

Высшее профессиональное образование

БАКАЛАВРИАТ

Н. Н. ЛАПШЕВ, Ю. Н. ЛЕОНТЬЕВА

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ

Учебник

*Для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Строительство»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2012

УДК 681.587.34:621.1(075.8)

ББК 30.123:31.3я73

Л248

Рецензенты:

проф. кафедры городского хозяйства и строительства Государственной Академии повышения квалификации и переподготовки кадров для строительства и жилищно-коммунального комплекса России, д-р тех. наук, проф. *О. Н. Брюханов*;
зав. кафедрой гидравлики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета *А. Д. Гиргидов*;
проф. кафедры гидравлики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета *М. Р. Петриченко*

Лапшев Н.Н.

Л248 Основы гидравлики и теплотехники : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Н. Н. Лапшев, Ю. Н. Леонтьева. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 400 с. — (Сер. Бакалавриат).

ISBN 978-5-7695-9157-0

Учебник создан в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта по направлению подготовки «Строительство» (квалификация «бакалавр»).

В разделе I рассмотрены основные физические свойства жидкостей и газов, общие законы статики, кинематики и динамики жидкостей и газов, силы, действующие в жидкостях. Основы гидростатики, кинематики и динамики жидкости изложены в применении к решению основных задач по равновесию жидкости, ее движению по трубам и каналам, водосливам и сооружениям. Особое внимание уделено вопросам сопротивления при движении жидкости по трубам и каналам, движению грунтовых вод, подобию гидромеханических процессов и моделированию гидравлических явлений.

В разделе II рассмотрены законы термодинамики, свойства рабочих веществ и основные термодинамические процессы, термодинамика потока, циклы теплосиловых, холодильных установок и компрессорных машин, химическая термодинамика, термодинамика в строительстве, тепловой, воздушный и влажностный режимы помещений, стационарная и нестационарная тепло- и влагопередача через ограждающие конструкции.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 681.587.34:621.1(075.8)

ББК 30.123:31.3я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Лапшев Н. Н., Леонтьева Ю. Н., 2012

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012

ISBN 978-5-7695-9157-0

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

Гидравлика (от гр. *hydor* — вода и *aulos* — труба, что означает течение воды по трубам) — прикладная наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей и дающая на основе теории и опыта способы применения этих законов к разрешению различных задач инженерной практики.

Гидравлика подразделяется на две части: гидростатику, в которой изучаются законы равновесия жидкости, и гидродинамику, в которой изучаются законы движения жидкости.

Содержание современной гидравлики несравненно шире — она изучает также движение жидкостей не только в трубах, но и в открытых руслах, сооружениях и движении грунтовых вод.

Изучением равновесия и движения жидкостей занимается и другая наука — теоретическая гидромеханика, носящая строго математический характер и дающая общие и точные решения. Гидравлика как прикладная наука разрешает вопросы, нужные и важные для инженерной практики, и поэтому она рассматривает различные вопросы более упрощенно, производя оценку главных элементов гидравлических явлений, и часто прибегает к использованию результатов опытов.

Гидравлика, рассматривая законы равновесия и движения жидкостей, опирается на такие науки как, математика, физика, теоретическая механика, сопротивление материалов. В свою очередь, знания, полученные при изучении курса гидравлики, служат базой для гидравлических расчетов при решении вопросов водоснабжения, отопления, вентиляции, водоотведения, инженерной мелиорации, фильтрации, гидротехнических сооружений и др.

В истории развитая человека вода играла огромную роль и использовалась как для питьевого водоснабжения, так и для орошения полей, приведения в движение простейших механизмов и т. п.

Еще за 4000 лет до нашей эры в Египте и за 1000 лет в Китае и в Сирии умели строить плотины и мельницы на реках, оросительные системы на полях, а также корабли для плавания по морям. Древние оросительные системы находят также в Средней Азии и Закавказье.

В Риме сохранились остатки древнего водопровода, построенного за шесть веков до начала нашей эры, свидетельствующие о высокой для того времени технике.

Первым сочинением по гидравлике следует считать трактат греческого физика Архимеда «О плавающих телах», написанный им за 250 лет до нашей эры. Им же была разработана конструкция механизма для подъема воды, названная «архимедовым винтом». После этого гидравлика почти 17 веков не пополнялась новыми законами и открытиями. Новые работы по гидравлике стали появляться в Италии в XIV—XV вв. В конце XV в. итальянский ученый Леонардо да Винчи (1452—1519) занимался изучением истечения жидкостей из отверстий и законов движения воды в реках и каналах. Однако его записи были опубликованы лишь 400 лет спустя, и поэтому его труды по гидравлике оказались неиспользованными.

Из дальнейших работ по гидравлике следует отметить работы голландского ученого С. Стевина, опубликовавшего в 1585 г. книгу «Начала гидростатики». В 1612 г. итальянский ученый Г. Галилей опубликовал трактат «О телах, находящихся в воде, и о тех, которые в них движутся», в нем он резко критиковал метафизические теории греческого философа Аристотеля об «абсолютно тяжелых» и «абсолютно легких» телах и подчеркивал правильность данного Архимедом закона плавания тел.

Ученик Г. Галилея Э. Торричелли, занимавшийся вопросом движения жидкости, вывел в 1643 г. формулу скорости истечения невязкой (идеальной) жидкости из отверстия. Французский ученый Б. Паскаль в 1650 г. дал свой закон о передаче жидкостью внешнего давления, который явился основой для расчета гидравлических прессов, подъемников и т. п. Английский ученый И. Ньютон в 1686 г. создал свою гипотезу о законах внутреннего трения в жидкостях и впервые ввел понятие о вязкости в жидкостях.

Многие практические законы гидравлики задолго до опубликования этих законов за границей уже были известны русским людям, умевшим весьма искусно строить на реках наплавные мосты, водяные мельницы, плотины, водопроводы.

Большое значение в те времена имело питьевое водоснабжение, особенно во время осады городов и крепостей. Так, во время осады Москвы татарами в 1382 г. Кремль был достаточно обеспечен водой с помощью тайного колодца под Тайницкой башней, соединенного каменным подземным ходом с руслом Москвы-реки.

В начале XVIII в. по инициативе Петра I в России развернулось гидротехническое строительство и началось бурное развитие морского и речного транспорта. Русский мастер Сердюков построил Вышневолоцкую водную систему каналов и шлюзов, соединившую Балтийское море с Каспийским (через Волхов, Мсту, Цну, Тверцу и Волгу). В 1708 г. было напечатано первое в России пособие по регулированию рек для судоходства.

В XVIII в. в Петербургской Академии наук рядом ученых (М. В. Ломоносовым, Д. Бернулли и Л. Эйлером) были разработаны теоретические основы гидравлики, позволившие выделить ее в само-

стоятельную науку. Знаменитый русский ученый М. В. Ломоносов написал и опубликовал в 1760 г. диссертацию «Рассуждение о твердости и жидкости тела», в которой он изложил положенный в основу гидравлики закон сохранения массы и энергии.

Член Петербургской Академии наук Даниил Бернулли опубликовал в 1738 г. капитальный труд по вопросу движения жидкостей, положив начало гидродинамике. В этой работе Бернулли обосновал свою знаменитую теорему о запасе энергии движущейся частицы жидкости, которая является основной теоремой современной гидравлики.

Член Петербургской Академии наук Леонард Эйлер в 1755 г. на основе открытия Ломоносова вывел основные дифференциальные уравнения равновесия и движения невязкой жидкости, положив начало теоретической гидромеханике, изучающей законы движения жидкостей методом математического анализа.

В 1791 г. была издана написанная Калмыковым оригинальная русская книга «Карманная книжка для вычисления количества воды, протекающей через трубы, отверстия или по жолубам, а также силы, с какою они (воды) ударяют, стремясь с данной скоростью, с приложением правил для вычисления трений, производимых в машинах».

Наряду с теоретическими работами по гидромеханике и гидравлике стал прививаться экспериментальный, т. е. опытный, способ изучения ряда ее законов, давший обоснование и развитие практической гидравлики. В развитии практической гидравлики сыграли важную роль работы французских ученых XVIII—XIX вв. А. Шези, А. Базена, А. Дарси и др.

В 1836 г. инженером путей сообщения П. П. Мельниковым был составлен и напечатан первый в России учебник по гидравлике, названный им «Основания практической гидравлики или о движении воды в различных случаях и действие ее ударом и сопротивлением».

Знаменитый русский ученый Д. И. Менделеев в своем сочинении «О сопротивлении жидкостей и о воздухоплавании» в 1880 г. указывал на существование в природе двух режимов движения жидкости с различными законами ее сопротивления. Эта же мысль была развита и доказана в 1883 г. русским физиком Н. П. Петровым (1836—1920), впервые установившим, что при смазке силы трения, определяемые вязким сопротивлением при ламинарном движении, пропорциональны первой степени скорости. Петрову принадлежат также доказательство гипотезы Ньютона о силе внутреннего трения в жидкостях и разработка гидродинамической теории смазки.

Несколькими годами позже английский ученый О. Рейнольдс провел свои опыты, наглядно подтверждавшие гипотезу Менделеева о существовании ламинарного и турбулентного движения жидкости. Профессор Казанского университета И. С. Громека в 1881 г. опубликовал ряд крупных работ по теории винтового движения жидкостей. Крупнейший вклад в развитие гидравлики и гидромеханики сделал

проф. Н. Е. Жуковский; в 1898 г. он опубликовал исследование по теории гидравлического удара, получившее мировую известность. Кроме того, Н. Е. Жуковский дал математический метод решения задачи о фильтрации грунтовых вод, создал теорию движения взвешенных наносов в водных потоках. В начале XX в. русская инженерная гидравлика, бесспорно, заняла ведущее место в мировой науке благодаря ряду значительных работ проф. Б. А. Бахметьева и других по гидравлике сооружений и открытых русел.

Из зарубежных исследователей следует назвать работы Ф. Форгеймера в области гидравлических сопротивлений и теории фильтрации, Г. Вебера в области гидродинамического подобия, Л. Прандтля в области гидравлических сопротивлений и изучения процесса турбулентности.

В 1910—1915 гг. были опубликованы работы русских инженеров В. М. Лохтина и Н. С. Лелявского о формировании речных русел и структуре речного потока, которые справедливо могут считаться основоположниками речной гидравлики.

В 1914 г. В. И. Чарномский опубликовал предложенный им метод приближенного интегрирования уравнения неравномерного движения жидкости в непризматическом русле.

В 1914 г. проф. А. Я. Милович опубликовал работу «О нерабочем изгибе потока»; в дальнейшем он дал ряд интересных работ по очертанию спиральной камеры турбин, теории деления потоков и т. д.

Крупнейший вклад в гидравлику внес акад. Н. Н. Павловский, предложивший точные формулы для учета сопротивлений при равномерном движении в открытых потоках; давший много оригинальных предложений по построению кривых свободной поверхности при неравномерном движении, а также разработавший на основе работы Н. Е. Жуковского теорию фильтрации грунтовых вод. Н. Н. Павловский издал первый в нашей стране «Гидравлический справочник» и ряд монографий по основам гидравлики.

Изложенный ранее краткий перечень работ русских ученых показывает, что они сделали крупнейший вклад в развитие гидравлики как науки.

В Советском Союзе в годы пятилеток были построены: Волховская ГЭС, ДнепрогЭС, Беломорско-Балтийский канал, канал им. Москвы, Ферганский канал, много других ГЭС и гидросооружений, обслуживающих интересы энергетики, орошения, водного транспорта и водоснабжения.

После Великой Отечественной войны было построено много промышленных комбинатов, новых городов и рабочих поселков, обеспечено промышленное и питьевое водоснабжение их. Это дало мощный толчок к развитию экспериментальной и теоретической гидравлики, гидравлики трубопроводов и сооружений как научной базы для правильного решения задач водоснабжения, канализации отопления, вентиляции и инженерной гидравлики при проектирова-

нии и строительстве зданий, сооружений, водозаборов и различных гидросооружений.

Развернулась и выросла обширная сеть научно-исследовательских институтов с гидравлическими и гидротехническими лабораториями, успешно работающих над разрешением многих задач гидравлики и гидротехники.

Среди работ в области расчетов движения жидкости в открытых руслах следует отметить работы таких ученых, как И. И. Агроскина, И. И. Леви, В. М. Макковеева, Р. Р. Чугаева. В области гидравлики трубопроводов широко известны работы А. Д. Альтшуля, Г. А. Мурина, Н. Ф. Федорова, Ф. А. Шевелева и др.

В настоящее время курс современной гидравлики опирается на теоретическую гидромеханику и поставленные на научных основах моделирования экспериментальные исследования, что дает результаты, необходимые современному специалисту для практической деятельности.

Техническая термодинамика и теория теплопередачи составляют теоретическую часть теплотехнической науки. В России основания ее были заложены гениальным русским ученым М. В. Ломоносовым. Развитие технической термодинамики связано с развитием тепловых двигателей. В XIX в. изучались свойства газов и паров и исследовались различные круговые процессы (циклы). В начале XX в. в связи с развитием турбин начала разрабатываться теория истечения. Наибольшее своего развития у нас теплотехническая наука достигла в XX в.

Изучение свойств реальных газов и паров, начатое в XIX в., продолжается по настоящее время, особенно в области высоких давлений и температур. Одновременно происходит дальнейшее изучение, развитие и практическое осуществление различных циклов.

Развитие производительных сил общества уже в XVIII в. требовало создания универсальной машины, способной непосредственно приводить машины-орудия.

Паровая машина, служащая для привода заводских механизмов, была впервые создана И. И. Ползуновым (1765 г.). В XIX в. появились первые двигатели внутреннего сгорания. Двигателестроение начало развиваться уже в дореволюционной России, однако интенсивный рост его в самых различных направлениях происходил после 1917 г. В Советском Союзе были созданы первоклассные промышленные, автотракторные, судовые и авиационные двигатели различной мощности и быстроходности.

Развитие промышленности и сельского хозяйства в конце XIX в. требовало сосредоточения больших мощностей. Паровые машины и двигатели внутреннего сгорания не могли удовлетворить этому условию, так как единичные мощности поршневых двигателей ограничены. Кроме того, создание генераторов электрического тока с большим числом оборотов вала требовало двигателей, вал которых мог быть наиболее удобно соединен с валом генераторов. Стала актуальной

задача создания двигателя, удовлетворяющего данным требованиям; решение этой задачи завершилось созданием паровой турбины. Таким образом, было положено начало дальнейшему широкому внедрению электричества в промышленность, сельское хозяйство и быт.

Первые паровые турбины были построены в 1884—1888 гг. В них использовался пар низких параметров, а мощность была около 10 кВт. С тех пор паровые турбины начали стремительно увеличивать мощность; соответственно повышались применяемые параметры пара.

К настоящему времени построено большое количество турбин различных мощностей на средние и высокие параметры пара. Повышение единичных мощностей вместе с повышением начальных параметров пара ведет к увеличению экономичности паротурбинных установок.

Стремление обойтись без громоздкой котельной, конденсационного устройства и ряда вспомогательных элементов привело к созданию газотурбинных установок, в которых в качестве рабочего тела используется газ. Газотурбинные установки находят все более широкое применение в промышленности, энергетике, авиации и транспорте.

Строительная теплотехника как раздел строительной физики создана в России в начале XIX в. Книга проф. В. Д. Мачинского «Теплотехнические основы гражданского строительства», вышедшая в 1925 г., была первой работой по строительной теплотехнике. Большое влияние на развитие строительной теплотехники оказали работы проф. О. Е. Власова и проф. К. Ф. Фокина. На базе теории теплоустойчивости О. Е. Власова А. М. Шкловер разработал метод расчета затухания температурных колебаний в ограждении и колебаний температуры воздуха в здании, а Л. А. Семенов — практический метод расчета колебаний температуры воздуха в помещении при печном отоплении.

Практический метод расчета влажностного режима ограждений при увлажнении их парообразной и жидкой влагой, метод расчета температурных полей в ограждающих конструкциях, методика определения расчетных температур наружного воздуха разработан К. Ф. Фокиным. Р. Е. Брилинг разработал вопросы воздухопроницаемости ограждений, а также миграции влаги в строительных материалах. Разработке теории проектирования ограждающих конструкций, а также созданию основ строительной климатологии и климатического районирования территории СССР посвящены работы проф. В. М. Ильинского. Большой вклад в строительную теплотехнику внесли работы докторов техн. наук В. Н. Богословского, Ф. В. Ушакова, А. У. Франчука и др.

В настоящее время современной курс термодинамики и строительной теплофизики основывается на теории теплопередачи и технической термодинамики с использованием современных научных данных и применением современных материалов, что необходимо современному специалисту для практической деятельности.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКОСТЯХ

1.1. Основные физические свойства жидкостей

Жидкие тела отличаются от твердых тел весьма малой силой сцепления между отдельными частицами и их легкоподвижностью, благодаря чему жидкость легко принимает форму сосуда, в который она налита. Это свойство жидких тел называется текучестью. Жидкие тела бывают двух видов: капельные жидкости (вода, бензин, технические масла и др.) и газообразные (или упругие) жидкости (газы, пары, воздух). Обычно капельные жидкости называют несжимаемыми, а упругие — сжимаемыми.

В гидравлике рассматриваются главным образом капельные жидкости; изучением газообразных жидкостей или просто газов занимается аэродинамика. Однако многие свойства и механические законы одинаковы для капельных и газообразных жидкостей.

Плотность жидкости. Наиболее часто применяемой в гидравлике характеристикой жидких тел является плотность жидкости, или масса единицы объема, который принято обозначать буквой ρ .

Среднее значение плотности определяется по формуле

$$\rho = \frac{m}{W}, \quad (1.1)$$

где m — масса, кг; W — объем, м³.

Например, для дистиллированной воды при 4 °С $\rho = 1000$ кг/м³. В мутных речных потоках плотность воды может достигнуть $\rho = 1200$ кг/м³. Для морской воды $\rho = 1020 \dots 1030$ кг/м³.

Сжимаемость. Капельные жидкости оказывают сильное сопротивление сжимающим усилиям и допускают очень большое давление (до 3000 атм и более). Если на некоторый объем жидкости W_1 , налитой в сосуд, оказать с помощью поршня давление p , то под влиянием этого давления объем жидкости уменьшится и станет равным W_2 .

Относительное изменение объема жидкости $W_1 - W_2 = dW$ при изменении давления dp называется *коэффициентом объемного сжатия*:

$$\beta_v = \frac{dW}{dpW}. \quad (1.2)$$

При изменении давления в пределах от 100 до 50 000 кПа коэффициент объемного сжатия воды практически постоянен и может быть принят $\beta_v = 5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{Н} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/кПа}$.

При решении большинства гидравлических задач, за исключением явления гидравлического удара, сжимаемостью капельных жидкостей пренебрегают и считают жидкость практически несжимаемой.

Температурное расширение. Жидкие тела, как и все прочие, при изменении температуры изменяют свой объем и плотность. Вода наибольшей плотностью обладает при температуре 4 °С. Коэффициент температурного расширения воды β_T зависит от изменения объема и температуры dT и определяется зависимостью

$$\beta_T = \frac{dW}{dT W}. \quad (1.3)$$

При атмосферном давлении и изменении температуры от 0 до 10 °С этот коэффициент имеет значения $\beta_T = 0,000014 \text{ К}^{-1}$, а при 10... 20 °С $\beta_T = 0,00015 \text{ К}^{-1}$. Это — очень малая величина, поэтому при решении практических задач в области строительства, водоснабжения, канализации и гидротехнических сооружений изменением объема жидкости с изменением температуры пренебрегают.

Сжимаемость газов. По сравнению с капельными жидкостями для газов характерна большая сжимаемость. Состояние газа изменяется при механическом или тепловом воздействии на него, а также при переходе одного вида энергии в другой. Уравнение состояния Менделеева—Клайперона для идеального (совершенного) газа устанавливает зависимость между абсолютным давлением p , плотностью ρ и абсолютной (термодинамической) температурой T в виде

$$p = \rho gRT, \quad (1.4)$$

где R — универсальная газовая постоянная, имеющая свое значение для каждого газа (для воздуха $R = 287,14 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$).

При анализе изменений состояния газа различают следующие основные термодинамические процессы:

- изотермический — протекает при постоянной температуре системы;
- изобарный — при постоянном давлении в системе;
- изохорный — при постоянной объеме системы;
- адиабатный — система не обменивается теплотой с окружающей средой;

- политропный — система, состояние которой определяется зависимостью

$$p / \rho^n = \text{const}, \quad (1.5)$$

где n — показатель политропы, значения которого изменяются от 1 (изотермический процесс), до 1,41 (адиабатический процесс).

1.2. Вязкость жидкости

При движении реальной жидкости по трубам и в открытых руслах в жидкости между ее отдельными слоями возникают внутренние силы трения, или силы вязкости, величина которых зависит от рода жидкости и распределения скоростей между ее отдельными слоями.

Свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению ее частиц и развивать при движении внутренние касательные напряжения называется вязкостью жидкости.

Гипотеза И. Ньютона, высказанная им в 1723 г., о существовании внутреннего трения в жидкости была дана в общей форме. В последующем эта гипотеза была доказана и подтверждена опытами русского физика проф. Н. П. Петрова (1836—1920), положившего начало гидродинамической теории смазки подшипников и давшего формулу для выражения силы внутреннего трения в жидкости.

Н. П. Петров установил, что сила внутреннего трения $T_{\text{тр}}$ не зависит от давления в жидкости, пропорциональна площади поверхности соприкосновения трущихся слоев S , относительной скорости трущихся слоев du/dy и зависит от рода жидкости, характеризуемого динамической вязкостью μ .

Установленный Н. П. Петровым закон внутреннего трения $T_{\text{тр}}$ выражается равенством

$$T_{\text{тр}} = \pm \mu S \frac{du}{dy}, \quad (1.6)$$

где μ — динамическая вязкость жидкости; S — площадь трущихся слоев; (du/dy) — градиент скорости, характеризующий относительное изменение скорости между отдельными слоями потока.

Если представить себе поток жидкости состоящим из отдельных бесконечно тонких слоев толщиной dy каждый (рис. 1.1) и допустить, что скорость частиц жидкости изменяется от слоя к слою, то величина градиента скорости du/dy представляет тангенсом угла наклона касательной к эпюре скоростей в данной точке.

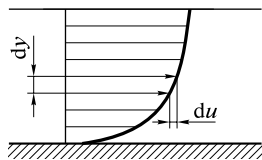


Рис. 1.1

Отнесенная к единице площади сила трения (т. е. касательное напряжение) согласно формуле (1.6) запишется в виде

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy}. \quad (1.7)$$

Из выражения (1.7) видно, что динамическая вязкость численно равна единичной силе трения τ при градиенте скорости равном единице. Знак « \pm » в формулах (1.6) и (1.7) свидетельствует о том, что два соседних слоя жидкости взаимодействуют друг с другом, один слой, движущийся с большей скоростью, ускоряет другой — знак «плюс», который, в свою очередь, тормозит первый — знак «минус».

Определим размерность динамической вязкости. Так как размерность касательного напряжения τ есть отношение силы к площади, а размерность градиента скорости $\left[\frac{du}{dy} \right] = \frac{1}{c}$ (единица на секунду), следовательно, размерность динамической вязкости $[\mu] = \frac{H}{M^2} c = \text{Па} \cdot \text{с}$.

Для характеристики вязкости применяют также отношение динамической вязкости к плотности, называемое *кинематической вязкостью* $\nu = \mu/\rho$. Кинематическая вязкость имеет размерность $[\nu] = \text{м}^2/\text{с}$.

Вязкость жидкостей уменьшается с повышением температуры. Для воды зависимость кинематической вязкости от температуры t , °С, выражается формулой

$$\nu = \frac{177,5 \cdot 10^{-8}}{1 + 0,0337t + 0,000221t^2} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (1.8)$$

Значения динамической и кинематической вязкостей для различных жидкостей при 20 °С приведены в табл. 1.1.

Для опытного определения вязкости жидкостей применяют приборы — вискозиметры.

В гидравлике применяется иногда понятие идеальной жидкости, фактически не существующей в природе. Такая жидкость характеризуется полным отсутствием сопротивления растягивающим и сдвигающим силам, и не изменяет своего объема при изменении давления и температуры.

Понятие идеальной, или невязкой, жидкости введено в гидравлику для облегчения вывода некоторых теоретических положений, помогающих уяснить законы движения реальной жидкости. Полученные для невязкой жидкости закономерности в дальнейшем корректируются путем введения опытных поправок, учитывающих свойства вязких жидкостей.

Таблица 1.1

Жидкость	μ , 10^{-5} Па·с	ν , 10^{-8} м ² /с
Вода пресная	101	101
Анилин	447	430
Бензол	65	74
Глицерин безводный	51200	41 00
Масло касторовое	97200	100 200
Ртуть	155	11,4
Сероуглерод	37	29,4
Спирт этиловый безводный	119	154
Хлористый натрий (раствор с 26 % NaCl)	184	153
Эфир этиловый	26	36,3

Кроме обычных жидкостей, для которых характерно уравнение (1.7), существуют еще аномальные, или неньютоновские, жидкости. К ним относятся смазочные масла, нефтепродукты, строительные растворы и др.

Для таких жидкостей закон внутреннего трения выражается в виде

$$\tau = \tau_0 \pm \mu \frac{du}{dy}, \quad (1.9)$$

где τ_0 — касательные напряжения в покоящейся жидкости, после преодоления которых жидкость приходит в движение.

1.3. Силы, действующие на жидкость

В состоянии покоя или движения на жидкость действуют различные силы. По своей природе эти силы можно разделить на две группы: силы массовые и силы поверхностные. *Силы массовые* (или объемные), действуют на все частицы данного объема жидкости; к таким силам относятся сила тяжести, сила инерции, центробежные силы и т. п.

Силы поверхностные, приложенные к той или иной поверхности ограничивающей рассматриваемый объем жидкости или проведенной

внутри этого объема; к таким силам относятся нормальные и касательные силы, т. е. силы гидродинамического давления, силы трения, силы упругости.

Массовые силы пропорциональны массе жидкости, а для однородных жидкостей — пропорциональны объему, в связи с чем их часто называют объемными. Общая закономерность для массовых сил выражается следующим соотношением:

$$F_m = \rho a W, \quad (1.10)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³; a — ускорение, м/с²; W — объем жидкости, м³.

Поверхностные силы пропорциональны площади той поверхности жидкости, на которую они действуют. В общем виде такую закономерность можно выразить формулой

$$F_p = p\omega, \quad (1.11)$$

где p — единичная сила, или напряжение, Н/м²; ω — площадь действия силы, м².

Обособленное место занимает сила поверхностного натяжения. На поверхности жидкости или на поверхности раздела между двумя жидкостями наблюдается нечто вроде упругой пленки, то есть жидкость ведет себя так, словно ее удерживает упругая эластичная оболочка, причем эффект такой оболочки более заметен при малых размерах (например, капля жидкости). По-видимому, сцепление между молекулами поверхности жидкости вызывает поверхностное натяжение на границе жидкости с газом или другой несмешиваемой жидкостью.

Поверхностное натяжение измеряется силой, приходящейся на единицу длины (периметра), а общая сила поверхностного натяжения вычисляется по формуле

$$F_{\pi} = \sigma l, \quad (1.12)$$

где σ — единичная сила или коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; l — длина или периметр действия силы, м.

По отношению к какому-либо выделенному объему все силы, действующие на него можно разделить на две группы: силы внешние, действующие на данный объем со стороны окружающей его среды, и силы внутренние — это всегда поверхностные силы взаимодействия частиц жидкости.