

Р. Р. ЧУГАЕВ

Гидравлика

(ТЕХНИЧЕСКАЯ
МЕХАНИКА
ЖИДКОСТИ)

ИЗДАНИЕ 4-е,
ДОПОЛНЕННОЕ
И ПЕРЕРЕБОТАННОЕ

Допущено Министерством
высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебника для студентов
гидротехнических специальностей
высших учебных заведений



ЛЕНИНГРАД
ЭНЕРГОИЗДАТ
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1982

Таблица 11-5	Коэффициенты расхода m для высоких трапециевидальных профилей ($c_n \geq 3H$) при свободном доступе воздуха под струю (рис. 11-40)	439
Таблица 11-6	Коэффициенты расхода m для трапециевидальных профилей средней высоты и низких (см. рис. 11-35)	439
Таблица 11-7	Коэффициент расхода m для треугольных профилей с вертикальной верховой гранью при $c_n > 3H$ (см. рис. 11-36)	440
Таблица 16-1	Требуемое для достижения динамического подобия отношение характеристик модели (m) к характеристике натуре (n)	534
Таблица 17-1	Округленные значения коэффициента фильтрации k для разных грунтов	544
<i>Расчетные графики, помещенные в книге</i>		
Рис. 4-25	График Кольбрука для определения коэффициента λ гидравлического трения (для круглых и некоторых прямоугольных напорных труб)	163
Рис. 4.26	График для определения коэффициента Шези C по формуле Павловского	178
Рис. 4-31	График для определения коэффициента φ_3 полноты удара	189
Рис. 4-34	График для определения «коэффициента ξ смягчения сужения», представленного на рис. 4-32, в	192
Рис. 4-35	График для определения «коэффициента ξ смягчения сужения», представленного на рис. 4-32, в	192
Рис. 6-13	К расчету круглых канализационных труб	261
Рис. 6-16	График для определения гидравлических элементов безнапорного потока в цилиндрическом канале круглого поперечного сечения	263
Рис. 7-16	График для определения критической глубины в случае каналов симметричного трапециевидального поперечного сечения	281
Рис. 11-12	Кривая $\left(\frac{Z}{c_n}\right)_{кр} = f\left(\frac{H}{c_n}\right)$	412
Рис. 11-23	Кривые: $\varphi = f_1(em)$; $\Phi = f_2(em)$; $k = f_3(em)$ для расчета водослива с широким порогом	422
Рис. 11-27	График Чугаева для определения перепада восстановления	426
Рис. 11-32	График для определения коэффициента подтопления σ_n водослива вакуумного, безвакуумного нормального очертания, безвакуумного с уширенным гребнем	434
Рис. 11-42	График для расчета косых водосливов	441
Рис. 12-5	График для определения глубины h_c в сжатом сечении и глубины h_c сопряженной со сжатой, в зависимости от величины E_0 (случай прямоугольного русла нижнего бьефа — плоская задача)	456
Рис. 12-13	График для определения критических значений $(Z, c_n)_{кр}$ (плоская задача, водосливная стенка без затворов)	461
Рис. 12-25	График для расчета глубины водобойного колодца и отметки пониженного крепления за плотиной (плоская задача)	470
Рис. 12-29	График для определения высоты неподтопленной водобойной стенки (плоская задача)	475
Рис. 12-30	График для определения высоты подтопленной водобойной стенки (плоская задача)	476
Рис. 17-18	График П. Я. Полубариновой-Кочиной для определения величины промежутка высачивания Δ в случае фильтрационного потока на рис. 17-17	552
Рис. 17-21	График Р. Р. Чугаева для определения фильтрационного расхода q доступного через дно галерей (ренажной траншеи)	554

ББК 30.123
Ч-83
УДК 621.22.01 (075.8)

Рецензент С. В. Избаш

РОМАН РОМАНОВИЧ ЧУГАЕВ

ГИДРАВЛИКА

Редактор *Б. И. Леонова*
Художественный редактор *Д. Р. Стевинович*
Технический редактор *А. Г. Рябкина*
Корректоры *Е. В. Багно, С. Ф. Здобнова*
Переплет художника *В. В. Белякова*
ИБ № 2482 («Энергия»)

Сдано в набор 01.09.81. Подписано в печать 26.05.82. М-22093 Формат 70 × 100^{1/16}. Бумага офсетная № 2. Гарнитура «Твймс». Офсетная печать. Усл. печ. л. 54,6 Усл. кр.-ог. 109,2 Уч.-изд. л. 62,5. Тираж 53 000 экз. Заказ 55. Цена 2 р. 50 к.

Ленинградское отделение Энергоиздата. 191041. Ленинград. Марсово поле. 1.

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136. Ленинград, П-136, Чкиловский пр., 15.

Чугаев Р. Р.

Ч-83 Гидравлика: Учебник для вузов. — 4-е изд., доп. и перераб. — Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. — 672 с., ил.
В пер. 2 р. 50 к.

Содержание соответствует программе курса для гидротехнических специальностей, утвержденной МВнССО СССР. Учебник дополнен сведениями, необходимыми для выполнения расчетно-графических работ (справочные данные и т. п.), материалами практических (аудиогорных) занятий, факультативными сведениями для наиболее успевающих студентов и аспирантов. Третье издание вышло в 1975 г. Настоящее издание обновлено и переработано.

Для студентов вузов гидротехнических специальностей.

Ч $\frac{3302000000-075}{051(01)-82}$ 75-82

ББК 30.123
605

С Энергоиздат, 1982

ПРЕДИСЛОВИЕ

(содержащее необходимые методические указания,
относящиеся к общему построению предлагаемого курса
и представляющие интерес для преподавателей,
которые будут пользоваться настоящим учебником)

Предлагаемый учебник составлен на основании нашего многолетнего опыта проектирования гидротехнических сооружений, а также преподавания курса «Гидравлики» и курса «Гидротехнические сооружения» на гидротехническом факультете (ГТФ) Ленинградского ордена Ленина политехнического института (ЛПИ) имени М. И. Калинина. Данный учебник издавался ЛПИ в 1960 г. и затем издательством «Энергия» — в 1963 г., в 1970 г., в 1971 г.¹ и в 1975 г.

Книга содержит: 1) материал собственно учебника (полный курс лекций), т. е. теоретические вопросы, которые студент должен изучить и по которым он должен сдать экзамены; объем этого материала составляет около 375—400 страниц; 2) вспомогательный материал, набранный мелким шрифтом, не выносимый на экзамены: справочные данные, примеры расчетов, задачи, материалы практических занятий, некоторые факультативные сведения, представляющие интерес, например, для аспирантов.

Предлагаемый учебник рассчитан на изучение курса гидравлики в течение трех семестров (при трех экзаменах, что имеет место на ГТФ ЛПИ). Как видно, готовясь к одному из трех экзаменов, студент должен изучить около 130 страниц текста данной книги, что, как показывает длительный опыт, является для студентов посильным (при условии нормальной работы студента в течение семестра).

В ряде вузов строительного профиля гидравлика изучается в течение только двух семестров; в частности, двухсеместровый курс гидравлики предусматривается на специальности водоснабжение и канализация. При таком изучении гидравлики объем «собственно учебника» не должен превышать 250—270 страниц. Надо отметить, что данная книга составлена с расчетом возможности сократить ее до двухсеместрового объема при двух экзаменах. Такое сокращение при изучении курса можно выполнить, исключив из него главы 12, 13, 14, 15, 18 и 19, а также разделы глав: 7, В; 9, А; 9, В и конец главы 17 (начиная с § 17-12).

В данной книге (учебнике для студентов) излагаются только основы гидравлики. Поэтому она не может полностью заменить руководство для практических расчетов, необходимое при проектировании тех или других сооружений и устройств.

Материал, включаемый в курс, мы стремились подобрать таким образом, чтобы в результате его изучения студент получил *необходимое развитие*, на основе которого он в дальнейшем мог бы уже совершенно самостоятельно

¹ В 1971 г. книга была опубликована с опечатками, сделанными не по вине автора (см. Гидротехническое строительство, 1972, № 5, с. 26).

разобрать и изучить по возможности любой новый вопрос гидравлики, встретившийся в его будущей инженерной практике.

Специальные гидравлические расчеты, выполнение которых требует знания конструкции и работы гидротехнических сооружений, нами исключались из курса гидравлики и относились к таким специальным курсам, как «Гидротехнические сооружения», «Использование водной энергии» и т. п. Именно под таким углом зрения проводилась увязка общетехнической дисциплины «Гидравлика» с профилирующими (специальными) дисциплинами, в частности, с курсом «Гидротехнические сооружения».

Как дополнительно поясняется в главе 1 (см. также § 3-1), мы считаем, что внутри единой науки «Механика жидкости» необходимо в настоящее время различать два принципиально разных научных направления:¹

а) «дифференциальное» направление, когда мы интересуемся скоростями и давлениями в отдельных точках потока, причем сам поток жидкости представляем как векторное поле скоростей и скалярное поле давлений;

б) «интегральное» направление, когда мы не интересуемся отмеченными выше полями скоростей и давлений, причем оперируем осредненными и интегральными характеристиками потока (средней скоростью в плоском живом сечении, полной величиной расхода для этого сечения и т. п.).

Естественно, что «дифференциальное» направление требует изложения курса в *векторной форме*; «интегральное» же направление — в *безвекторной форме*.

Как известно, некоторые технические специальности, в связи с их спецификой, требуют курсов механики жидкости, в которых существенно сочетаются оба отмеченные выше научные направления. В этом случае построение единого курса «Технической механики жидкости» значительно осложняется.

Что касается нашего курса гидравлики, составленного для гидротехнических специальностей, то в нем мы почти исключительно придерживаемся второго (интегрального) научного направления, излагая все в «безвекторной» форме. Только в порядке исключения в отдельных местах курса мы затрагиваем «дифференциальное направление» (в частности, это направление в несколько расширенной форме используется при рассмотрении резкоизменяющегося ламинарного движения грунтовых вод).

Несколько условно мы в дальнейшем для упрощения речи позволяем себе пользоваться следующими терминами:

«*математической механикой жидкости*» или «*математической гидромеханикой*» мы именуем направление, в котором используется только дифференциальное представление механики жидкости или это представление имеет превалирующее значение;

«*технической механикой жидкости*» или «*технической гидромеханикой*» мы именуем научное направление, в котором используется только интегральное представление механики жидкости, или это представление имеет превалирующее значение.

Придерживаясь такой точки зрения и отождествляя термины «гидравлика», «техническая механика жидкости» и «техническая гидромеханика»², мы в нашем курсе не считали нужным без какой-либо практической надобности обременять

¹ Более подробно по этому вопросу см. нашу статью (Сборник научно-методических статей по гидравлике, вып. 4. — М.: Высшая школа, 1980).

² Именно эта точка зрения была единогласно принята на семинаре-совещании заведующих кафедрами гидравлики втузов СССР, состоявшемся 11–12 ноября 1976 г. (см. Сборник научно-методических статей по гидравлике, вып. 1. — М.: Высшая школа, 1977).

наш курс сведениями, заимствованными из другого курса — курса математической гидромеханики, что часто в настоящее время делают некоторые авторы. Наш опыт преподавания гидравлики показал, что «простые», на первый взгляд, вопросы гидравлики достаточно хорошо усваиваются студентами только с большим трудом. Излишне же усложняя эти вопросы чисто формальным использованием математического аппарата, мы при этом еще более затрудним изучение физических основ гидравлики, которые студент-гидротехник прежде всего должен твердо усвоить и ясно себе представлять. Говоря таким образом, мы вместе с тем не отрицаем пользы соответствующей тренировки студентов в области формального использования математического аппарата; однако возможности для такой тренировки (не в ущерб изучению физической сущности явлений) в современных условиях весьма ограничены.¹

Само собой разумеется, что предлагаемый курс гидравлики строится нами на основе только тех сведений по математике и теоретической механике, которые предусматриваются учебными программами (для гидротехнических специальностей втузов по указанным дисциплинам). При этом мы стремились придать изложению книги такой характер, который позволил бы студентам изучать гидравлику по предлагаемой книге с меньшей затратой труда и времени, чем по конспектам своих лекций.

При составлении курса гидравлики естественно возникает вопрос о последовательности изложения отдельных разделов данной дисциплины. Решение этого вопроса затрудняется тем, что в технической механике жидкости (в гидравлике) дается несколько различных классификаций движения жидкости, в связи с чем и общее построение курса, вообще говоря, может выполняться по-разному. Как видно будет из дальнейшего, нами при изложении практической части гидродинамики турбулентного потока была принята следующая система: вначале мы освещали так называемое плавное изменяющееся движение жидкости (где имеется свой законченный метод исследования), а затем резко изменяющееся движение жидкости (где также имеется свой особый подход к решению соответствующих задач). Такие вопросы, как ламинарное движение грунтовых вод, случай взвесенесущих потоков, ветровые волны, а также вопросы физического моделирования гидравлических явлений, пришлось излагать в конце книги как отдельные, как бы дополнительные, статьи к курсу.

Заметим, что разные главы курса гидравлики в отношении методики их преподавания носят сплошь и рядом совершенно различный характер. Например, раздел гидростатики в отношении методики его преподавания приближается к курсу теоретической механики; здесь при изучении соответствующего материала рационально проводить аудиторские практические занятия, решать небольшие задачи и т. п. Наряду с этим изучение таких разделов, как движение воды в каналах, сопряжение бьефов и т. п., вовсе не требует проведения аудиторных практических занятий; в этом случае для закрепления знаний студенту необходимо выполнять самостоятельные работы расчетного характера.

В курсе гидравлики встречаются также разделы, которые носят исключительно теоретический характер, как, например, основы теории моделирования гидравлических явлений и т. п. В связи со сказанным материалы практических

¹ Говоря о математике, необходимо учитывать, что в этой науке, как известно, изучаются так называемые математические модели, т. е. структуры, системы (иногда абстрактные), между элементами которых имеются те или другие логические связи. Для точного и краткого описания упомянутых логических связей был создан специальный так называемый «математический язык» («математическая речь»), т. е. «математический аппарат». Этот аппарат, как известно, не следует смешивать с существом самой науки математики, отождествляя при этом знание «математического аппарата» со способностью логически, т. е. математически, мыслить.

занятий в нашем курсе даются только в конце некоторых глав, причем эти материалы по своему характеру и построению различны в разных случаях. Стремиться здесь к какому-либо шаблону нет надобности.

В конце каждой главы приводится перечень соответствующих литературных источников, в которых более подробно освещаются вопросы, затронутые в учебнике. Само собой разумеется, что студент должен не только изучить основы гидравлики, но и иметь представление о той литературе, которая существует в данной области. В списки литературы мы вовсе не включали каких-либо журнальных научно-исследовательских статей, а, как правило, помещали только хорошо известные и общедоступные книги в виде монографий, руководств для проектирования и расчета, учебных пособий и т. п.

Было замечено, что студенты сравнительно легко усваивают те сведения, которые в той или иной мере поясняются в книге при помощи чертежей (а не только литературным текстом). Именно поэтому в книге приводится относительно много графического материала, причем наиболее важные чертежи, равно как и наиболее важные формулы, на которые учащимся следует обратить особое внимание, в тексте книги специально выделены: номера рисунков и формулы подчеркнуты тонкой линией, а некоторые особенно важные формулы взяты в рамку. Говоря о чертежах, необходимо учитывать, что ряд чертежей пришлось выполнять в искаженном масштабе (см., например, рис. 1-11 и др.) или в виде даже условных (часто безмасштабных) схем, на что, разумеется, следует обращать внимание студентов.

В книге имеется значительное количество сносок. Такое положение объясняется тем, что в них приводится, как правило, необязательный материал, которым нет основания перегружать основной текст; вместе с тем этот материал представляет интерес для читателя, желающего проникнуть в суть вопроса более глубоко.

При изложении курса гидравлики естественно возникает вопрос об используемой терминологии, об определениях различных понятий, а также о буквенных обозначениях соответствующих величин. В связи с составлением данного учебника, нами специально разрабатывалось возможное решение этого весьма важного вопроса, причем результаты этой разработки после многократного их рецензирования и консультаций со многими специалистами (относящимися к разным научным школам), были опубликованы в виде толкового словаря гидравлических терминов.¹ При выполнении этой работы мы убедились, что профессионалы, работающие в области технической гидромеханики, и профессионалы, работающие в области математической гидромеханики, достаточно часто используют различную терминологию и разные определения для одних и тех же понятий. Оказалось, что единства терминологии и определений для различных профессий добиться практически невозможно (что, впрочем, достаточно хорошо известно). В качестве примера здесь можно привести определение для понятия «жидкость»: в математической гидромеханике жидкость всегда определяется как сплошная среда; в технической же гидромеханике мы жидкостью называем физическое тело, обладающее определенными свойствами (сплошную же среду мы рассматриваем только как модель жидкости, которой в настоящее время удобно пользоваться); идеальной жидкостью инженеры называют «воображаемую жидкость,

¹ См. Р. Р. Чугаев. Гидравлические термины. — М.: Высшая школа, 1974. В этой брошюре приводится более 800 гидравлических терминов (на русском и немецком языках). При этом даются также рекомендуемые буквенные обозначения различных величин (представляющих интерес для лиц, работающих в области гидротехнических специальностей).

при любом движении которой отсутствуют силы трения»;¹ эту же идеальную жидкость специалисты в области математической гидромеханики определяют совсем другими словами, например, они пишут так:² «Назовем идеальной жидкостью ... такую среду, в которой вектор напряжений p_n на любой площадке с нормалью n ортогонален площадке, т. е. p_n параллелен n ».

Читая около 10 лет педагогам-гидравликам (вгузов СССР) методику преподавания гидравлики,³ мы обращаем внимание слушателей, в частности, на следующие три обстоятельства, которые необходимо иметь в виду и при использовании предлагаемого нами учебника (как, впрочем, и других учебников):⁴

1-е обстоятельство: в курсе гидравлики встречаются иногда представления и понятия, которые в связи с отсутствием времени, не удается разъяснять студентам подробно и совершенно точно; объяснять эти представления и понятия приходится в некоторой мере схематично (упрощенно, условно), что требует большого искусства;

2-е обстоятельство: естественно, что материал курса гидравлики с течением времени совершенствуется; часть его стареет и отмирает; вместе с тем в курсе гидравлики появляются различные современные, более совершенные трактовки различных вопросов; опыт показывает, что устаревший материал иногда задерживается в отдельных новых книгах (проникая в них в силу как бы своей «инерции»), причем в современных условиях такой устаревший материал иногда может выглядеть даже как ошибочный. В качестве примеров таких устаревших («ошибочных») фрагментов курса гидравлики (достаточно часто встречающихся в современной литературе) можно привести следующие: 1) освещение зависимости Ньютона о силе внутреннего трения [см. формулу (4-22)] без оговорки, что эта формула справедлива только для прямолинейного движения и только для «площадки действия», расположенной вдоль линий тока [в плоскости живого сечения силы трения также имеют место, хотя, согласно формуле (4-22), они оказываются равными нулю]; 2) ошибочную запись уравнения Бернулли [см. формулу (3-69)] для элементарной струйки реальной жидкости без члена $\pm \Delta E$, т. е. без учета «диффузии» энергии через боковую поверхность струйки; 3) встречающиеся высказывания, согласно которым движение реальной жидкости в общем случае осуществляется в сторону меньшего давления, а не в сторону меньшего напора (при определенном заданном пути движения); 4) отсутствие указаний на то, что в обычном случае потери напора обуславливаются только работой сил трения (а «не ударом» или «вихреобразованием» и т. п.; см. § 4-1); 5) указания на то, что жидкость ни при каких условиях не может выдерживать больших растягивающих напряжений; 6) отсутствие указания на то, что в обычных условиях давление в жидкости не может быть меньше «давления насыщенных паров»; 7) отсутствие указаний на то, что «гидродинамическое давление», в отличие от «гидростатического давления» есть величина фиктивная (см. § 3-1). Подобных примеров можно

¹ Иногда здесь добавляют еще, что такая жидкость «является абсолютно несжимаемой».

² См. Л. И. Седов. Механика сплошной среды. т. 1. — М.: Наука, 1976, с. 159.

³ При кафедре гидравлики ЛПИ, руководимой нами, открыта гидравлическая специальность на факультете повышения квалификации преподавателей.

⁴ Более подробно по вопросам преподавания гидравлики см. брошюру: Р. Р. Чу-гаев. О формировании специальностей на факультете втуза и преподавании общетехнических дисциплин: (учебное пособие для слушателей факультета повышения квалификации преподавателей). — Л.: изд. ЛПИ, 1977. См. также наши статьи в Сборнике научно-методических статей по гидравлике, выпуски 1, 2 и 3. — М.: Высшая школа, 1977, 1979, 1980.

привести много. Дополнительно следует отметить, что совершенствуя аппарат гидравлики, нам в ближайшее время при рассмотрении вопросов гидростатики (во второй главе курса), по всей видимости, придется вовсе опустить понятие «напора». Это понятие необходимо будет сохранить исключительно как «принадлежность» уравнения Бернулли, которое по существу не относится к гидростатике. Что же касается $H = z + p/\gamma$, то эту величину в гидростатике, как мы себе представляем, придется в будущем трактовать только как «суммарную потенциальную функцию» двух векторных силовых полей (см. § 2-8, п. 4°); сил тяжести и градиентов давления (напомним при этом в главе второй очень важное понятие потенциальной функции);

3-е обстоятельство: известно, что точность исходной информации и точность самого расчета (выполняемого на основе этой информации) должны соответствовать друг другу; в связи с этим, например, замена величины γ произведением $(\rho g)^1$ с методической точки зрения может быть оправдана только при условии, если наши гидравлические расчеты имеют точность, большую или равную той точности, с которой устанавливается величина g для земной поверхности.²

* * *

В предисловиях к предыдущим изданиям данного учебника мы отмечали целый ряд лиц, которые своими советами позволили улучшить качество нашего учебника.

При подготовке к печати настоящего издания, отражающего современную школу гидравлики ЛПИ, мы использовали отдельные частные замечания сотрудников кафедры гидравлики ЛПИ: В. Т. Орлова, А. Д. Гиргидова, А. А. Турсунова, Н. А. Яковлева, Е. Н. Кожевниковой, Г. Н. Косяковой, Б. А. Дергачева, В. П. Троицкого, Ю. В. Кокорина, В. В. Лебедева. Подготовку к печати этого издания, связанную с некоторой переработкой текста предыдущего издания и с составлением ряда новых фрагментов текста, нам помогла осуществить Е. А. Чугаева. Всем перечисленным лицам, а также Т. А. Виноградовой, оказавшей большую помощь при оформлении рукописи, приношу искреннюю благодарность. Приношу также благодарность рецензенту С. В. Избашу за ряд сделанных им замечаний.

Все пожелания и замечания просьба направлять по адресу: 191041, Ленинград, Д-41, Марсово поле, 1, Ленинградское отделение Энергоиздата.

Р. Р. Чугаев

¹ Об обозначениях γ , ρ и g — см. стр. 13.

² Известно, что точность гидравлических расчетов составляет обычно 3–5%; величина g (входящая обычным множителем в соответствующие зависимости) изменяется на земной поверхности в пределах 0,5%. Естественно, что в этих условиях, заменяя величину γ выражением ρg , мы как бы требуем учета изменяемости величины g , причем делаем грубую методическую ошибку, дезориентируя студентов.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ВВЕДЕНИЕ В ГИДРАВЛИКУ

§ 1-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАУКИ «ГИДРАВЛИКА»

При решении различных проблем часто приходится встречаться с вопросом о движении различных жидкостей, а также с вопросом о силовом (механическом) воздействии жидкости на те или другие поверхности и на обтекаемые ею твердые тела.

Исследование этих вопросов постепенно привело к созданию обширной науки, которую следует назвать «механикой жидкого тела», или «механикой жидкости», или (если пользоваться греческими словами) «гидромеханикой». Само собой разумеется, что механика жидкости (гидромеханика) разделяется на статику (гидростатику), кинематику и гидродинамику.

Можно сказать, что в механике жидкости (в гидромеханике) изучаются законы равновесия и движения различных жидкостей; очевидно, что в ней должны даваться также и способы практического приложения этих законов, т. е. разрабатываться соответствующие методы гидромеханических расчетов различных конструкций, устройств и т. п.

Существенно подчеркнуть, что механика жидкости (гидромеханика) в силу целого ряда причин развивалась за рубежом и у нас в России, а затем и в СССР, по двум направлениям:

1) по направлению, свойственному техническим наукам (изучаемым в технических учебных заведениях), и

2) по направлению чисто математическому (с использованием обширного и относительно сложного математического аппарата, изучаемого главным образом в университетах).¹

В связи со сказанным создалось положение, когда в области единой науки механики жидкости мы оказались вынужденными различать как бы две разные науки (строго говоря, два разных метода исследования): «техническую механику жидкости» («техническую гидромеханику»),² называемую часто «гидравликой» и изучаемую в технических учебных заведениях, и «математическую механику жидкости» («математическую гидромеханику»), изучаемую главным образом в университетах.

Различие между этими науками, имеющими один и тот же объект исследования, в частности, заключается в следующем.³

¹ Подробно по этому вопросу см. § 1-8.

² Надо учитывать, что техническая гидромеханика является, вообще говоря, частным видом прикладной гидромеханики (охватывающей интересы не только техники, но, например, и медицины, биологии и т. п.).

³ Более подробно этот вопрос освещается в § 3-1.

В технической механике жидкости (гидравлике) при решении различных практических задач широко используются те или иные допущения и предположения, упрощающие рассматриваемый вопрос. Достаточно часто гидравлические решения основываются на результатах экспериментов, и потому в технической механике жидкости приводят относительно много различных эмпирических и полуматематических формул. При этом стремятся к оценке только главных характеристик изучаемого явления и часто оперируют теми или иными интегральными и осредненными величинами, которые дают достаточную для технических приложений характеристику рассматриваемых явлений; например, в технической механике жидкости часто пользуются понятием средней скорости движения жидкости в том или другом поперечном сечении потока и т. п. По своему характеру техническая механика близка к известным дисциплинам — строительной механике и сопротивлению материалов, в которых под тем же углом зрения изучаются вопросы механики твердого тела. Следует учитывать, что гидравлика, являясь общетехнической дисциплиной, должна рассматриваться как «*профессиональная физика жидкого тела*», в которой, в частности, даются основы соответствующих гидромеханических расчетов, используемых при проектировании инженерных сооружений, конструкций, а также надлежащих технологических процессов.

В математической механике жидкости, как было отмечено, широко используется относительно сложный математический аппарат, не изучаемый в технических вузах. Этот аппарат прилагается также к несколько упрощенным схемам движения жидкости. Однако в этом методе исследования мы все же не прибегаем к различного рода допущениям и не оперируем различными осредненными величинами в такой мере, как в технической механике жидкости. Решения, получаемые в математической гидромеханике, оказываются более строгими в математическом отношении. По своему характеру математическая механика жидкости сходна (чисто формально) с математической теорией упругости (рассматривающей вопросы механики твердого тела), изучаемой в университетах.

Как показал опыт, методы математической механики жидкости сплюшь и рядом оказываются столь сложными, что громадное большинство практических задач, следуя этим методам, решить невозможно.¹ Этим и объясняется возникновение и развитие технической, прикладной науки — технической механики жидкости, т. е. гидравлики, которая стремится дать приближенные ответы на все те вопросы, связанные с движущейся или покоящейся жидкостью, которые ставит перед нами практика.

Можно сказать, что в технической гидромеханике (в гидравлике) приближенно решаются сложные задачи при помощи простых методов. В математической же гидромеханике относительно точно решаются только некоторые простейшие задачи при помощи сложных методов. Надо, впрочем, отметить, что в последнее время мы все чаще сталкиваемся с вопросами, которые приходится решать, сочетая методы технической и математической гидромеханики, причем иногда бывает трудно провести границу между этими двумя науками (вернее, между этими двумя методами, используемыми в области механики жидкости).

Необходимо отметить, что техническая механика жидкости (гидравлика), представляющая собой обширную самостоятельную, сложившуюся техническую науку, включает в себя много различных разделов, касающихся отдельных сторон рассматриваемой проблемы. Разумеется, эти разделы должны излагаться в курсах «Технической механики жидкости» для разных технических специальностей

¹ Заметим, однако, что в связи с применением ЭВМ в последнее время круг задач, решаемых методами математической механики жидкости, расширился.

различно. Например, для строительных специальностей приходится более подробно освещать те процессы, которые имеют место при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений; для машиностроительных специальностей — те процессы, с которыми мы сталкиваемся при проектировании и эксплуатации машин и т. д.

Из сказанного выше видно, что термины «гидравлика», «техническая гидромеханика» и «техническая механика жидкости» следует рассматривать как имеющие одинаковое значение (как бы синонимы). Необходимо учитывать, что само слово «гидравлика» произошло от слияния двух греческих слов, из которых первое значит «вода», а второе — «труба», «канал», «струя». Как видно, ранее считали, что гидравлика занимается изучением движения или покоя только воды. Однако в настоящее время термин «гидравлика» (а также «гидромеханика») понимается в более широком смысле: мы предполагаем, что объектом изучения в гидравлике является любая жидкость (а не только вода).

§ 1-2. ЖИДКОСТЬ

Как известно, различают твердые, жидкие и газообразные тела, а также плазму. При изменении давления или температуры жидкое тело может переходить в твердое или газообразное. Например, при очень высоких давлениях в обычной воде образуются кристаллы льда; наоборот, при снижении давления в жидкости могут появиться пузырьки, заполненные паром (газом).

Жидкость есть физическое тело, обладающее двумя особыми свойствами:

1) она весьма мало изменяет свой объем при изменении давления или температуры; в этом отношении жидкость сходна с твердым телом;

2) она обладает текучестью, благодаря чему жидкость не имеет собственной формы и принимает форму того сосуда, в котором она находится; в этом отношении жидкость отличается от твердого тела и является сходной с газом.

С тем чтобы пояснить свойство текучести жидкого тела, покажем на рис. 1-1 твердое тело T . В этом теле под действием, например, собственного веса должны возникнуть соответствующие напряжения. Если наметить произвольное сечение mn данного тела, то в этом сечении, так же как и в любом другом сечении, (исключая, разумеется, сечения, совпадающие с траекториями главных напряжений), помимо нормальных напряжений σ_m будут возникать еще касательные напряжения τ , т. е. напряжения, действующие вдоль намеченного сечения (касательно к нему).

Представим себе далее, что тело T , находясь в покое, приобрело такое состояние своего вещества, при котором оно оказывается неспособным воспринимать касательные напряжения τ , вызываемые, например, собственным весом. При этом, очевидно, тело T под действием собственного веса начнет растекаться и в конечном счете примет форму сосуда $ABCD$.

Как видно, текучесть рассматриваемого тела обуславливается тем, что оно в покоящемся состоянии не способно сопротивляться внутренним касательным усилиям, т. е. усилиям, действующим вдоль поверхностей сдвига.

Можно сказать, что второе свойство жидкости (см. выше п. 2) заключается в том, что жидкость, в отличие от твердого тела, находясь в покое, не может иметь касательных напряжений, и именно поэтому она принимает форму сосуда, в котором заключена.

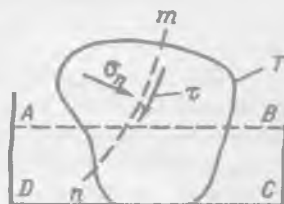


Рис. 1-1. Напряжения нормальное (σ_n) и касательное (τ)

Поскольку газ также обладает свойством текучести, то многие теоретические положения, разработанные применительно к жидкому телу, могут быть распространены и на случай газообразных тел. Однако в нашем курсе гидравлики вопрос о газе рассматривать не будем. Этому вопросу посвящается особая дисциплина, называемая «аэромеханикой» («механикой газа»).

Говоря далее только о жидкости, как пример ее, часто будем иметь в виду воду, которая характеризуется двумя упомянутыми свойствами (текучестью и малой сжимаемостью под действием силы).

Надо сказать, что в природе встречаются так называемые аномальные жидкости (краски, некоторые смазочные масла, суспензии и т. п.), которые в покое состоянии могут иметь небольшие касательные напряжения. Эти «жидкости» мы поясним весьма кратко в конце нашего курса (см. гл. 20).

§ 1-3. ПОНЯТИЯ РЕАЛЬНОЙ И ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ. ВЯЗКОСТЬ

Как показывает опыт, жидкости, встречающиеся в природе, т. е. реальные жидкости, столь мало изменяют свой объем при обычном изменении давления и температуры (см. § 1-4), что этим изменением объема практически можно пренебрегать. Поэтому в гидравлике жидкость рассматривается как абсолютно несжимаемое тело (здесь приходится делать исключение только при изучении одного вопроса — вопроса о так называемом гидравлическом ударе, когда даже малую сжимаемость жидкости приходится учитывать; см. гл. 9).

Выше было подчеркнуто, что в покое жидкости касательные напряжения всегда отсутствуют. В движущейся жидкости, как показывают исследования, касательные напряжения обычно имеют место: именно при движении жидкости по поверхностям скольжения жидких слоев друг по другу¹ возникает трение, которое и уравнивает внутренние касательные силы.

Свойство жидкости, обуславливающее возникновение в ней при ее движении касательных напряжений («напряжений трения»), называется вязкостью.

В практике встречаются случаи, когда силы трения, возникающие благодаря вязкости, оказываются небольшими сравнительно с другими силами, действующими на жидкость. В этих частных случаях вязкостью можно пренебречь и считать, что в движущейся жидкости касательные напряжения отсутствуют так же, как и в покое жидкости.

При аналитических исследованиях часто пользуются понятием идеальной жидкости. Идеальной жидкостью называют воображаемую жидкость, которая характеризуется:

а) абсолютной неизменяемостью объема (при изменении давления и температуры);

б) полным отсутствием вязкости, т. е. сил трения при любом ее движении.

Идеальная жидкость, в отличие от реальной («вязкой») жидкости, в природе, разумеется, не существует. Ее создают в воображении как некоторую приближенную модель реальной жидкости.

Из сказанного выше ясно, что:

1) при изучении покоей жидкости нет надобности различать реальную и идеальную жидкости;

2) при изучении же движения жидкости очень часто приходится считаться с различием между двумя названными жидкостями: в случае реальной жидкости необходимо дополнительно учитывать силы трения, т. е. вязкость.

¹ Точнее говоря, на поверхности соприкосновения жидких слоев друг с другом.

§ 1.4. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Многие физические свойства жидкостей изучаются в общей физике, а не в гидравлике. Гидравлика, представляя собой особый раздел профессиональной физики, занимается вопросами механики жидкости. Разумеется, при рассмотрении таких вопросов приходится интересоваться численными характеристиками различных свойств разных жидкостей.

1. Плотность жидкости ρ ; вес единицы объема жидкости γ . Возьмем некоторый объем V жидкости, имеющий массу M и вес G .

Как известно, плотностью жидкости ρ называется отношение массы M к объему V :

$$\rho = \frac{M}{V}; \quad (1-1)$$

следовательно,

$$M = \rho V. \quad (1-1')$$

Введем обозначение:

$$\gamma = \frac{G}{V}, \quad (1-2)$$

где γ — есть вес единицы объема жидкости (ранее эту величину называли «удельным весом» или «объемным весом»); как видно

$$G = \gamma V. \quad (1-2')$$

Нам известно, что

$$G = gM, \quad (1-3)$$

где g — ускорение свободного падения тела (ускорение силы тяжести).

Подставляя в (1-3) выражение (1-1') и (1-2'), имеем:

$$\gamma V = g\rho V, \quad (1-4)$$

откуда получаем следующую важную зависимость:¹

$$\rho = \frac{\gamma}{g}; \quad \gamma = \rho g. \quad (1-5)$$

Величины ρ и γ являются числами именованными:

$$\rho = \frac{[M^3]}{[L^3]}; \quad \gamma = \frac{[F]}{[L^3]} = \frac{[M]}{[T^2 L^2]}, \quad (1-6)$$

где M , L , F , T — символы соответственно массы, длины, силы и времени.

Численные значения ρ и γ для воды и некоторых других жидкостей [при различной температуре t° в градусах Цельсия ($^\circ\text{C}$)] приводятся в табл. 1-1]. Зависимостью ρ от давления, действующего на поверхность жидкости, и зависимостью γ от указанного давления, а также от величины g (имеющей место на поверхности земли) в этой таблице пренебрегаем. Здесь мы учитываем, в частности, что значение величины g на земной поверхности изменяется менее, чем на 0,5%; вместе с тем точность обычных гидравлических расчетов² составляет достаточно часто 3–5% и более. Именно поэтому значение величины g при выполнении гидравлических расчетов, относящихся к гидротехнической специальности, следует считать постоянным: $g = 9,8 \text{ м/с}^2 = \text{const}$.

¹ В рамку заключены особенно важные формулы.

² Необходимо всегда руководствоваться правилом (которое недопустимо нарушать): точность исходной информации должна соответствовать точности расчета, выполняемого на основе этой информации.

Плотность ρ и вес, отнесенный к единице объема жидкости («удельный вес»), γ некоторых жидкостей

Название жидкости	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	γ	
			кН/м^3	кгс/м^3
Вода	0	999.87	9,80537	999,87
	4	1000.00	9,80665	1000,00
	10	999.73	9,80400	999,73
	20	998.23	9,78929	998,23
	30	995.67	9,76419	995,67
	40	992.24	9,73055	992,24
	50	988.07	9,68966	998,07
Морская вода	15	1020–1030	10,00278–10,10085	1020–1030
Ацетон	15	790	7,74725	790
Бензин	15	680–740	6,66852–7,25692	680–740
Глицерин (безводный)	20	1260	12,2364	1260
Керосин	15	790–820	7,74725–8,04145	790–820
Масло веретенное	20	889	8,71811	889
Масло машинное	20	898	8,80637	898
Масло минеральное	15	890–960	8,72792–9,41438	890–960
Масло трансформаторное	20	887	8,69850	887
Нефть натуральная	15	700–900	6,86465–8,82598	700–900
Ртуть	0	13596	133,331	13596
Ртуть	20	13546	132,841	13546
Скипидар	18	870	8,53178	870
Спирт метиловый	15	810	7,94339	810
Спирт этиловый	15–18	790	7,74725	790
Чугун расплавленный	1200	7000	68,6465	7000
Эфир этиловый	15–18	740	7,25692	740

Для пресной чистой воды γ практически (после некоторого округления) равно:

$$\gamma = 10 \text{ кН/м}^3$$

(или $\gamma = 1 \text{ тс/м}^3 = 1000 \text{ кгс/м}^3 = 0,001 \text{ кгс/см}^3 = 1 \text{ гс/см}^3$).

2. Сжимаемость (или объемная упругость) жидкости. Представим себе некоторый объем жидкости V , который при повышении на Δp внешнего всестороннего давления (напряжения), действующего на него, уменьшается (снижается) на ΔV .

Упругой сжимаемостью жидкости называется способность её принимать свой прежний объем V после снятия внешней нагрузки Δp .

При небольших значениях Δp относительное изменение объема $\Delta V/V$ прямо пропорционально Δp . В соответствии с этим в качестве меры упругого сжатия жидкости принимают величину

$$K = - \frac{\Delta p}{\Delta V/V},$$

причем K называют модулем объемной упругости жидкости. Для воды (в обычных условиях) $K = 22 \cdot 10^5 \text{ кПа}$, т. е. $K \approx 220 \text{ кН/см}^2$ или $K \approx 22000 \text{ кгс/см}^2$.

3. Сопротивление жидкости растягивающим усилиям. Особыми физическими опытами было показано, что покоящаяся жидкость (в частности, вода, ртуть) иногда способна сопротивляться очень большим

растягивающим усилиям; например, вода в определенных условиях может выдерживать растягивающие напряжения до $2,8 \cdot 10^4$ кПа (≈ 280 кгс/см²), не подвергаясь разрыву [1-3].

Такого рода сопротивление растягивающим усилиям получается только, когда жидкость находится в особых условиях, не имеющих места в обыденной жизни. В § 1-5 будет отмечено, что жидкость в обычных условиях даже при наличии сжимающих напряжений, приближающихся к нулю, начинает уже обращаться в пар, т. е. перестает существовать.

Имея это в виду, в гидравлике считают, что жидкость вовсе не способна сопротивляться растягивающим усилиям.



Рис. 1-2. Условная схема взаимного притяжения тел

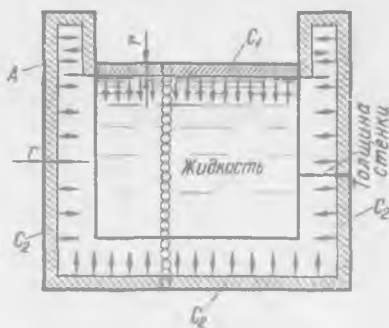


Рис. 1-3. Молекулярное давление C_1 — поверхностный слой жидкости, обуславливающий молекулярное давление

4. Сопротивление движущейся жидкости касательным усилиям. Выше было отмечено, что в движущейся реальной жидкости обычно возникают силы трения. Эти силы уравнивают внутренние касательные усилия, возникающие в жидкости под действием внешних сил. Величина сил трения зависит как от рода жидкости, так и от скорости относительного перемещения частиц жидкости. Этот вопрос подробно разъясняется далее на стр. 134—138; там же попутно приводятся соответствующие численные характеристики так называемой вязкости жидкости, от которой зависит величина сил трения.

5. Молекулярное давление. Жидкость состоит из молекул, которые при определенных условиях с некоторой силой притягиваются друг к другу.¹

Если представить ряд шариков (рис. 1-2), притягивающихся друг к другу с силой F , то ясно, что все они, за исключением крайних (A и B), будут находиться в безразличном состоянии: две силы F , приложенные к каждому внутреннему шару (со стороны соседних), взаимно уравниваются. Что касается крайних шариков A и B , то на каждый из них будет действовать только одна внешняя сила F , причем ясно, что весь «столбик», образованный взаимно притягивающимися шариками (рис. 1-2), должен быть сжат силой F .

Имея в виду условную схему на рис. 1-2, можно утверждать, что жидкость, находящаяся в сосуде (рис. 1-3), должна быть сжата своим поверхностным слоем C_1 , толщина которого равна радиусу r молекулярного действия. Напомним, что радиус r есть расстояние от центра данной молекулы до точки, где сила притяжения, вызываемая этой молекулой, пренебрежимо мала. Величина r весьма мала

¹ Физическая сторона возникновения этих сил притяжения нас в гидравлике не должна интересовать.

Давление, развиваемое тонким поверхностным слоем C_1 [который действует подобно поршню (прессу), приложенному к поверхности жидкости], как показали соответствующие опыты и расчеты, оказывается весьма большим, например для воды оно достигает примерно $11 \cdot 10^5$ кПа (11 000 атм). Это давление называется молекулярным давлением.¹

Малая сжимаемость жидкости, о чем говорилось ранее, и объясняется тем, что в большинстве случаев внешние силы сравнительно с молекулярным давлением являются незначительными.

Важно обратить внимание на следующие обстоятельства.

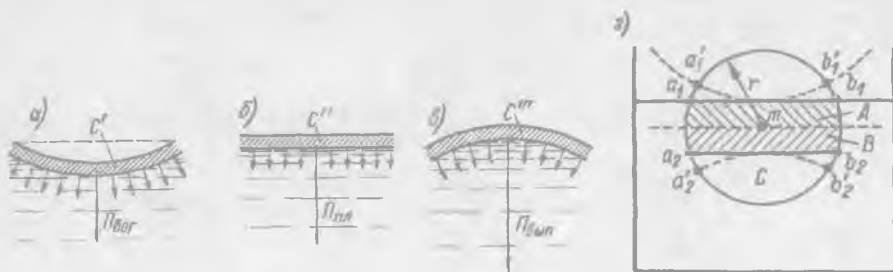


Рис. 1-4 Молекулярное давление поверхностной пленки различной кривизны ($P_{\text{вог}} < P_{\text{пл}} < P_{\text{вып}}$)

а) Считая, что поверхностный слой C_1 жидкости (рис. 1-3)² является совокупностью притягивающихся молекул A (рис. 1-2), можно доказать (основываясь на самых простых соображениях механики), что молекулярное давление $P_{\text{пл}}$, развиваемое плоской поверхностной пленкой C'' (равное для воды $11 \cdot 10^5$ кПа, т. е. $11000 \text{ кгс/см}^2 = 11000 \text{ атм}$; рис. 1-4, б), всегда должно быть меньше молекулярного давления $P_{\text{вып}}$, развиваемого выпуклой поверхностной пленкой C''' (рис. 1-4, в), и больше молекулярного давления $P_{\text{вог}}$, развиваемого вогнутой поверхностной пленкой C' (рис. 1-4, а):

$$P_{\text{вог}} < P_{\text{пл}} < P_{\text{вып}}$$

Это положение в курсах общей физики доказывается (для «плоской задачи») следующим образом.

Рассматриваем молекулу жидкости m , находящуюся вблизи свободной поверхности жидкости a_1b_1 (рис. 1-4, г). Другие молекулы, находящиеся в пределах окружности, описанной радиусом молекулярного действия r (см. чертеж), притягивают рассматриваемую молекулу m . Притяжением молекул воздуха пренебрегаем.

Силы притяжения, приложенные к молекуле m со стороны молекул, находящихся в области A (см. чертеж), уравновешиваются силами притяжения молекул, находящихся в области B (симметричной области A). Как видно, можно считать, что рассматриваемая молекула притягивается к низу только теми молекулами, которые находятся в области C , ограниченной сверху горизонтальной линией a_2b_2 (в случае плоской свободной поверхности a_1b_1) или кривой $a'_2b'_2$ (в случае вогнутой свободной поверхности $a'_1b'_1$).

Так как площадь C , ограниченная сверху линией a_2b_2 , всегда больше, чем площадь C , ограниченная сверху линией $a'_2b'_2$, то заключаем, что $P_{\text{вог}} < P_{\text{пл}}$ (поскольку сила притяжения F должна возрастать с возрастанием объема области C , охватывающей те молекулы, которые притягивают молекулу m к низу).

¹ Как видно, можно условно считать, что упомянутый весьма тонкий молекулярный слой образован как бы очень тяжелой жидкостью («вес» которой и вызывает отмеченное большое давление в 11 000 атм.). Учитывая это, легко понять причину, в силу которой, например, стальная иглолка, рассматриваемая в курсах физики, может плавать на поверхности воды.

² Рисунки 1-3–1-7 (как и многие другие) представляет собой безмасштабные схемы.

Рассуждая аналогично, получаем, что $P_{пл} < P_{вып}$.

б) Молекулы жидкости, покоящейся в сосуде *A* (рис. 1-3), следует рассматривать в совокупности с частицами (атомами или ионами) того материала, из которого выполнены стенки сосуда *A*. При этом легко понять, что система «жидкость — стенки сосуда» будет равномерно сжата поверхностными слоями со всех сторон (см. заштрихованные поверхностные слои: жидкости S_1 и материала стенок сосуда S_2).

Отсюда вытекает следующее: молекулярное давление, как бы оно ни было велико, не может разрушить сосуд, в котором находится жидкость. Это давление внешне не проявляется и не может быть измерено каким-либо простым

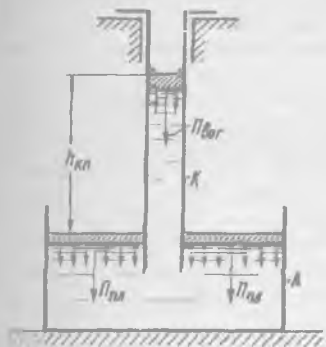


Рис. 1-5. Капиллярное поднятие, обусловливаемое разностью молекулярных давлений ($P_{пл} - P_{воп}$)

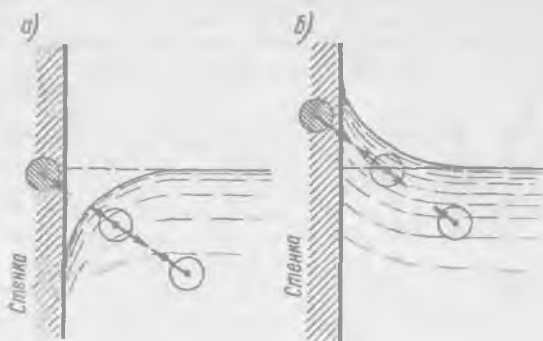


Рис. 1-6. «Несмачиваемая» (а) и «смачиваемая» (б) стенки

прибором. В связи с этим, говоря о давлении внутри жидкости или о давлении жидкости на ту или другую стенку, мы далее не будем учитывать молекулярного давления, считая, что оно как бы совсем не существует. Исключение здесь будет составлять только вопрос о капиллярности (см. п. 6).

Выше в п. 3 было отмечено, что в жидкости иногда могут возникнуть растягивающие усилия. Подчеркнем теперь, что такое растяжение следует понимать только как снижение молекулярного сжимающего давления, обусловленного плоской поверхностной пленкой.

6. Капиллярное поднятие жидкости. Вопросы капиллярности являются весьма существенными в области гидротехники.

Покажем на рис. 1-5 сосуд *A*, наполненный жидкостью, и капиллярную трубку *K*, один конец которой опущен в жидкость. Выше было показано, что жидкость в сосуде находится под давлением $P_{пл}$ (развиваемым своим собственным плоским поверхностным слоем).

Обратимся теперь к рассмотрению жидкости в капиллярной трубке. Как видно из рис. 1-6, в районе примыкания поверхности жидкости к стенке трубки можем получить одну из следующих картин:

если взаимное притяжение двух молекул жидкости велико сравнительно с притяжением молекул жидкости к частице твердой стенки, то получаем схему рис. 1-6,а (случай «несмачиваемой стенки»);

если же взаимное притяжение двух молекул жидкости мало сравнительно с притяжением молекул жидкости к частице твердой стенки, то получаем схему на рис. 1-6,б (случай «смачиваемой стенки»).

В том случае, когда диаметр трубки уменьшается, противоположные стенки трубки сближаются, причем схема на рис. 1-6,а приводит нас к выпуклой поверхностной пленке — к выпуклому мениску (рис. 1-7,а); схема же на рис. 1-6,б — к вогнутой поверхностной пленке, т. е. к вогнутому мениску в трубке (рис. 1-7,б).

Имея это в виду, можем сказать, что если на поверхность жидкости в сосуде (рис. 1-5) наложен как бы поршень (пресс), развивающий давление P (для воды

$P_{пл} = 110 \text{ кПа}$)¹, то на поверхность жидкости в трубке наложен поршень, развивающий давление или $P_{вып}$ или $P_{вог}$ (рис. 1-5).

Под действием разности давлений $P_{пл}$ и $P_{вог}$ и происходит поднятие жидкости в «смачиваемой» трубке на высоту $h_{кп}$ (рис. 1-5); под действием же разности давлений $P_{вып}$ и $P_{пл}$ происходит опускание жидкости в «несмачиваемой» трубке.

Жидкость, находящаяся в трубке (рис. 1-5) и расположенная выше уровня жидкости в сосуде, называется капиллярной, в отличие от остальной жидкости, которая иногда называется здесь гравитационной. Надо подчеркнуть, что никакого различия между капиллярной и гравитационной жидкостями в отношении их физических свойств нет. Законы равновесия и движения жидкости совершенно одинаковы для капиллярной и гравитационной областей. Единственное отличие капиллярной жидкости от гравитационной заключается в том, что первая названная жидкость сжимается несколько меньшим поверхностным молекулярным давлением.

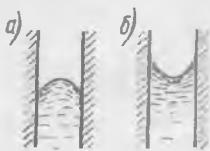


Рис. 1-7. Мениск в случае «несмачиваемой» (а) и «смачиваемой» (б) трубки

Величина $h_{кп}$, показанная на рис. 1-5, называется максимальной (для данного диаметра трубки) высотой капиллярного поднятия жидкости в трубке. Чем меньше диаметр капилляра, тем сильнее искривляется мениск и тем значительнее молекулярное давление в капилляре ($P_{вог}$ или $P_{вып}$) отличается от молекулярного давления в сосуде ($P_{пл}$). В соответствии с этим при уменьшении диаметра капиллярной трубки высота $h_{кп}$ на рис. 1-5 должна увеличиваться. В случае, когда высота трубки меньше $h_{кп}$, высота капиллярного поднятия будет равна возвышению верха трубки над горизонтом жидкости в сосуде.

Помимо изложенного выше объяснения причин капиллярности, в литературе часто приводится и иная (условная) точка зрения на данный вопрос, в основу которой кладется представление о гипотетической (предположительной, в данном случае несуществующей) силе так называемого поверхностного натяжения. Здесь предполагается, что поясненное выше молекулярное давление обуславливается не взаимным притяжением молекул (см. выше), а натяжением («поверхностным натяжением») некоторой несуществующей (воображаемой) упругой пленки, обтягивающей рассматриваемый объем жидкости; при этом сила растяжения («натяжения») этой пленки принимается такой, чтобы она вызвала реально существующие силы поверхностного молекулярного давления, обусловленные взаимным притяжением молекул (притяжением, которое в этом случае исключается из непосредственного рассмотрения). Как видно, гипотетическое поверхностное натяжение имитируют силы взаимного притяжения молекул, которые в отличие от «поверхностного натяжения» реально существуют. При этом, исходя из этих сил (зная величину молекулярного давления), можно решать (вовсе не используя условное понятие «поверхностного натяжения») все интересующие нас практические задачи на основании обычных правил механики.

Важно подчеркнуть, что непосредственно на внутренней поверхности капиллярной трубки (диаметром D), по-видимому, образуется весьма тонкий слой воды (толщиной δ , измеряемый, возможно, долями миллиметра), механические характеристики которого отличны от механических характеристик обычной воды. Согласно модели, предлагаемой отдельными специалистами, указанный слой может быть назван слоем «твердой воды». Считают, что такая твердая вода, рассматриваемая как сплошная среда, способна, находясь в покое, выдерживать (в отличие от обычной воды) касательные напряжения τ . Отсюда ясно, что в соответствии с отмеченной моделью, когда $D < 2\delta$, вода в тонкой трубке при определенных условиях не в состоянии будет двигаться (преодолевая касательные напряжения τ). В таких условиях подобные трубки не должны пропускать воду.

¹ Что соответствует в старой системе единиц $\approx 11\,000$ атм.

§ 1-5. ОСОБЫЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТИ

В практике гидротехнического строительства приходится сталкиваться со случаями, когда жидкость (вода) начинает приобретать особые состояния: или при движении жидкости к ней начинают присоединяться газообразные или твердые тела, или она сама начинает переходить в твердое или газообразное состояние.

Рассмотрим эти два случая (имея в виду воду, как пример жидкости).

1-й случай. Присоединение к движущейся жидкости газообразных и твердых тел.

1. Аэрация потока. Если к потоку воды, движущейся с большими скоростями, имеется доступ наружного воздуха, то поток может насыщаться проникающими в него снаружи пузырьками воздуха. В результате получается смесь воды и пузырьков воздуха (получаем так называемую двухфазную систему). Такое явление называется аэрацией потока.¹

2. Захват потоком наносов. Если водный поток имеет размываемое русло (например, русло, образованное мелким песком), то, как показывает опыт, при достаточно больших скоростях движения воды поток начинает насыщаться песчинками, которые движутся вместе с водой во взвешенном состоянии. Здесь также получаем двухфазную систему. Обычно, помимо взвешенных песчинок, имеются еще песчинки, перемещающиеся непосредственно по дну русла.

2-й случай. Переход воды в твердое или газообразное состояние.

1. Образование в воде кристаллов льда. При повышении давления или при снижении температуры в воде могут зародиться кристаллы льда, причем вместо однородной жидкой среды получаем двухфазную систему (вода плюс лед).

2. Образование в воде областей (разрывов), заполненных воздухом и парами воды. Кипение и кавитация [1-5]. Обычно в воде содержится растворенный воздух. Как известно из курса физики, при снижении давления p в жидкости или при повышении ее температуры t такой воздух начинает выделяться из отдельных элементарных объемов воды, причем в воде образуются разрывы (воздушные «пузыри»). В результате сплошность воды нарушается: до тех пор, пока пузырьки воздуха не выйдут из нее через ее свободную поверхность, будем иметь двухфазную систему (вода плюс воздушные пузырьки).

Рассмотрим далее воду, не содержащую растворенного воздуха.

Обозначим через $p_{н.п}$ давление паров воды, насыщающих то пространство, в котором они находятся. Величину $p_{н.п}$ обычно называют «давлением насыщенных паров». Известно, что $p_{н.п}$ зависит от температуры t паров:

$$p_{н.п} = f(t^{\circ}). \quad (1-7)$$

Численные значения $p_{н.п}$ для паров воды (в зависимости от t°) следующие:

t°, C	0	25	50	75	100	125	150
$p_{н.п}, кПа$	0,6	3,2	12,6	39,2	103,2	237,0	485,0
$p_{н.п}, кгс/см^2$	0,006	0,032	0,126	0,392	1,032	2,370	4,850

Как видно, с увеличением t° увеличивается и $p_{н.п}$.

Предположим, что мы имеем некоторый объем воды, сплошность которого не нарушена. Обозначим давление в этой воде через p и температуру ее через t° .

¹ Аэрацией также называют и растворение воздуха в воде.

Представим себе далее, что в силу тех или других причин температура t начинает увеличиваться или давление p — уменьшаться. Очевидно, в связи с этим в некоторый момент времени можем получить соотношение:

$$p < p_{н.п.} \quad (1-8)$$

Как показывает опыт, при таком соотношении в обычных условиях внутри рассматриваемого объема воды возникают пузырьки, заполненные «насыщенными парами» воды. При этом мы получаем двухфазную систему (вода плюс пузырьки пара). Чтобы заставить эти пузырьки захлопнуться (закрыться), необходимо добиться соотношения:

$$p > p_{н.п.} \quad (1-9)$$

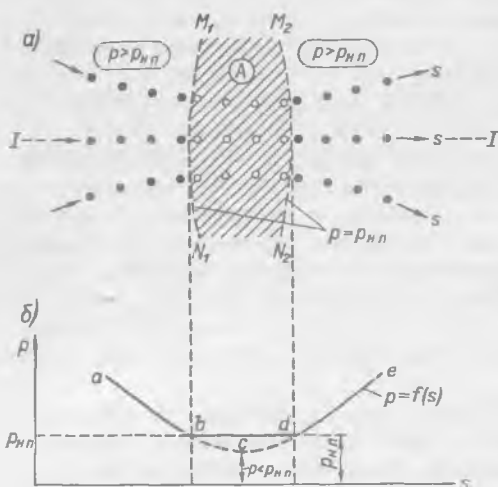


Рис. 1-8. Явление кавитации
 M_1N_1 — место раскрытия пузырьков пара; M_2N_2 — место захлопывания их

т. е. необходимо на достаточную величину или повысить давление p , или понизить давление $p_{н.п.}$ (за счет снижения температуры t°).

Появление в воде пузырьков пара (а если вода предварительно не была очищена от растворенного в ней воздуха, то — паровоздушных пузырьков) называется *кавитацией* (от латинского слова «пустота»).

Можно различать (условно) как бы два разных явления, возникающих при соотношении (1-8):

а) кипение воды, когда кавитационные пузырьки (паровые или паровоздушные), возникающие в воде, всплывают и выходят из жидкости через ее свободную поверхность;

б) кавитацию (при отсутствии кипения), когда упомянутые

пузырьки, возникающие в движущейся воде, не выходят из нее, а захлопываются (закрываются) внутри потока воды.

Чтобы дополнительно пояснить явление кавитации (при отсутствии кипения) представим на рис. 1-8, а поток воды, давление вдоль которого (вдоль линии $I-I$), согласно правилам гидравлики (см. ниже), должно измениться, как показано кривой $abcde$ на рис. 1-8, б. В зоне A потока, заштрихованной на рисунке, давление $p < p_{н.п.}$. Линии M_1N_1 и M_2N_2 являются границами этой зоны; во всех точках этих границ $p = p_{н.п.}$.

В элементарных объемах воды, движущихся в направлении стрелок, при пересечении ими границы M_1N_1 возникнут пузырьки пара; в самой зоне A будем иметь двухфазную систему; в районе границы M_2N_2 , как показывает опыт, пузырьки пара, попадая в область, где $p > p_{н.п.}$ очень быстро и с большой силой захлопываются, причем за линией M_2N_2 получаем сплошную среду (такую же, как и перед линией M_1N_1).

Существенно подчеркнуть, что появление в воде пузырьков пара (разрывов) в районе зоны A (рис. 1-8, а) препятствует снижению давления в этой зоне до величины, меньшей $p_{н.п.}$. Вследствие появления пузырьков пара вместо кривой $abcde$ (рис. 1-8, б) получаем кривую $abde$, показанную сплошной линией (на участке bd — горизонтальной).

Следует считать, что практически давление p в воде, в силу сказанного, не может быть меньше величины $p_{н.п.}$

Упомянутое выше захлопывание пузырьков пара в районе границы M_2N_2 сопровождается сильными ударами, которые иногда способствуют постепенному разрушению поверхности твердых стенок, ограничивающих поток.¹ Такое разрушение твердых стенок называется кавитационной эрозией.

**§ 1-6. МОДЕЛЬ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ,
ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ПРИ РЕШЕНИИ ВОПРОСОВ МЕХАНИКИ
(В ЧАСТНОСТИ, МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ).
СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЖИДКОСТЬ.
НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЖИДКОСТИ**

Однородная жидкость, которую мы далее, как правило, и рассматриваем, представляет собой не сплошное (не непрерывное) тело, а тело, состоящее из молекул, расположенных на некотором (весьма небольшом) расстоянии друг от друга. Как видно, жидкость имеет, строго говоря, прерывную (дискретную) структуру. Однако при решении различных гидромеханических задач пренебрегают отмеченным обстоятельством и рассматривают жидкость как сплошную (непрерывную) среду — континуум (от лат. *continuum* — непрерывное, сплошное). Как видно, при рассмотрении жидкости поступают так же, как и при рассмотрении твердых тел (в строительной механике) или при рассмотрении сыпучих тел (песка — в механике грунта).

Модель сплошной среды имеет свою теорию, одинаково применимую (разумеется до определенного предела) и к твердым, и к сыпучим телам, и к жидкости.

Выше мы видели, что только в редких случаях жидкость получает существенные разрывы (см. § 1-5). Однако часто и такие разрывы мы исключаем из рассмотрения, причем и здесь пользуемся моделью сплошной среды.

Существенно подчеркнуть, что заменив для расчета жидкость сплошной средой, мы приписываем этой сплошной среде те механические свойства, которые были найдены экспериментальным путем для действительной жидкости (в данном случае — для воды); при этом, оперируя сплошной средой, обладающей указанными физическими (механическими) свойствами, мы такое воображаемое тело всюду далее условно называем жидкостью (водой).²

Что касается сил, действующих на воду (рассматриваемую в виде описанной сплошной среды), то их необходимо разделить на две различные группы: внутренние силы, именуемые иногда усилиями, и внешние силы. Внутренними силами называются силы взаимодействия между материальными точками (частицами) жидкости (рассматривая жидкость, как сплошную среду, мы, разумеется, имеем право говорить о «частицах» жидкости, т. е. об элементарных объемах жидкости). Внешние силы — суть силы, приложенные к частицам рассматриваемого объема жидкости со стороны других

¹ Можно думать, что большая сила удара обуславливается здесь тем, что при захлопывании парового пузырька мгновенно исчезает (снимается) молекулярное давление с поверхностей воды, ограничивающих паровой пузырек; см. § 1-4, п. 5, где отмечается, что это давление равно, например, 110 кПа (т. е. $\approx 11\,000$ атм.). Исчезновение поверхностной пленки с некоторым сдвигом во времени по отношению к полному исчезновению пузырька, по-видимому, и обуславливает удар большой силы (вызванный расширением жидкости, с которой снято большое сжимающее усилие).

² Считая жидкость, как правило, практически несжимаемой, мы, естественно, и сплошную среду (как модель) также полагаем несжимаемой (исключение здесь составляет только вопрос о гидравлическом ударе; см. § 9-8—9-12).

вещественных тел (или физических полей), в частности, со стороны жидкости, окружающей рассматриваемый ее объем.

Внешние силы, действующие на данный объем жидкости, в свою очередь, могут быть разделены также на две группы:

1) Силы массовые. Эти силы действуют на все частицы, составляющие рассматриваемый объем жидкости: величина этих сил пропорциональна массе жидкости. В случае однородной жидкости, т. е. жидкости, имеющей всюду одинаковую плотность ($\rho = \text{const}$), величина массовых сил будет пропорциональна также объему жидкости; поэтому при $\rho = \text{const}$ массовые силы можно называть объемными силами (что мы далее и будем делать). К числу объемных сил относится собственный вес жидкости; силы инерции жидкости также можно рассматривать как внешние объемные силы. Интенсивность (плотность распределения) объемных сил в различных точках пространства, занятого жидкостью, в общем случае может быть разной. В частном случае, когда интенсивность действия объемных сил одинакова во всех точках пространства, занятого жидкостью, величина объемной силы F , приложенной к данному объему V жидкости, равна

$$F = M\phi \text{ или } F = V\phi_0, \quad (1-10)$$

где M — масса объема V жидкости; ϕ и ϕ_0 — интенсивность (плотность распределения) рассматриваемой внешней силы, причем ϕ_0 является удельной объемной силой, отнесенной к единице объема жидкости и ϕ — удельной объемной силой, отнесенной к единице массы жидкости (по существу величина ϕ представляет собой ускорение, которым характеризуется рассматриваемое поле объемных сил).

2) Силы поверхностные. Эти силы приложены к поверхности, ограничивающей рассматриваемый объем жидкости, выделенный, например, внутри покоящейся или движущейся жидкости (см. объем $ABCD$ жидкости на рис. 1-9). При равномерном распределении этих сил по данной поверхности величина их пропорциональна площади этой поверхности. К числу таких сил относятся, например, атмосферное давление, действующее на так называемую свободную поверхность жидкости, а также силы трения, о которых говорили в § 1-3 (действующие по поверхности, намеченной внутри жидкости). Изучая механическое действие жидкости на поверхность какого-либо твердого тела, можно говорить о реакции этой поверхности, т. е. реактивной силе, приложенной к жидкости со стороны твердого тела. Такая сила также должна рассматриваться как внешняя поверхностная сила (по отношению к объему жидкости, ограниченному поверхностью упомянутого твердого тела). В общем случае плотность распределения поверхностной силы (т. е. напряжение) в различных точках рассматриваемой поверхности может быть различной. В частном случае, когда поверхностная сила P распределяется равномерно по рассматриваемой поверхности площадью S , величина этой силы

$$P = S\sigma, \quad (1-11)$$

где σ — напряжение, вызываемое рассматриваемой внешней поверхностной силой. Из дальнейшего будет видно, что напряжения σ внешней поверхностной силы в некоторых случаях (например, в случае движущейся реальной жидкости со скоростью v) оказываются не ортогональными к площадкам mn , на которые они действуют (см. рис. 1-9). В этом случае напряжение σ можем разложить на две составляющие: а) нормальную составляющую, которую можно назвать нормальным напряжением σ_n , и б) касательную составляющую, которую можно назвать касательным напряжением τ .

Само собой разумеется, что при изучении сил, действующих на жидкое тело, так называемые сосредоточенные силы должны исключаться из рассмотрения.

Что касается напряженного состояния жидкости, рассматриваемой как сплошная среда, то этот вопрос легко себе представить на основе тех сведений, которые сообщались, например, в курсе сопротивления материалов применительно к твердому телу.

Имеем объем V жидкости, напряженный некоторыми сжимающими его силами.¹ Выделяем в нем у рассматриваемой точки M элементарный объем δV , причем у точки M намечаем элементарную площадку $m-n$ («площадку действия») определенной ориентировки (т. е. определенного наклона).²

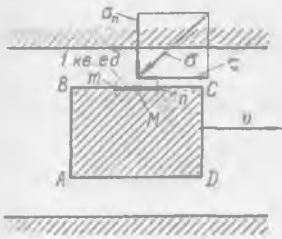


Рис. 1-9. Объем $ABCD$, выделенный внутри жидкости (движущейся со скоростью v); σ — напряжение поверхностной силы, действующей на грань BC

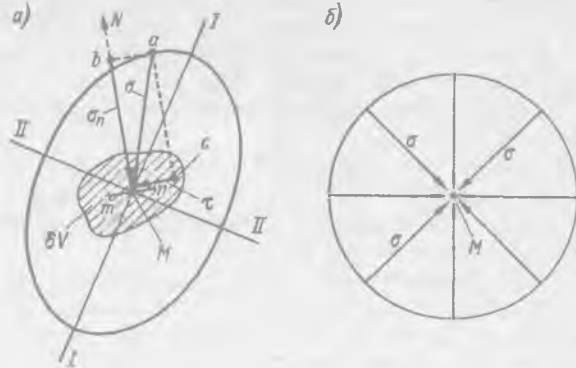


Рис. 1-10. Напряжение в заданной точке M сплошной среды: a — эллипс напряжений, b — «шаровая поверхность напряжений» ($\sigma = \text{const}$; $\tau = 0$) ($I-I$) и ($II-II$) — главные оси деформации; ($m-n$) — произвольно ориентированная «площадка действия», намеченная в точке M ; σ_n и τ — нормальное и касательное напряжения в точке M для «площадки действия» $m-n$

Напряжение в точке M , принадлежащей площадке $m-n$ (площадью равной, например, 1 кв. ед.), обозначим через σ . Это напряжение, как известно, представляет собой векторную величину (рис. 1-9), причем данная величина с изменением ориентировки (угла наклона) площадки $m-n$ должна в общем случае изменять и свое значение (модуль) и свое направление (по отношению к площадке действия). Обозначим, как то было сказано выше (рис. 1-9):

- а) нормальное (к площадке действия) напряжение через σ_n ;
- б) касательное (к площадке действия) напряжение через τ .

¹ Выше мы условились не рассматривать особые случаи жидкости, когда она подвергается растяжению. Исключая далее из рассмотрения растягивающие напряжения, сжимающие напряжения будем считать положительными (как это делается, например, всюду в курсах механики грунта и других случаях, характеризующих полным отсутствием растягивающих напряжений; подробнее см. сноску на стр. 33).

² Далее нам придется часто пользоваться выражением: «элементарная площадка», намеченная внутри жидкости, и «элементарный объем» жидкости. «Элементарной площадкой» будем называть весьма малую площадку, удовлетворяющую условию: соответствующие координаты (x, y, z) ее точек, также как и величины r и u (см. далее § 3-1), относящиеся к этим точкам, отличаются друг от друга на бесконечно малую величину. «Элементарный объем» определяется аналогично.

Известно, что для данной точки M сплошной напряженной среды можно построить, рассматривая плоскую задачу, так называемый эллипс напряжений (эллипс Ляме), при помощи которого поясняется, как в зависимости от ориентировки площадки действия $m-n$ изменяются напряжения σ , σ_n и τ , относящиеся к рассматриваемой точке M .

Такой эллипс напряжений показан на рис. 1-10,а. Взаимно ортогональные оси $I-I$ и $II-II$ эллипса будем называть главными осями деформаций элементарного объема δV .¹ Известно, что касательные напряжения τ для «площадок действия», ортогональных к главным осям $I-I$ и $II-II$ равны нулю: $\tau_{I-I} = \tau_{II-II} = 0$; нормальные напряжения для этих площадок называются главными напряжениями и обозначаются через σ_1 (большее напряжение) и через σ_2 (меньшее напряжение).

Рассматривая для точки M некоторую произвольно ориентированную площадку действия $m-n$, имеем для нее (рис. 1-10,а):

вектор Ma , конец которого (точка a) лежит на эллипсе; этот вектор дает нам значение (модуль) и направление напряжения σ ; $\sigma = Ma$;

нормаль MN , вдоль которой действует в данной точке нормальное напряжение σ_n ; $\sigma_n = Mb$;

отрезок Mc , ортогональный к нормали MN , выражающий касательное напряжение τ ; $\tau = Mc$.

Следует запомнить, что эллипс напряжений очерчивается по концу вектора σ , а не по концу вектора σ_n .

При рассмотрении пространственной задачи вместо эллипса напряжений получаем в общем случае трехосный эллипсоид напряжений, причем в этом случае будем иметь уже не два главных напряжения (σ_1 и σ_2), а три главных напряжения (σ_1 , σ_2 , σ_3).

Известно, что в частном случае, когда в рассматриваемом напряженном теле отсутствуют касательные напряжения (такой случай может иметь место, например, когда данное твердое тело является невесомым, причем оно подвергнуто всестороннему равномерному сжатию) эллипсоид напряжений обращается в шаровую поверхность (рис. 1-10,б). Следовательно, при отсутствии касательных напряжений (в рассматриваемом теле) значение (модуль) полного напряжения в любой точке данного тела не зависит от ориентировки площадки действия.

§ 1-7. СОСТАВ КУРСА ГИДРАВЛИКИ

ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ГИДРАВЛИКИ

Курс гидравлики (технической механики жидкости) разбивается на два раздела: гидростатику, где рассматривается покоящаяся жидкость и гидродинамику, где изучается движущаяся жидкость.²

Раздел, посвященный гидростатике, сравнительно невелик (глава 2). Что касается раздела гидродинамики, то он, в свою очередь, разбивается на две основные части.

¹ Напомним, что в каждой точке напряженного тела существуют три взаимно ортогональных элемента, которые и после деформации остаются взаимно ортогональными. Вдоль этих элементов и направлены главные оси деформации. Главные оси деформации в случае однородного изотропного тела совпадают с главными осями эллипса напряжений (эллипса напряженного состояния в рассматриваемой точке).

² В разделе «Гидродинамика» мы в некоторой мере освещаем и вопросы кинематики (т. е. «геометрии движения») жидкости.

Первая часть гидродинамики (главы 3 и 4) посвящается научным основам гидродинамики. В этой части даются основные понятия и определения, выводятся и поясняются общие уравнения гидравлики, рассматривается вопрос о силах трения в жидкости.

Вторая (наиболее обширная) часть гидродинамики посвящается различным практическим приложениям. В этой части поясняются расчеты движения жидкости в трубопроводах и открытых руслах, рассматривается истечение жидкости через отверстия, даются расчеты движения воды в порах грунта и т. п.

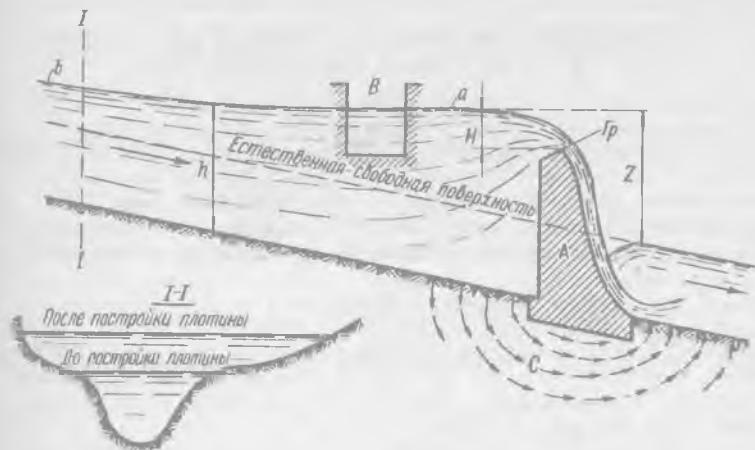


Рис. 1-11. Схема гидроузла (в искаженном масштабе)
 А — плотина; В — канал; С — область фильтрации воды под плотиной

Для примера на рис. 1-11 представлен (в искаженном масштабе) продольный вертикальный разрез реки, прегражденной плотиной А. Эта плотина создает подпор воды в реке, причем часть воды переливается через плотину, другая же часть ее поступает в канал В, который отводит воду из реки к месту расположения гидростанции или на поля орошения и т. п.

Проектируя гидротехнический узел сооружения, показанный на рис. 1-11, приходится, используя аппарат гидравлики, решать следующие практические вопросы:

1. Подпор Z, созданный плотиной, обуславливает затопление берегов. С тем чтобы определить степень затопления берегов в различных местах реки, необходимо по правилам гидравлики построить кривую *ab* — свободную поверхность потока, которая получается после постройки плотины. Кривую *ab* надо знать также и для того, чтобы оценить глубины *h* в реке, необходимые, например, для судоходства.

2. Чтобы обеспечить пропуск воды в определенном количестве через гребень плотины, необходимо иметь достаточную длину этого гребня и высоту *H* (см. чертеж), которые также устанавливаются по правилам гидравлики.

3. Вода, переливаясь через плотину, может подмыть плотину с низовой ее стороны. Поэтому за плотиной должны быть созданы такие гидравлические условия, при которых опасный размыв дна реки был бы невозможен.

4. Если плотина построена на песчаном основании, то вода будет просачиваться через грунт основания, как это показано стрелками на чертеже. Это просачивание (фильтрацию воды) приходится оценивать соответствующими гидравлическими расчетами.

5. Наконец, необходимые размеры отводящего канала В и размеры трубопроводов, устраиваемых перед гидростанцией, также должны определяться при помощи гидравлических расчетов.

Аппарат гидравлики широко используется не только при проектировании, постройке и эксплуатации объектов энергетического, воднотранспортного и гидромелиоративного

строительства. Этот аппарат также находит широкое применение при проектировании систем водоснабжения и канализации, гидравлических машин и т. п.

Следует подчеркнуть, что в учебном курсе гидравлики даются только основы этой дисциплины. Дальнейшее развитие основ гидравлики и практические приложения их, тесно связанные с проектированием и конструированием сооружений, приходится излагать в таких учебных курсах, как, например, «Гидротехнические сооружения» [1-8; 1-9], «Использование водной энергии» [1-2], «Инженерная мелиорация», «Водный транспорт» [1-4], «Водоснабжение» [1-1] и др.

§ 1-8. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ИСТОРИИ ГИДРАВЛИКИ И ОБ ЕЕ ОСНОВОПОЛОЖНИКАХ¹

Зарождение отдельных представлений из области гидравлики следует отнести еще к глубокой древности, ко времени гидротехнических работ, проводившихся древними народами, населявшими Египет, Вавилон, Месопотамию, Индию, Китай и другие страны. Однако прошло много веков и даже тысячелетий, прежде чем начали появляться отдельные, вначале не связанные друг с другом, попытки выполнить научные обобщения тех или других наблюдений, относящихся к гидравлическим явлениям. В далекой древности гидравлика являлась только ремеслом без каких-либо научных основ.

Период Древней Греции. В Греции еще за 250 лет до н. э. начали появляться трактаты, в которых уже выполнялись достаточно серьезные для того времени теоретические обобщения отдельных вопросов механики жидкости. Математик и механик того времени Архимед (ок. 287—212 гг. до н. э.) оставил после себя анализ вопросов гидростатики и плавания. За истекшее время к труду Архимеда, посвященному гидростатике, мало что удалось добавить.

Представитель древнегреческой школы Ктезибий (II или I век до н. э.) изобрел пожарный насос, водяные часы и некоторые другие гидравлические устройства. Герону Александрийскому (вероятно, I век н. э.) принадлежит описание сифона, водяного органа, автомата для отпуска жидкости и т. п.

Период Древнего Рима. Римляне заимствовали многое у греков. В Древнем Риме строились сложные для того времени гидротехнические сооружения: акведуки, системы водоснабжения и т. п. В своих сочинениях римский инженер-строитель Фронтин (40—103 г. н. э.) указывает, что во времена Траяна в Риме было 9 водопроводов, причем общая длина водопроводных линий составляла 436 км. Можно предполагать, что римляне уже обращали внимание на наличие связи между площадью живого сечения и уклоном dna русла, на сопряженные движение воды в трубах, на неразрывность движения жидкости. Например, Фронтин писал, что количество воды, поступившей в трубу, должно равняться количеству воды, вытекающей из нее.

Период Средних веков. Этот период, длившийся после падения Римской империи около тысячи лет, характеризуется, как принято считать, регрессом, в частности, и в области механики жидкости.

Эпоха Возрождения. В течение второй половины XV века и в XVI веке начали развиваться экспериментальные исследования (см. ниже), постепенно опровергавшие схоластические воззрения, поддерживаемые католической церковью. В этот период в Италии появилась гениальная личность — Леонардо да Винчи (1452—1519), который, как известно, вел свои научные (экспериментальные и теоретические) исследования в самых различных областях; в частности, Леонардо изучал принцип работы гидравлического пресса, аэродинамику летательных аппаратов, образование водо-

¹ Здесь приводятся исторические предпосылки, послужившие основой для создания современного курса технической механики жидкости (гидравлики), относящегося к инженерно-строительной, гидротехнической специальности (подробнее см. [1-10]). Эти исторические предпосылки освещаются нами только в рамках до периода 1920—1930 гг. (т. е. в пределах так называемой «исторической давности»); при этом мы имели в виду, что дальнейшее развитие гидравлики, которое осуществлялось уже нашими современниками, достаточно полно будет отражено в самом курсе гидравлики. В этом параграфе нам, естественно, пришлось пользоваться отдельными терминами и понятиями, с которыми читатель ознакомится только при изучении материала, излагаемого ниже.

воротных областей, отражение и интерференцию волн, истечение жидкости через отверстия и водосливы и другие гидравлические вопросы. Он изобрел центробежный насос, парашют, анемометр. Различные работы Леонардо отражены в сохранившихся 7 тыс. страниц его рукописей, хранящихся в библиотеках Лондона, Виндзора, Парижа, Милана и Турина. По-видимому, справедливо будет признать, что Леонардо да Винчи является основоположником механики жидкости.

К периоду Возрождения относятся работы нидерландского математика — инженера Симона Стевина (1548—1620), определившего величину гидростатического давления на плоскую фигуру и объяснившего «гидростатический парадокс». В этот период великий итальянский физик, механик и астроном Галилео Галилей (1564—1642) показал, что гидравлические сопротивления возрастают с увеличением скорости и с возрастанием плотности жидкой среды; он разъяснял также вопрос о вакууме.

Период XVII века и начало XVIII века. В это время механика жидкости все еще находилась в зачаточном состоянии. Вместе с тем здесь можно отметить имена следующих ученых, способствовавших ее развитию: Кастелли (1577—1644) — преподаватель математики в Пизе и Риме — в ясной форме изложивший принцип неразрывности; Торричелли (1608—1647) — выдающийся математик и физик — дал формулу расчета скорости истечения жидкости из отверстия и изобрел ртутный барометр; Паскаль (1623—1662) — выдающийся французский математик и физик — установивший, что значение гидростатического давления не зависит от ориентировки площадки действия, кроме того, он окончательно решил и обосновал вопрос о вакууме; Ньютон (1643 н. ст.—1727) — гениальный английский физик, механик, астроном и математик — давший наряду с решением ряда гидравлических вопросов приближенное описание законов внутреннего трения жидкости.

Середина и конец XVIII века. Формируются теоретические основы современной механики жидкости. Анализируя соответствующий исторический материал, можно видеть, что вопрос о вакууме осознавался человечеством на протяжении 2 тыс. лет (от Аристотеля, неправильно осветившего этот вопрос, до Паскаля): вопрос о неразрывности движения жидкости — на протяжении 1,5 тыс. лет (от Фронтинуса до Кастелли). Такое положение объясняется тем, что прежде чем уяснить подобные вопросы (с современной точки зрения достаточно простые), следовало предварительно ясно себе представить основные положения физики и механики, которые в наше время люди усваивают с детского возраста: вопрос о силе тяжести и всемирном тяготении, вопрос о скорости и ускорении, о давлении атмосферы и т. п. Только освоив такие представления, можно легко разобраться в «элементарных» положениях механики жидкости. Однако решение всех этих вопросов физики и механики являлось весьма трудной задачей: на пути раскрытия их стояла католическая церковь, различные предрассудки, а также существовавшие метафизические объяснения различных явлений (например, говорили, что снаряд летит в воздухе потому, что тот, кто отлил его, ввел в него известную силу, которая и обуславливает движение снаряда; Аристотель учил, что летящую стрелу приводит в движение воздух и т. п.).

И вот к середине XVIII века трудами ряда ученых (Галилея, Коперника, Кеплера, Паскаля, Декарта, Гука, Ньютона, Лейбница, Ломоносова, Клеро и многих других) указанные препятствия, наконец, были в значительной мере преодолены. После этого относительно быстро начали создаваться современные научные основы механики жидкости. Эти научные основы были заложены тремя учеными XVIII века: Даниилом Бернулли, Эйлером и Д'Аламбером.

Д. Бернулли (1700—1782) — выдающийся физик и математик — родился в Гронингене (Голландия). С 1725 по 1733 г. жил в Петербурге, являлся профессором и членом Петербургской Академии наук. В Петербурге он написал свой знаменитый труд «Гидродинамика», который был впоследствии опубликован (в 1738 г.) в г. Страсбурге. В этом труде он осветил ряд основополагающих гидравлических вопросов и в частности объяснил физический смысл слагаемых, входящих в современное уравнение установившегося движения (идеальной жидкости), носящее его имя.

Л. Эйлер (1707—1783) — великий математик, механик и физик — родился в г. Базеле (Швейцария). Жил в Петербурге с 1727 до 1741 г. и с 1766 г. до конца жизни. Был членом Петербургской Академии наук. Умер в Петербурге. Могила его находится в Ленинградском некрополе. Эйлер не только подытожил и обобщил в безупречной математической форме работы предшествующих авторов, но составил известные диффе-

ренциальные уравнения движения и относительного равновесия жидкости, носящие его имя, а также опубликовал целый ряд оригинальных решений гидравлических задач, широко используя созданный к тому времени математический аппарат.

Ж. Д'Аламбер (1717–1783) – математик и философ; член Парижской, французской и других Академий наук, а также Петербургской Академии наук (с 1764 г.). Опубликовал ряд трактатов, относящихся к равновесию и движению жидкости; предполагают, что Д'Аламбер первый отметил возможность кавитации жидкости.

В указанный период существенный вклад в дело развития механики жидкости внесли также два выдающихся французских математика того времени: Ж. Лагранж (1736–1813), который ввел понятие потенциала скорости и исследовал волны малой высоты, и П. Лаплас (1749–1827), создавший, в частности, особую теорию волн на поверхности жидкости.

Середина и конец XVIII века. Зарождается техническое (прикладное) направление механики жидкости. Наряду с учеными Л. Эйлером, Д. Бернулли, Д'Аламбером и др., сформулировавшими основы современной механики жидкости, в середине и в конце XVIII в. во Франции начала постепенно образовываться особая школа – школа ученых-инженеров, которые стали формировать механику, как прикладную (техническую) науку. Рассматривая гидравлику, как отрасль техники, а не математики, представители этой школы ввели преподавание механики жидкости в технических учебных заведениях. К концу XVIII в. французская школа стала основной гидравлической школой в области технических наук.

Яркими представителями этой школы явились: А. Пито (1695–1771) – инженер-гидротехник, член Парижской Академии наук, изобретатель «прибора Пито»; А. Шези (1718–1798) – директор Французской школы мостов и дорог (Эколь де Пон э Шоссе), сформулировавший параметры подобия потоков и обосновавший формулу, носящую его имя; Ж. Борда (1733–1799) – военный инженер, который занимался вопросами истечения жидкостей из отверстий и нашел потери напора при резком расширении потока; П. Дюбуа (1734–1809) – инженер-гидротехник и военный инженер, составивший обобщающий труд «Принципы гидравлики».

Техническое направление механики жидкости развивалось и в других странах. Здесь можно отметить итальянского профессора Д. Вентури (1746–1822) и немецкого ученого-инженера Р. Вольтмана (1757–1837).

В результате деятельности ученых-инженеров техническая механика жидкости (гидравлика) обогатилась изобретением соответствующей измерительной аппаратуры (пьезометрами, трубками Пито, вертушками Вольтмана и т. п.); идеей использования материальных (вещественных) моделей тех или других гидравлических явлений для их изучения и для проектирования соответствующих инженерных сооружений; идеей теоретического построения приближенных расчетных зависимостей с уточнением таких зависимостей при помощи введения в них эмпирических коэффициентов.

Вне зависимости от формирования технической механики жидкости в странах Западной Европы гениальный русский ученый М. В. Ломоносов (1711–1765), учитывая рост промышленности и строительства в России, начал также развивать механику жидкости в техническом направлении.

Развитие технической механики жидкости (гидравлики) в XIX в. за рубежом. Зародившееся во Франции техническое (гидравлическое) направление механики жидкости быстро начало развиваться как в самой Франции, так и в других странах. В этот период в той или другой мере были разработаны или решены следующие проблемы: основы теории плавно изменяющегося неравномерного движения жидкости в открытых руслах (Беланже, Кориолис, Сен-Венан, Дюпюи, Буден, Бресс, Буссинеск); вопрос о гидравлическом прыжке (Бидоне, Беланже, Бресс, Буссинеск); экспериментальное определение параметров, входящих в формулу Шези (Базен, Маннинг, Гангилье, Куттер); составление эмпирических и полуэмпирических формул для определения гидравлических сопротивлений в различных случаях (Кулон, Хаген, Сен-Венан, Пуазейль, Дарси, Вейсбах, Буссинеск); открытие двух режимов движения жидкости (Хаген, Рейнольдс); получение так называемых уравнений Навье–Стокса, а также уравнений Рейнольдса на основе использования модели осредненного турбулентного потока (Сен-Венан, Рейнольдс, Буссинеск); установление принципов гидродинамического подобия, а также критериев подобия (Коши, Ричч, Фруд, Гельмгольц, Рейнольдс); основы учения о движении грунтовых вод (Дарси, Дюпюи, Буссинеск); теория волн (Герстнер, Сен-Венан, Ричч, Фруд,

Стокс, Гельмгольц, Базен, Буссинек); вопросы истечения жидкости через водосливы и отверстия (Беланже, Кирхгоф, Базен, Буссинек, Борда, Вейсбах). В этот период изучались также взвесенесущие потоки (Фарг, Дюшои), неустановившееся движение (Сен-Венан, Буссинек, Дюпюи).

Зарождение и развитие технической механики жидкости (гидравлики) в XIX в. в России. Прикладное, инженерное направление механики жидкости, зародившееся у нас еще в работах М. В. Ломоносова (см. выше), стало развиваться в России в XIX в. в стенах Петербургского института инженеров путей сообщения. В этом институте долгое время существовала единственная гидравлическая школа России. Ученые этого института только в начале своей деятельности следовали французской гидравлической школе. Здесь можно прежде всего упомянуть П. П. Мельникова (1804—1880) — инженера путей сообщения, профессора прикладной механики, почетного члена Петербургской Академии наук, Министра путей сообщения, который создал первый на русском языке курс «Основания практической гидравлики...», а также организовал в 1855 г. первую в России учебную гидравлическую лабораторию. Преемниками П. П. Мельникова являлись профессоры того же института В. С. Глухов, Н. М. Соколов, П. Н. Котляревский, Ф. Е. Максименко и Г. К. Мерчинг. Они опубликовали ряд трудов, относящихся к технической механике жидкости (гидравлике), в которых обобщили соответствующие исследования, выполненные в стенах института инженеров путей сообщения.

Большой вклад внесли в развитие гидравлики следующие русские ученые и инженеры: Н. П. Петров (1836—1920) — выдающийся русский ученый-инженер, почетный член Петербургской Академии наук (инженер-генерал-лейтенант, товарищ Министра путей сообщения), который в своем труде «Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости» (1883 г.) впервые сформулировал законы трения при наличии смазки; Н. Е. Жуковский (1847—1921) — великий русский ученый, профессор Московского высшего технического училища и Московского университета, член-корреспондент Петербургской Академии наук, создатель теории гидравлического удара, исследовавший также многие другие вопросы механики жидкости; И. С. Громека (1851—1889) — профессор Казанского университета, разрабатывавший теорию капиллярных явлений и заложивший основы теории, так называемых, винтовых потоков.

Развитие технической механики жидкости (гидравлики) в области инженерно-строительных специальностей в течение первых десятилетий XX века. В начале XX в. в гидравлике наметилось много самых различных научных направлений, которые можно классифицировать по разным признакам, например:

а) по виду рассматриваемой текучей среды: здесь можно различать воду, воздух, нефть, разные двухфазные жидкости, так называемые, неньютоновские и аномальные жидкости, электропроводящую или магнитную среду, плазму; сюда можно отнести стратифицированные потоки и т. п.;

б) в зависимости от отрасли техники или отрасли знаний, где используется аппарат гидромеханики, можно различать: авиацию, судостроение, гидромашиностроение, инженерно-строительное дело (в частности, гидротехнику), баллистику, гидроавтоматику, химическую технологию, метеорологию, океанологию и т. п.;

в) можно различать отдельные гидромеханические теории, которые иногда полагаются в основу решения задач, относящихся к различным областям техники (см. выше п. б): теорию турбулентности; задачи неустановившегося, в частности, волнового движения; теорию смазки и ламинарного движения; теорию движения жидкости (в частности, нефти и газа) в пористых средах и т. п.

В связи со сказанным в начале XX в. (да и в конце XIX в.) из технической механики жидкости начали выделяться отдельные иногда в значительной мере изолированные друг от друга направления, которые приходится рассматривать отдельно. Ниже, касаясь только инженерно-строительного направления гидравлики, осветим главные работы, относящиеся к этому направлению и выполненные в период до 20—30-х годов настоящего столетия.

Ф. Форхгеймер (1852—1933) — немецкий профессор — рассмотрел гидравлические сопротивления, волны перемещения, колебания горизонтов воды в уравнильных резервуарах ГЭС, некоторые виды деформаций песчаных русел. Особенно важны исследования Форхгеймера в области вопросов фильтрации.

М. Вебер (1871—1951) — немецкий профессор — придал принципам гидродинамического подобия современные формы.

Л. Прандтль (1875—1953) — немецкий профессор, инженер — разработал (наряду с Тейлором и Карманом) полуэмпирическую теорию турбулентности; исследовал гидравлические сопротивления в трубах. С именем Прандтля связан ряд понятий из области механики жидкости. Работы Прандтля в области теории пограничного слоя явились основополагающими.

М. А. Великанов (1879—1964) — советский ученый, член-корреспондент АН СССР — разрабатывал теорию турбулентности, исследовал движение наносов и русловые деформации, предложил так называемую гравитационную теорию движения взвешенных наносов.

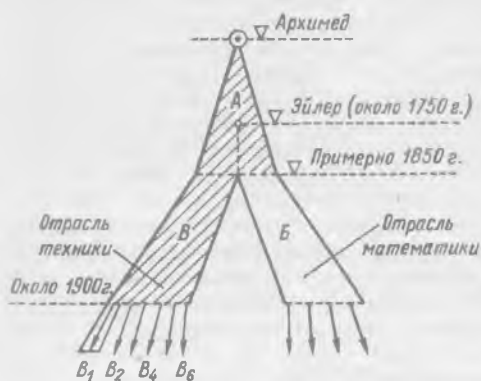


Рис. 1-12. Общая схема формирования (во времени) механики жидкости

А — механика жидкости; Б — математическая механика жидкости; В — техническая механика жидкости (гидравлика); V_1, V_2, \dots, V_6 — отдельные направления курсов гидравлики (гидротехническое, гидромашинное, судостроительное и т. п.)

и монографию по основам гидравлики; решил ряд гидравлических задач, относящихся к инженерно-строительной гидравлике. Н. Н. Павловский создал научно-педагогическую школу в области гидравлики на базе общеполитинститутской кафедры гидравлики Ленинградского политехнического института.

Н. М. Бернадский (1882—1935) — советский ученый, инженер путей сообщения — впервые связал определение тепловых потерь с полем скоростей в прудах-охладителях; предложил важную модель «планового потока», нашедшую себе широкое применение.

К 20—30-м годам XX в. была создана обширная лабораторная база, на основе которой решались самые различные вопросы гидравлики. Равным образом были проведены также обширные натурные (полевые) наблюдения, позволившие составить соответствующие эмпирические формулы или откорректировать (применительно к реальным условиям) формулы, полученные для различных идеализированных схем теоретическим путем. Перечислим только некоторых ученых, принявших участие в этого рода деятельности: П. П. Мельников (см. выше), Энгельс (1854—1945), Ребок (1864—1950), Кох (1852—1923), В. Е. Тимонов (1862—1936), И. Г. Есьман (1868—1955), Шафферак (1881—1951), Феллениус (р. 1876), Мейер-Петер (р. 1883), Гибсон (р. 1878), Скобей (р. 1880), Кеннеди (1851—1920), Н. Н. Павловский (см. выше).

Большой вклад в формирование технической механики жидкости внесли наши отечественные ученые, особенно после Великой Октябрьской социалистической революции, когда забота о развитии науки стала государственным делом Советской республики.

Общая схема формирования (во времени) механики жидкости. Как видно из рис. 1-12, в соответствии со всем сказанным выше, можно считать

Б. А. Бахметев (1880—1951) — русский ученый, инженер путей сообщения — работая в Петербургском политехническом институте, заложил основы современной русской гидравлической школы, опубликовав ряд книг, в которых осветил различные разделы гидравлики. Б. А. Бахметев решил в достаточно общей форме задачу об интегрировании дифференциального уравнения неравномерного движения в призматических руслах.

Блазиус (р. 1883) — немецкий ученый — впервые показал, что для «гладких труб» коэффициент сопротивления зависит только от одного параметра — числа Рейнольдса.

Н. Н. Павловский (1886—1937) — советский ученый, академик, инженер путей сообщения — в 1922 г. опубликовал основы математической теории фильтрации воды в грунтах; предложил метод электромоделирования фильтрационных потоков (метод ЭГДА); издал первый в России «Гидравлический справочник»

(с некоторым приближением), что наука о механике жидкости (в современном представлении этого понятия) зародилась в трудах Архимеда. Примерно к середине XIX в. данная наука (см. область А на рисунке) получила значительное развитие, причем в этот период времени произошло разделение механики жидкости на два различных направления (см. § 1-1): «математическую механику жидкости» (см. область В) и «техническую механику жидкости» (см. область В).

Как отмечают (например, Г. Рауз и С. Инце в своей известной книге «История гидравлики»),¹ математическая механика жидкости зародилась еще в трудах Л. Эйлера (в середине XVIII в.). Что касается технической механики жидкости (гидравлики), то это направление механики, как выше было сказано, начало развиваться главным образом в работах французских ученых-инженеров.

Важно подчеркнуть, что на рубеже начала XIX в. техническая механика жидкости начала в свою очередь расчленяться на отдельные направления (см. на рисунке стрелки V_1, V_2, V_3, \dots). К таким отдельным направлениям можно отнести, например, инженерно-строительную (гидротехническую) гидравлику, гидромашинную гидравлику, судостроительную гидравлику, нефтяную и газовую гидравлику и т. п. Разумеется, теоретические основы этих отдельных гидравлик являются в значительной мере общими; вместе с тем чисто прикладные части таких курсов оказываются существенно различными.

Заметим, что вопрос о разделении механики (в частности, механики жидкости) на различные направления достаточно часто подчеркивается в литературе. Например, А. Н. Боголюбов пишет:² «В результате современной механика разделилась на много направлений, которые сливаются, с одной стороны, с математической, с другой — с различными направлениями техники (такое промежуточное положение между чистой абстракцией и конкретной практикой было характерно для механики со времен ее зарождения)».³

Некоторые общие выводы, вытекающие из рассмотрения исторического материала:

1. Разработка проблем гидравлики (технической механики жидкости), в частности, инженерно-строительного направления, всегда диктовалась необходимостью решения тех или других практических задач, выдвигаемых жизнью и связанных с развитием материальной базы нашего общества.

2. Отдельные казались бы элементарные представления механики жидкости осваивались человечеством, как мы видели, иногда в течение весьма продолжительного времени (см., например, отмеченные выше вопросы о вакууме и уравнения неразрывности движения жидкости, которые решались в течение тысячелетий).

3. Теоретические основы технической механики жидкости (гидравлики) начали интенсивно развиваться только в середине XVIII в., после того как рядом зарубежных и отечественных ученых были сформулированы основополагающие законы физики и общей механики, а также был разработан соответствующий математический аппарат, позволяющий достаточно точно и кратко выражать соответствующие зависимости механики.

4. По-видимому, некоторые положения гидромеханики на протяжении столетий повторно открывались и разрабатывались по нескольку раз.

5. Иногда, в конечном счете, отдельным ученым история приписывает то, что они не предлагали и «забывает» о том, что они сделали. Например, Фруд не предлагал «числа Фруда» и никогда им не пользовался (широко известно, что «число Фруда» было предложено Ричем).

¹ H. Rouse, S. Ince. History of hydraulics. USA, 1957.

² А. Н. Боголюбов. Механика в истории человечества. — М.: Наука, 1978.

³ Не безынтересно дополнительно отметить, что А. Н. Боголюбов (см. предыдущую сноску) пишет: «Развитие механики в Западной Европе в течение 1000 лет происходит двумя различными путями, которые почти не пересекаются...» Такое положение, если относить его к современным условиям, по-видимому, должно свидетельствовать о наличии принципиально различных подходов к решению задач механики жидкости (см. рис. 1-12), с одной стороны, у инженеров-ученых, формирующих технические науки, и, с другой стороны, у ученых-математиков, разрабатывающих чисто математические решения задач механики.

6. Многие уравнения и формулы, связанные в настоящее время с именами различных ученых, были даны этими учеными совсем не в том виде, в каком они фигурируют в современной литературе; примеров таких «именных зависимостей» можно привести целый ряд: формула Шези, формула Торричелли и т. д.

В начале XX в. ведущая роль в области технической механики жидкости (гидравлики) перешла от старой французской гидравлической школы к немецкой школе, которую возглавил ряд видных немецких ученых. Однако после Великой Октябрьской социалистической революции в связи с бурным развитием в нашей стране гидротехнического строительства в СССР был создан целый ряд научно-исследовательских институтов, разрабатывавших различные гидромеханические проблемы; было организовано также большое число вузов инженерно-строительного, в частности, гидротехнического профиля. Если в дореволюционное время в России почти отсутствовали печатные издания, посвященные гидравлическим и гидротехническим вопросам, то в послереволюционный период у нас появилась обширная литература (журналы, труды институтов, монографии, руководства для проектирования и т. п.), освещающая самые различные стороны технической гидромеханики; при этом в скором времени наша отечественная гидравлика выдвинулась на одно из первых мест в мире.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1-1. **Абрамов Н. Н.** Водоснабжение. — М.: Стройиздат, 1967.
- 1-2. **Гидроэнергетические установки.** /Под ред. Д. С. Шавелева. — Л.: Энергоиздат, 1981.
- 1-3. **Корнфельд М.** Упругость и прочность жидкостей. — М. — Л.: ГИТТЛ, 1951.
- 1-4. **Михайлов А. В.** Внутренние водные пути. — М.: Стройиздат, 1973.
- 1-5. **Перник А. А.** Проблемы кавитации. — Л.: Судостроение, 1966.
- 1-6. **Справочник по гидравлическим расчетам.** /Под ред. П. Г. Киселева. — М.: Энергия, 1972.
- 1-7. **Чугаев Р. Р.** Гидравлические термины. — М.: Высшая школа, 1974.
- 1-8. **Чугаев Р. Р.** Гидротехнические сооружения: Водосливные плотины. — М.: Высшая школа, 1978.
- 1-9. **Чугаев Р. Р.** Гидротехнические сооружения: Глухие плотины. — М.: Высшая школа, 1975.
- 1-10. **Чугаев Р. Р.** Развитие и формирование технической механики жидкости (гидравлики). — Л.: Изд. ЛПИ имени М. И. Калинина, 1975.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ГИДРОСТАТИКА

§ 2-1. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ. СИЛА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ («СУММАРНОЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ») СВОЙСТВА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

В гидростатике изучается жидкость, находящаяся в покое. В § 1-2 было отмечено, что касательные напряжения в покое жидкости всегда равны нулю ($\tau = 0$). В § 1-4 п. 3 мы исключили возможность существования в жидкости (покоющейся или движущейся) растягивающих напряжений. Поэтому, мы должны считать, рассматривая покоящуюся жидкость, что в любой ее точке мы можем иметь только нормальные напряжения: $\sigma = \sigma_n$ (см. конец § 1-6).

Основным понятием гидростатики является понятие *гидростатического давления в данной точке покоящейся жидкости*. Это давление принято обозначать буквой p и для краткости именовать просто «гидростатическим давлением».