,00112                       | 28                  | 0,00084                       | 40                  | 0,000654                      | 52                  | 0,000532                      |
| 5                   | 0,00152                       | 17                  | 0,00109                       | 29                  | 0,00082                       | 41                  | 0,000642                      | 53                  | 0,000524                      |
| 6                   | 0,00147                       | 18                  | 0,00106                       | 30                  | 0,00080                       | 42                  | 0,000630                      | 54                  | 0,000515                      |
| 7                   | 0,00143                       | 19                  | 0,00103                       | 31                  | 0,000783                      | 43                  | 0,000618                      | 55                  | 0,000507                      |
| 8                   | 0,00139                       | 20                  | 0,00101                       | 32                  | 0,000767                      | 44                  | 0,000608                      | 56                  | 0,000499                      |
| 9                   | 0,00135                       | 21                  | 0,00098                       | 33                  | 0,000751                      | 45                  | 0,000597                      | 57                  | 0,000492                      |
| 10                  | 0,00131                       | 22                  | 0,00096                       | 34                  | 0,000726                      | 46                  | 0,000587                      | 58                  | 0,000484                      |
| 11                  | 0,00127                       | 23                  | 0,00094                       | 35                  | 0,000721                      | 47                  | 0,000577                      | 59                  | 0,000477                      |

Таблица 1.6

## Значения кинематической вязкости воды

| Вода    | $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}, \text{ при температуре, } ^\circ\text{C}$ |      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|         | 0                                                                               | 6    | 8                  | 10                 | 12                 | 14                 | 16                 | 18                 |
| Чистая  | 1,79                                                                            | 1,47 | 1,38               | 1,31               | 1,23               | 1,17               | 1,11               | 1,06               |
| Сточная | —                                                                               | 1,67 | 1,56...<br>...1,73 | 1,47...<br>...1,61 | 1,38...<br>...1,52 | 1,31...<br>...1,42 | 1,23...<br>...1,34 | 1,17...<br>...1,27 |

Окончание табл. 1.6

| Вода    | $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}, \text{ при температуре, } ^\circ\text{C}$ |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
|         | 20                                                                              | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 100  |  |
| Чистая  | 1,01                                                                            | 0,81 | 0,60 | 0,56 | 0,48 | 0,42 | 0,37 | 0,33 | 0,20 |  |
| Сточная | 1,11...1,2                                                                      | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    | —    |  |

Значения кинематической вязкости чистой и сточной воды при разных температурах приведены в табл. 1.6.

На практике вязкость жидкостей определяется вискозиметрами и чаще всего выражается в градусах Энглера ( $^\circ\text{E}$ ). Такую вязкость называют *условной*. Для перехода от условной вязкости в градусах Энглера к кинематической вязкости служит эмпирическая формула Убеллоде

$$\nu = (0,0731 ^\circ\text{E} - 0,0631/^\circ\text{E}) 10^{-4}$$

или теоретическая формула А.Д.Альтшуля

$$^\circ\text{E} = 24 \nu \left[ 2,31 \text{г} \frac{\sqrt{\nu^2 + 0,0294} - \nu}{\sqrt{\nu^2 + 0,0166} - \nu} + \frac{1}{\nu} \left( \sqrt{\nu^2 + 0,0294} - \sqrt{\nu^2 + 0,0166} \right) \right].$$

В первой формуле кинематическая вязкость  $\nu$  измеряется в  $\text{м}^2/\text{с}$ , во второй — в  $\text{см}^2/\text{с}$ .

#### 1.4. Поверхностное натяжение жидкостей

Поверхностное натяжение жидкости обуславливается силами взаимного притяжения молекул поверхностного слоя, стремящихся сократить свободную поверхность жидкости.

Вследствие поверхностного натяжения жидкость, имеющая криволинейную поверхность, испытывает дополнительное усилие, увеличивающее или уменьшающее давление жидкости на величину

$$p_{\text{пов}} = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right),$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $\text{Н}/\text{м}$ ;  $r_1$  и  $r_2$  — главные радиусы кривизны рассматриваемого элемента поверхности,  $\text{м}$ .

Приведенное выражение называют формулой Лапласа.

Давление при выпуклой поверхности жидкости увеличивается, а при вогнутой — уменьшается.

При температуре  $20^\circ\text{C}$  поверхностное натяжение воды, соприкасающейся с воздухом,  $\sigma = 0,0726 \text{ Н}/\text{м}$ .

Зависимость поверхностного натяжения от температуры имеет следующий вид:

$$\sigma = \sigma_0 - \beta \Delta t,$$

где  $\sigma_0$  — поверхностное натяжение при соприкосновении с воздухом при температуре  $0^\circ\text{C}$  [для воды  $\sigma_0 = 0,076 \text{ Н}/\text{м}$ ;  $\beta = 0,00015 \text{ Н}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ].

Влияние поверхностного натяжения приходится учитывать при работе с жидкостными приборами для измерения давления, при истечении жидкости из малых отверстий, при фильтрации и образовании капель в свободных струях.

Особенно сильно поверхностное натяжение проявляется в трубках весьма малого диаметра (капиллярных), для которых формула Лапласа принимает вид

$$p_{\text{пов}} = 2\sigma/r$$

или

$$h_{\text{пов}} = \frac{2\sigma}{\rho g r}, \quad (1.2)$$

где  $r$  — радиус капиллярной трубки;  $h_{\text{пов}}$  — высота капиллярного поднятия.

## 1.5. Идеальная и аномальные жидкости

**Идеальная жидкость.** В механике жидкости для облегчения решения некоторых задач используется понятие идеальной (совершенной) жидкости.

Под идеальной жидкостью понимают воображаемую жидкость, обладающую абсолютной подвижностью (т. е. лишенную вязкости), абсолютно несжимаемую, не расширяющуюся с изменением температуры, абсолютно неспособную сопротивляться разрыву. Выводы, полученные исходя из свойств идеальной жидкости, приходится, как правило, корректировать, вводя поправочные коэффициенты.

**Аномальные жидкости.** Жидкости, которые по своим свойствам отличаются от ньютоновских в силу особенностей их молекулярных структур и внутренних молекулярных движений, называются неньютоновскими, или аномальными. К классу неньютоновских жидкостей относятся вязкопластические, псевдопластические, дилатантные и вязкоупругие жидкости.

Вязкопластические жидкости характеризуются тем, что у них наряду с вязкостью проявляются также пластические свойства, которые заключаются в наличии некоторого предельного напряжения сдвига, после достижения которого и возникает «текучесть» среды. Реологические<sup>1</sup> законы вязкопластических жидкостей открыты Е. Бингамом (1916 г.) и Ф. Н. Шведовым (1889 г.).

Реологическое уравнение вязкопластической жидкости (Бингама — Шведова) имеет следующий вид:

$$\tau = \tau_0 + \mu' \frac{du}{dy} \text{ при } \tau > \tau_0, \quad (1.3)$$

где  $\tau_0$  — предельное напряжение сдвига (предельная сила внутреннего трения);  $\mu'$  — динамический коэффициент структурной вязкости.

При  $\tau < \tau_0$  текучесть отсутствует, т. е. среда ведет себя как твердое тело.

Примеры вязкопластической жидкости: глинистые и цементные растворы, масляные краски, сточные грязи, некоторые пасты и т. д.

Физическое объяснение особых свойств всех этих жидкостей основывается на представлении наличия в них при покое некоторой пространственной жесткой структуры, которая в состоянии сопротивляться любому внешнему воздействию до тех пор, пока вызванное им напряжение сдвига не превзойдет соответствующее этой структуре предельное напряжение. После этого структура

<sup>1</sup> Реология — наука о деформациях и текучести веществ.

полностью разрушается и жидкость начинает вести себя как обычная ньютоновская вязкая жидкость при кажущемся напряжении, равном превышению  $(\tau - \tau_0)$  действительного напряжения над предельным. При уменьшении этого кажущегося напряжения до нуля, т. е. при возвращении действительного напряжения к предельному его значению, пространственная жесткая структура восстанавливается.

Псевдопластические жидкости в отличие от вязкопластических лишены предельного напряжения текучести, но их кажущаяся вязкость определяется коэффициентом, зависящим от скорости сдвига.

Реологическое уравнение псевдопластической жидкости (Освальда—Рейнера) имеет следующий вид:

$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^n, \quad (1.4)$$

где  $K$  и  $n$  — постоянные ( $n < 1$ ).

Примерами псевдопластических жидкостей являются суспензии асимметричных частиц, растворы высокополимеров.

Дилатантные жидкости также описываются реологическим уравнением (1.4), но в отличие от псевдопластических жидкостей в них кажущаяся вязкость с увеличением напряжения увеличивается, что соответствует  $n > 1$ .

Примерами дилатантных жидкостей являются суспензии твердых частиц при их высоких концентрациях (например, пульпа — высококонцентрированная смесь песка и воды, транспортируемая по трубам от земснаряда при углублении рек и водоемов; крахмальные клейстеры и клеи).

Вязкоупругие жидкости обладают свойствами как вязкости, так и упругости. К их числу относятся очень вязкие синтетические материалы, а также слабые растворы полимеров в ньютоновских жидкостях. Иногда даже небольшие по весу добавки полимеров превращают ньютоновские жидкости в неньютоновские, сообщая им специфические вязкоупругие свойства.

В зависимости от характера совместного действия упругости и вязкости различают и реологические модели вязкоупругой среды. Одной из моделей вязкоупругой среды является модель Фойхта, основанная на наложении упругого и вязкого напряжений:

$$\tau = G\varepsilon + \mu \frac{du}{dy}, \quad (1.5)$$

где  $G$  — модуль сдвига;  $\varepsilon$  — деформация сдвига;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости;  $\frac{du}{dy}$  — скорость сдвига.

Механические свойства многих неньютоновских жидкостей существенно зависят не только от скорости деформирования, но и



от продолжительности деформирования, а также от предыстории потока. Такие жидкости называются тиксотропными. Некоторые из них — реопектические жидкости — обладают способностью увеличивать жесткость своей структуры при наличии сдвигового движения, другие, наоборот, — разрушать структуру. К первому типу относятся, например, цементные растворы в режиме «цепенения», расплавленные металлы, которые в жидком состоянии представляют собой чисто ньютоновские жидкости, а на начальной стадии затвердевания заполняются мельчайшими кристаллическими образованиями, приближающими их к дилатантным жидкостям.

Тиксотропия может также проявляться в эффекте разрушения жесткой структуры под действием сдвигового деформационного движения, как это имеет место, например, в жидкостях типа кефира. Под влиянием встряхивания кефир, представляющий собой желеобразное тело, свободно выливается из бутылки, а после некоторого времени покоя вновь восстанавливает свою структуру.

Изучением неньютоновских жидкостей занимается специальная наука — реология.

## 1.6. Понятие о многофазных системах

Жидкости, в которых нарушается основное их свойство — сплошность, называются многофазными (полифазными) системами. В этих системах, как правило, можно выделить границы раздела, отделяющие одну непрерывную среду (фазу) от другой, причем при переходе через такие границы свойства жидкости меняются скачкообразно.

Простейшим случаем многофазной системы являются двухфазные системы. Примеры таких систем: газ — твердые частицы (пневмотранспорт, пылеулавливание); газ — капли жидкости (распылители, сушилки, газовое охлаждение, испарение); жидкость — пузырьки пара (испарители, эрлифты); жидкость — твердые частицы (гидротранспорт, осаждение).

Во всех этих примерах первая из указанных фаз (основная) условно называется непрерывной, вторая — дискретной. При некоторых условиях многофазные системы могут переходить в однородные (гомогенные) и наоборот. Например, в воде при обычных условиях находится растворенный воздух. При снижении давления и повышении температуры воздух начинает выделяться, образуя воздушные пузыри значительных размеров: наблюдается переход однофазной системы (вода) к двухфазной (вода + газ).

С образованием двухфазных систем связаны процессы фазовых переходов. Так, в воде при повышении давления и понижении температуры зарождаются кристаллы льда, т.е. образуется

двухфазная система — вода + твердые частицы. Наоборот, при понижении давления жидкости до уровня так называемого давления насыщенного пара жидкость вскипает, образуя пузыри, заполненные насыщенными парами воды.

Количество дискретной фазы в непрерывной определяется объемной концентрацией. Обычно за объемную концентрацию принимается отношение объема, занятого дискретной фазой, к общему объему многофазной системы:

$$\beta = \frac{W_2}{W_2 + W_1},$$

где  $W_2$  и  $W_1$  — объемы соответственно дискретной и непрерывной фаз в многофазной системе.

Среднюю плотность многофазной системы можно представить в следующем виде:

$$\rho = \beta\rho_2 + \beta\rho_1,$$

где  $\rho_2$  и  $\rho_1$  — плотности соответственно дискретной и непрерывной фаз.

**Пример 1.1.** При гидравлическом испытании внутренних систем водоснабжения допускается падение испытательного давления в течение 10 мин на  $\Delta p = 4,9 \cdot 10^4$  Па. Определить допустимую утечку  $\Delta W$  в течение 10 мин при гидравлическом испытании системы вместимостью  $W = 80$  м<sup>3</sup>.

*Решение.* Принимаем  $\beta_W = \frac{1}{2 \cdot 10^9}$  Па<sup>-1</sup>.

Допустимая утечка

$$\Delta W = \beta_W W \Delta p = \frac{80 \cdot 4,9 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^9} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

**Пример 1.2.** Для периодического аккумулирования прироста воды, получающегося при изменении температуры, в системах центрального водяного отопления устраивают расширительные резервуары, которые присоединяются к системе в верхней ее точке и сообщаются с атмосферой. Определить наименьший объем расширительного резервуара, при котором он бы полностью не опорожнялся. Допустимое колебание температуры воды во время перерывов в топке  $\Delta t = 95 - 70 = 25$  °С. Объем воды в системе  $W = 0,55$  м<sup>3</sup>. Коэффициент температурного расширения воды  $\beta_t = 0,0006$  °С<sup>-1</sup> (при  $t = 80$  °С).

*Решение.* Наименьший объем расширительного резервуара должен быть равен изменению объема воды при изменении ее температуры на 25 °С:

$$\Delta W = \beta_t W \Delta t = 0,0006 \cdot 0,55 \cdot 25 = 0,00825 \text{ м}^3 = 8,25 \text{ л.}$$

**Пример 1.3.** В отопительный котел поступает вода в объеме  $W = 50 \text{ м}^3$  при температуре  $t_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Сколько воды ( $W_1$ ) будет выходить из котла, если доводить нагрев до температуры  $t_2 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$  (коэффициент температурного расширения воды  $\beta_t = 0,00064 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )?

*Решение:*

$$\Delta W = \beta_t W (t_2 - t_1) = 0,00064 \cdot 50 \cdot 20 = 0,64 \text{ м}^3;$$

$$W_1 = W + \Delta W = 50 + 0,64 = 50,64 \text{ м}^3.$$

**Пример 1.4.** В отопительной системе (котел, радиаторы и трубопроводы) небольшого дома содержится вода объемом  $W = 0,4 \text{ м}^3$ . Сколько воды дополнительно войдет в расширительный сосуд ( $\Delta W$ ) при нагревании ее от  $20$  до  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

*Решение.* Плотность воды при температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (см. табл. 1.1)  $\rho_{20^\circ} \approx 998 \text{ кг/м}^3$ ; масса воды  $m = 0,4 \cdot 998 \approx 399 \text{ кг}$ .

Плотность воды при температуре  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  (см. табл. 1.1)  $\rho_{90^\circ} \approx 965 \text{ кг/м}^3$ ; объем, занимаемый водой, имеющей температуру  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$$W' = m/\rho_{90^\circ} = 399:965 \approx 0,414 \text{ м}^3.$$

Дополнительный объем

$$\Delta W = W' - W = 0,414 - 0,4 = 0,014 \text{ м}^3.$$

**Пример 1.5.** Определить среднюю толщину  $\delta_{\text{отл}}$  солевых отложений в герметичном водоводе внутренним диаметром  $d = 0,3 \text{ м}$  и длиной  $l = 2 \text{ км}$ . При выпуске воды в количестве  $\Delta W = 0,05 \text{ м}^3$  давление в водоводе падает на  $\Delta p = 1 \cdot 10^6 \text{ Па}$ . Отложения по диаметру и длине водовода распределены равномерно.

*Решение.* Объем воды в водоводе с отложениями

$$W = \frac{\Delta W}{\beta_W \Delta p}.$$

Принимаем  $\beta_W = \frac{1}{2 \cdot 10^9} \text{ Па}^{-1}$ , тогда

$$W = \frac{0,05 \cdot 2 \cdot 10^9}{1 \cdot 10^6} = 100 \text{ м}^3.$$

Средний внутренний диаметр водовода с отложениями

$$d_{\text{отл}} = \sqrt{\frac{4W}{\pi l}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 100}{3,14 \cdot 2 \cdot 10^3}} \approx 0,252 \text{ м}.$$

Средняя толщина отложений

$$\delta_{\text{отл}} = \frac{d - d_{\text{отл}}}{2} = \frac{0,3 - 0,252}{2} = 0,024 \text{ м} = 24 \text{ мм}.$$

## Контрольные вопросы

1. Что называется жидкостью?
2. Назовите основные физические свойства жидкости и поясните, что они собой представляют.
3. Как определяется плотность однородной жидкости?
4. Какова связь между плотностью, удельным весом и удельным объемом?
5. Каков физический смысл коэффициента объемного сжатия жидкости?
6. Каков физический смысл коэффициента объемного расширения жидкости?
7. Сформулируйте закон Ньютона о силах внутреннего трения между частицами жидкости при ее движении.
8. Какими силами обусловлено поверхностное натяжение жидкостей?
9. От каких параметров зависит высота капиллярного поднятия жидкости?
10. Назовите жидкости, относящиеся к классу неньютоновских (аномальных).
11. Какие системы называются многофазными?