

Оглавление

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	9
ПРЕДИСЛОВИЕ	10
ВВЕДЕНИЕ	12
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ГИДРАВЛИКИ	17
1.1 Гидростатика	25
1.1.1 Напряженное состояние частицы жидкости	25
1.1.2 Гидростатическое давление	27
1.1.3 Основное уравнение гидростатики	30
1.1.4 Давление жидкости на плоские поверхности. Центр давления.....	33
1.1.5 Давление жидкости на криволинейные поверхности	37
1.1.6 Плавучесть тел	41
1.2 Основные понятия кинематики и динамики жидкости ..	44
1.2.1 Методы изучения движения жидкости	44
1.2.2 Линия и трубка тока, элементарная струйка.....	47
1.2.3 Поток и его элементы.....	50
1.2.4 Дифференциальные уравнения Эйлера движения невязкой жидкости	54
1.2.5 Дифференциальное уравнение неразрывности	61
1.2.6 Уравнение Бернулли для элементарной струйки	63
1.2.7 Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости ...	68
1.2.8 Теорема изменения количества движения для потока жидкости	72
1.3 Потери энергии при движении жидкости	76

1.3.1 Виды гидравлических сопротивлений	76
1.3.2 Основное уравнение установившегося равномерного движения жидкости.....	77
1.3.3 Потери напора по длине при равномерном установившемся движении жидкости	80
1.3.4 Режимы движения жидкости.....	84
1.3.5 Касательные напряжения в турбулентном потоке.....	89
1.3.6 Распределение скоростей в турбулентном потоке. Гидравлически гладкие и шероховатые трубы.....	95
1.3.7 График Никурадзе. Формулы коэффициентов Дарси и Шези.....	99
1.3.8 Местные потери энергии	103
2. ГИДРАВЛИКА ОТКРЫТЫХ ПОТОКОВ.....	107
2.1 Типы открытых русел и виды движения жидкости	107
2.2 Удельная энергия сечения. Критическая глубина. Спокойное, бурное и критическое состояние потока в открытом русле	111
2.3 Режимы движения жидкости в лотках и каналах.....	116
2.3.1 Турбулентность и многофазные потоки	117
2.3.2 Потери энергии при гидротранспорте грунта	120
2.4 Расчетные зависимости равномерного движения в открытых призматических руслах.....	122
2.4.1 Определение коэффициента Шези для открытых русел.....	123
2.4.2 Допускаемые скорости течения в каналах	124

2.4.3 Гидравлически наивыгоднейшее поперечное сечение канала	126
2.4.4 Гидравлический показатель русла	127
2.4.5 Расчет равномерного безнапорного движения в каналах замкнутого поперечного профиля	129
2.4.6 Приближенные расчеты равномерного движения в естественных руслах	131
2.5 Неравномерное плавноизменяющееся движение жидкости в открытых руслах	132
2.5.1 Дифференциальные уравнения неравномерного плавноизменяющегося движения в призматических руслах	134
2.5.2 Формы свободной поверхности при неравномерном плавноизменяющемся движении в призматических руслах	137
2.5.3 Типы задач при расчете неравномерного движения жидкости в призматических руслах.....	145
2.5.4 Построение кривых свободной поверхности потока в непризматических руслах.....	146
2.6 Неустановившееся движение жидкости в открытых руслах.....	149
2.6.1 Примеры неустановившихся потоков.....	150
2.6.2 Дифференциальные уравнения неустановившегося медленно изменяющегося движения потока в открытых руслах	155
2.7 Гидравлический прыжок.....	158
2.7.1 Общие понятия.....	158

2.7.2 Уравнение гидравлического прыжка.....	162
2.7.3 Определение основных характеристик гидравлического прыжка.....	167
2.7.4 Сопряжение бьефов.....	170
2.8 Водосливы	176
2.8.1 Основные определения	177
2.8.2 Классификация водосливов.....	178
2.8.3 Формула пропускной способности прямоугольного водослива.....	181
2.8.4 Водосливы с тонкой стенкой	182
2.8.5 Водосливы практического профиля	185
2.8.6 Водосливы с широким порогом.....	187
2.8.7 Использование водосливов в дорожном строительстве.....	189
3. ОБЩАЯ ГИДРОЛОГИЯ И ГИДРОЛОГИЯ ВОДОТОКОВ	193
3.1 Круговорот воды в природе и водные ресурсы Земли ...	193
3.2 Водные ресурсы Республики Беларусь.....	198
3.3. Факторы формирования поверхностных вод суши.....	201
3.3.1 Атмосферные осадки	201
3.3.2 Испарение	211
3.3.3 Подземные воды	217
3.4 Гидрология рек	228
3.5 Морфология и морфометрия реки и ее бассейна.....	230
3.6 Водный и радиационный баланс речных водосборов	246
3.7 Характеристики речного стока, их интерпретация и картирование	254
3.8 Режим речного стока	262

3.9 Термический и ледовый режим рек	266
3.10 Термический режим рек Беларуси	276
3.11 Ледовый режим рек Беларуси.....	279
4. ГИДРОМЕТРИЯ	283
4.1 Организация гидрометрических работ и техника безопасности.....	283
4.2 Организация водомерных наблюдений	284
4.2.1 Выбор участка реки для наблюдений за уровнями воды	284
4.2.2 Топографические работы при организации гидрологических постов	287
4.2.3 Устройство водомерного поста.....	289
4.2.4 Наблюдения за уровнем и продольным уклоном водной поверхности.....	298
4.2.5 Наблюдения за термическим режимом рек.....	301
4.2.6 Визуальные наблюдения за состоянием водных объектов	302
4.3 Измерение глубин и русловые съемки.....	303
4.3.1 Средства и методы для измерения глубин и профилей дна	303
4.3.2 Способы выполнения промерных работ.....	306
4.3.3 Обработка результатов промерных работ.....	308
4.4 Измерение скоростей течения воды.....	314
4.4.1 Распределение скоростей течения воды в русле	314
4.4.2 Методы и классификация приборов для измерения скоростей течения воды	316

4.4.3 Измерение скорости течения воды с помощью гидрометрических вертушек	322
4.4.4 Измерение скорости течения воды с помощью гидрометрических поплавков	325
4.5 Определение расходов воды различными методами.....	329
4.5.1 Общие принципы определения расходов воды	329
4.5.2 Измерение расхода воды	330
4.5.3 Измерение расходов воды на малых реках	334
4.5.4 Определение максимальных расходов воды по меткам уровней	342
4.6 Организация наблюдений за твердым стоком	345
4.6.1 Общие сведения о твердом стоке	345
4.6.2 Наблюдения за стоком взвешенных наносов	349
4.6.3 Измерение расхода взвешенных наносов	353
4.6.4 Вычисление расходов взвешенных наносов	355
4.6.5 Приборы для взятия проб и методика вычисления расхода донных наносов	358
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	364

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Волчек Александр Александрович — доктор географических наук, профессор, лауреат премии Национальной академии наук Беларуси декан факультета инженерных систем и экологии УО «Брестский государственный технический университет».

Автор более 1000 научных работ. Область научных интересов — изменение водного баланса речных водосборов, моделирования процессов формирования водного режима.

E-mail: Volchak@tut.by

Шведовский Пётр Владимирович — кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой геотехники и транспортных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет».

Автор более 700 научных работ, в том числе 15 монографий и 19 учебных пособий для вузов. Область научных интересов — экологические проблемы, трансформация ландшафтов, прогнозы и моделирование рисков для урбанизированных территорий.

E-mail: ofig@bstu.by

Волчек Анастасия Александровна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет».

Автор более 120 научных работ. Область научных интересов — моделирования процессов формирования максимального стока их колебания и прогноз.

E-mail: volchekan@tut.by

Шешко Николай Николаевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры природообустройства УО «Брестский государственный технический университет».

Автор свыше 60 научных и учебно-методических работ, в том числе трех учебных пособий для вузов. Область научных интересов научно-методическое, информационное сопровождение последипломного образования; экологические проблемы урбанизированных территорий.

E-mail: optimum@tut

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие обобщает многолетний опыт изложения авторами курса «Гидравлика, гидрология, гидрометрия» в Брестском государственном техническом университете (БрГТУ). При этом оно отражает традиции, заложенные в ведущих научных центрах стран СНГ сформированных в XX веке и получившие развитие в XXI веке и во многом следует известному учебнику «Гидравлика, гидрология, гидрометрия» Н. М. Константинова, Н. А. Петрова и Л. И. Высоцкого. Однако этот учебник был издан более тридцати лет назад и он практически исчез из большинства библиотек вузов.

В настоящее время в Беларуси нет единого учебника или учебного пособия для автодорожных специальностей и к тому же в изложении предлагаемого курса произошли значительные изменения. Появились новые конструкции сооружений, изменилась технология их возведения, ужесточились требования охраны окружающей среды, связанные с существенным влиянием на гидрологический режим рек и водоемов происходящих изменений климата.

Строительство современных автомобильных дорог и аэродромов в сложных гидрогеологических условиях поставило перед гидравликой дорожных сооружений ряд задач, что определило необходимость рассмотрения в учебном пособии соответствующих изменений в области знаний по новым материалам, гидрологии, дорожному водоотводу, экологии и др.

В целом курс «Гидравлика, гидрология, гидрометрия» относится к общетехническим. Однако многие разделы, посвященные, например дорожным гидротехническим сооружениям, имеют прикладной характер. Это приводит к некоторым особенностям изложения курса и соответственно сказывается на содержании учебного пособия.

Материал учебного пособия делится на две части. Базовый материал курса, рассматривающий основные законы гидравлики носит наиболее выраженный общетехнический характер, и ее изложение и по содержанию, и по методике не существенно различается для многих строительных специальностей, особенно таких родственных, как гидротехническое и

мелиоративное строительство. Поэтому авторы сочли целесообразным отмеченный объем курса выделить в первую часть.

В главах, посвященных дорожно-мостовой гидравлике и аэродромным сооружениям, широко используются основные законы и зависимости гидравлики, излагаемые в первой части. Специальные темы, а также гидрология и гидрометрия были четко ориентированы на соответствующие специальности, имеют прикладной характер и объединены во второй части учебного пособия.

Авторы признательны рецензентам: профессору д.т.н. В. С. Северянину и профессору, д.т.н. В. Е. Левкевичу, оказавшим большую помощь по подготовке рукописи.

Учебное пособие в полной мере соответствует программе курса, утвержденной Министерством образования Республики Беларусь для автомобильных специальностей.

Замечания по содержанию учебника авторы с благодарностью примут от читателей по адресу:

224017, Брест, ул. Московская, 267, БрГТУ.

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие включает в себя сведения по трем дисциплинам: гидравлике, гидрологии и гидрометрии.

Гидравлика — одна из ветвей механики, изучающая законы равновесия и движения жидкости, способы применения этих законов к решению инженерных задач.

Гидравлика является основой таких специальностей, как дорожное строительство, гидротехника, мостостроение, водный транспорт и т. д. Трудно назвать отрасль техники, строительства и другие сферы деятельности человека, где бы не использовалась гидравлика.

В большинстве случаев строительную практику удовлетворяет решение задач гидравлики в относительно простой одномерной постановке. Значительно реже встречается двумерная постановка, задач, к которым относятся так называемые плановые задачи. Одна из них — движение речного потока в широком русле перед и за мостовым переходом. Наибольшие трудности вызывают задачи в трехмерной, пространственной постановке.

Большинство задач гидравлики, решаемых в автодорожном строительстве, рассматриваются в одномерной постановке, и их решение обычно включает следующие этапы: 1) выявление физических особенностей изучаемого явления, постановка задачи; 2) формирование упрощенной модели с учетом требуемой подробности и точности решения, разработка принципиального решения для модели; 3) проверку полученных результатов в эксперименте и на основе его результатов корректировки, если необходимо, теоретического решения. Для частных случаев в этой схеме могут отсутствовать те или иные этапы.

Гидрология — наука о гидросфере земли, о протекающих в ней процессах и представляет собой обширный раздел естествознания, который делится на *гидрометеорологию*, *гидрологию поверхностных вод суши* (гидрологию суши), *океанологию* и *гидрогеологию*.

Специалисты строительного профиля изучают *инженерную гидрологию*. Практической целью этой отрасли науки является разработка методов рационального использования

гидрологических процессов в технической и хозяйственной деятельности человека. Строителей транспортных сооружений интересуют в основном водные потоки на суше. Поэтому для соответствующих специальностей из широкого круга вопросов выделяются только те, которые относятся к *гидрологии суши* или ее части — *гидрологии рек*.

Гидрометрия — раздел гидрологии, включающий методы наблюдения и измерения гидрологических характеристик потоков. В гидрометрии рассматриваются и приборы для измерений уровней свободной поверхности воды, глубин водных потоков, их скоростей и других характеристик.

Перечисленные дисциплины — гидравлику, гидрологию и гидрометрию — объединяет общность цели: *гидравлико-гидрологическое обоснование транспортных сооружений*. Их объединяет и объект изучения — водные потоки на поверхности земли.

Краткий исторический очерк. Накопленные по результатам наблюдений знания позволяли еще за тысячи лет до нашей эры строить крупные мосты, водопроводные системы и другие гидротехнические сооружения.

Так вода всегда была непременным условием существования человека, то уже с глубокой древности велись наблюдения за режимом рек и водоемов, делались попытки предсказания их изменений. Ярким примером являются тысячелетние наблюдения древних египтян за уровнем воды в р. Нил. Такие сведения привели к первым обобщениям в форме отдельных законов гидравлики. Древнейшим из них считается закон Архимеда (207—212 гг. до н. э.) о выталкивающей силе.

Более поздние исследования о поведении жидкости в состоянии покоя и движения связаны с именами выдающихся физиков, механиков, математиков средневековья и эпохи Возрождения. Среди них следует назвать Леонардо да Винчи (1452—1519). Его работы были посвящены вопросам гидростатики, истечения жидкости через отверстия и водосливы, волновым явлениям. Леонардо да Винчи был автором целого ряда проектов гидравлических устройств и гидротехнических сооружений.

Большой вклад в развитие гидравлики внес Галилео Галилей (1564—1620). Занимаясь сопротивлением движению жидкости, этим важным вопросом для решения задач гидравлики, он

показал, что это сопротивление зависит от скорости и плотности жидкости.

Успехи в развитии физики, математики, механики и других смежных наук способствовали и новым достижениям в гидравлике. Так, Э. Торричелли (1608–1647) предложил формулу для расчета скорости истечения жидкости из отверстий, а Б. Паскаль (1623–1662) известен как автор закона о сообщающихся сосудах.

Сформулировавший основные законы классической механики И. Ньютон (1643–1727) предложил гипотезу о внутреннем трении в вязкой жидкости.

Основы гидравлики как науки заложили члены Петербургской Академии наук Д. Бернулли (1700–1782) и Л. Эйлер (1707–1783). Они разработали фундаментальные уравнения гидравлики и обобщили известные до этого сведения по отдельным ее разделам. Д. Бернулли, в частности, получил из закона живых сил одно из основных уравнений гидравлики, названное его именем. Л. Эйлер вывел дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости, получил решение ряда задач гидравлики. К концу XVIII в. в области гидравлики был накоплен значительный объем знаний. Это достигнуто трудами целой плеяды известных ученых Ж. Д. Д'Аламбера (1717–1783), Ж. Л. Лагранжа (1736–1813), П. С. Лапласа (1749–1827) и др.

Бурное развитие транспортных связей предопределило приоритет гидротехников и мостостроителей в решении задач гидравлики, например А. Шези (1718–1798), автора метода моделирования потоков.

Начало развития в России гидравлики как основы строительства гидротехнических сооружений относится ко Временам Петра I, когда были построены Вышневолоцкая и Березинская водные системы. С тех пор стали производиться систематические наблюдения за режимом отдельных рек и озер, возникли первые гидрометрические посты. Решению многих задач гидравлики и гидрометрии посвятил свои работы гениальный русский ученый М. В. Ломоносов (1711–1765).

Развитие гидравлики в XIX в. отмечено многочисленными исследованиями как общетеоретического, так и прикладного характера. Достижения этого периода связаны со многими

именами крупнейших ученых: А. Сен-Венана, А. Дарси, Ю. Вейсбаха, О. Рейнольдса, А. Базена. В России плодотворно работали И. С. Громека, Н. Е. Жуковский, Н. П. Петров и многие другие.

В гидрологию и гидрометрию большой вклад внесли В. М. Лохтин, А. И. Воейков, В. Г. Глушков, Д. И. Кочерин и др.

Достижения гидравлики лежат в основе важнейших направлений технического прогресса в строительстве, в самых разнообразных технологических процессах, в системах управления и привода различных машин и механизмов.

Потребность в изучении гидрологического режима водотоков Беларуси начала ощущаться уже в начале XVIII в. Этому способствовало и ее географическое положение на водоразделе двух морей — Балтийского и Черного, а также наличие таких крупных рек, как Западная Двина, Неман, Днепр, Березина, Сож и Припять, издавна служивших водными путями. В XVIII в. положено начало организации сети водомерных постов на реках Беларуси. В начале XIX в. с развитием судоходства на внутренних водных путях возрос интерес к изучению колебания уровня воды в реках. В 1818 г. Управлением водяными и сухопутными сообщениями дается предписание об обязательных ежедневных измерениях уровней воды на всех водных системах. Развитие различных видов транспорта, сопровождавшееся ростом мостостроения на шоссейных и железных дорогах, необходимостью улучшения судоходных условий рек, вызвало в 70-х гг. XIX в. создание довольно обширной сети постоянно действующих водомерных постов, главным образом на судоходных реках и каналах.

Современная гидрологическая сеть Департамента по гидрометеорологии Беларуси состоит из 123 гидрологических постов на реках и 14 гидрологических постов на озерах и водохранилищах.

Роль и место гидравлики, гидрологии и гидрометрии в дорожно-мостовом и аэродромном строительстве. Развитие и совершенствование транспортной сети — одна из главнейших задач народного хозяйства нашей страны. Транспортное строительство играет определяющую роль в развитии любого региона. Знание гидрологии и гидрометрии позволит обеспечить качественное строительство и надежную эксплуатацию дорожно-мостовых и аэродромных сооружений.

Мостовые переходы и другие водопропускные сооружения — сложные и дорогие объекты, находящиеся в очень тяжелых условиях эксплуатации. Именно их надежность, как правило, определяет эффективность и бесперебойность работы транспортной сети. Воздействие воды на полотно дороги и ее основание, на сооружения дорожного водоотвода, водопропускные трубы и мосты представляет одну из главных причин нарушения нормальной эксплуатации. Еще более высокие требования предъявляются к взлетно-посадочным полосам аэродромов.

Каждый из перечисленных объектов в течение длительного срока эксплуатации подвергается многократному воздействию потоков в широком диапазоне изменения их водности, начиная с полного пересыхания и кончая наводнениями и паводками. Как правило, для дорожных сооружений самыми опасными являются потоки в периоды паводков и половодий. Пучинообразование и вызываемая им резкая потеря несущей способности основания проезжей части дороги наиболее интенсивны при высоких уровнях грунтовых вод. Перелив через насыпи, кюветы, лотки может вызвать многоводные потоки при таянии снега и интенсивных дождях. В период высоких половодий возможен размыв укрепленных участков русл и подмыв мостовых опор, затопление подходов к мостам и пролетных строений.

Изучив настоящий курс, будущий инженер должен овладеть методикой измерения и прогнозирования характеристик водных потоков и методами расчета сооружений на них на основе глубокого понимания физики явления, т. е. разработать гидрологическое обоснование для гидравлических расчетов, определяющих технологию и сроки возведения сооружений, особенности эксплуатации сооружений.

Особо следует отметить роль гидравлики, гидрологии и гидрометрии в обеспечении *обратной связи*, т. е. прогноза влияния дорожно-мостовых и аэродромных сооружений на потоки и водную среду, на прилегающую территорию. Такой прогноз позволяет оценить последствия воздействия размывов русл и их заиления, плановых деформаций в долинах рек, опасность для земельного фонда развитие процессов оврагообразования, затопления и заболачивания территорий и меры по их ограничению и предотвращению.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ГИДРАВЛИКИ

Гидравлика — одна из разделов механики, изучающая законы равновесия и движения жидкости, способы применения этих законов к решению инженерных задач.

Жидкость и ее основные физические свойства

С точки зрения физических свойств жидкость это тело, обладающее текучестью. Текучестью характеризуются как капельные жидкости, так и газы.

Физические свойства жидкостей проявляются в особенностях их поведения в тех или иных условиях. Они лежат в основе многих законов и зависимостей гидравлики. Влияние отдельных физических свойств на разные явления и процессы в жидкости не одинаково. Оно может меняться и при изменении условий протекания этих явлений.

В настоящем разделе рассматриваются физические свойства жидкостей, на которых базируются положения гидравлики в характерных для транспортного строительства условиях.

Жидкости по своей атомно-молекулярной структуре занимают промежуточное положение между твердыми телами и газами. В силу этого жидкость имеют физические свойства, характерные и для тех и для других. Поэтому имеет смысл рассматривать физические свойства жидкости сопоставительно с соответствующими свойствами твердых и газообразных тел. Основанием для указанного подхода является общность атомно-молекулярного взаимодействия, которое определяется одновременным влиянием двух противоположных сил — притяжения и отталкивания. При малых расстояниях между молекулами превалирует сила отталкивания, при значительных — притяжения. Следовательно, при некотором расстоянии l_0 обе силы уравниваются друг друга. При этом равна нулю и потенциальная энергия молекул.

Плотность и удельный вес

Расстояние l_0 между соседними атомами твердых веществ определяет некоторое превышение потенциальной энергии частиц над средней кинетической тепловой движением.

Последнее ограничено только колебанием частиц около строго фиксированных центров. Это обеспечивает упорядоченность расположения атомов не только внутри кристалла, но и относительно значительной части твердого тела. Такая особенность строения определяет характерную способность твердого тела сохранять свой объем и форму в широком диапазоне изменения внешних условий и соответственно постоянство отношения массы и силы тяжести к объему, т. е. *плотности и удельного веса*.

Так как молекулы в жидкости располагаются на примерно таком же расстоянии l_0 , что и в твердых телах, косвенным подтверждением чего является сохранение того же значения плотности многих твердых веществ при переходе в расплавленное жидкое состояние, так отсюда вытекает близость некоторых их физических свойств.

Данная масса жидкости m , как и твердого тела, при изменении внешних условий практически сохраняет определенный объем V и соответственно плотность $\rho = m/V$ и удельный вес $\gamma = \rho g = G/V$, где G и g — соответственно сила тяжести и ускорение свободного падения. Плотность воды равна 1000 кг/м^3 , а удельный вес воды — 9810 Н/м^3 .

Сжимаемость и температурное расширение

Стабильность атомов относительно друг друга в твердых телах предопределяет их относительно высокую устойчивость к внешним воздействиям. Жидкости ведут себя примерно так же.

Сжимаемость жидкости характеризуется коэффициентом объемного сжатия β_v , численно равным отношению уменьшению объема V (увеличению плотности) при повышении на единицу давления p :

$$\beta = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dp}. \quad (1.1)$$

Часто используется величина, обратная коэффициенту объемного сжатия и называемая *модулем упругости* $E = 1/\beta_v$.

Модуль упругости, например, воды $E = 2 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ примерно в сто раз меньше, чем у стали, и практически такой же, как у кирпичной кладки.

Колебания объема жидкости при изменении температуры оцениваются **температурным** коэффициентом объемного расширения β_T :

$$\beta_T = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT}. \quad (1.2)$$

Жидкости, как и твердые тела слабо реагируют на изменение давления и температуры. Для воды $\beta_T = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

При решении большинства задач транспортного строительства можно считать, что жидкость практически не сжимается при изменении давления и не меняет свой объем при колебаниях температуры.

Эти свойства жидкости позволяют рассматривать ее как однородную сплошную среду. Такая идеализация дает возможность использовать в гидравлике методы механики сплошных сред.

Газы также можно считать несжимаемой средой в случаях движения, когда относительные изменения плотности их малы, т. е. $\Delta\rho/\rho \ll 1$. К воздуху и другим газам это относится при скоростях течения до 70 м/с и относительно малых перепадах давления.

Текучесть и вязкость

Молекулы жидкости не так жестко связаны между собой, как в твердом веществе, и не так свободны, как в газах. В постоянном ограниченном объеме, заполненном жидкостью, любая ее молекула может занимать любое положение.

Относительно высокая интенсивность обменов молекулами внутри конечного объема приближает жидкости по некоторым физическим свойствам к газам. Если на часть покоящегося объема таких жидкостей в течение определенного времени действует сколь угодно малая сила, это вызывает сдвиг частиц относительно друг друга — течение жидкостей, например, при наклоне сосуда (рис. 1.1 а).

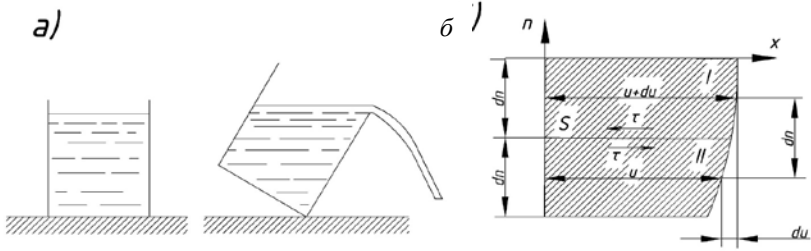


Рис. 1.1 – К вопросу о текучести жидкости

Текучестью жидкости называют ее способность неограниченно деформироваться под действием приложенной силы.

Свойство текучести, которым обладают вода и многие другие жидкости, роднит их с газами и говорит о том, что в состоянии равновесия текущие жидкости не воспринимают касательных напряжений. Жидкости, как и газы, практически не воспринимают и растягивающие нагрузки.

Относительное смещение двух слоев жидкости I и II (рис. 1.1 б) вдоль направления x вызывает сопротивление деформации сдвига как результата нарушения молекулярных связей по поверхности S . Следовательно, жидкость при движении обладает свойством сопротивляться деформационным составляющим движения жидких частиц. Способность жидкости при движении сопротивляться сдвигу называется *вязкостью*.

Возникающие вследствие вязкости касательные напряжения в жидкости (рис. 1.1 б) зависят от молекулярных связей.

В подавляющем большинстве случаев при движении таких высокотекучих жидкостей, как вода их можно определить *динамической вязкостью* μ и числом нарушенных связей, оцениваемых интенсивностью изменения скорости u по нормали n к движению:

$$\tau = \pm \mu \cdot \frac{du}{dn}. \quad (1.3)$$

Эту зависимость называют *законом вязкостного трения Ньютона*, а подчиняющиеся этому закону жидкости — *ньютоновскими*. К ньютоновским жидкостям относятся вода, газ и другие жидкости с высокой текучестью.

В соответствии с известным правилом механики принято считать касательные напряжения всегда положительными. Поэтому в правой части зависимости берется знак «+», если градиент скорости по нормали du/dn положителен, и знак «-», если он отрицателен.

Единицей вязкости в СИ является паскаль-секунда (Па с). Обычно применяют дольные единицы мПа с ($1 \text{ мПа с} = 10^{-3} \text{ Па с}$) или мкПа с ($1 \text{ мкПа с} = 10^{-6} \text{ Па с}$).

Природа вязкости жидкости и газа не одинакова. В жидкости повышение температуры ослабляет межмолекулярные связи и способствует снижению динамической вязкости. Для воды отмеченное явление выражается формулой Пуазейля:

$$\mu = \frac{\mu_0}{(1 + 0.337 \cdot T + 0.000221 \cdot T^2)}, \quad (1.4)$$

где $\mu_0 = 17,9 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$

μ — динамическая вязкость воды при $T = 0^\circ \text{C}$.

В газах с повышением температуры также усиливается диффузия. Но именно это усиление обмена импульсами через плоскость сдвига определяет рост динамической вязкости газов.

Во многих выводах и расчетах используется *кинематическая вязкость*, представляющая отношение динамической вязкости и плотности жидкости, т. е. $\nu = \mu / \rho$.

Размерность кинематической вязкости в системе единиц СИ — $L^2 T^{-1}$ ($\text{м}^2/\text{с}$).

Все жидкости, не подчиняющиеся закону вязкостного трения Ньютона, называются *неньютоновскими*. Общий закон вязкостного трения для них выражается более сложной зависимостью, в частности имеет в правой части величину τ_0 и члены вида $(du/dn)^m$, учитывающие нелинейность зависимости касательных напряжений от составляющих движения жидких частиц.

Явления на границах жидкостей

Однородность молекулярных связей внутри жидкости нарушается на ее границах. Со стороны газов и некоторых (несмачиваемых) твердых тел они оказываются слабее, чем

внутри самой жидкости. Со стороны других твердых тел (смачиваемых) связи оказываются прочнее.

В большинстве случаев, например в русле реки, жидкость частично граничит с твердым телом, а по остальной поверхности — с газом (в отдельных случаях по всей поверхности жидкость может граничить только с одной средой, например с газом — простейшим примером является капля). Это требует введения понятия *силы поверхностного натяжения* применительно к модели жидкости как сплошной однородной несжимаемой среды. Эту силу характеризует *коэффициент поверхностного натяжения* σ — величина, равная силе, с которой две соседние части свободной поверхности взаимодействуют друг с другом в пределах разделяющей их линии (контура) единичной длины.

Силы поверхностного натяжения удерживают свободную поверхность от разрушения, стягивают ее, стремясь свести к минимуму. Из всех возможных форм тела минимум свободной поверхности имеет шар. Шаровую форму и принимают капли жидкости под действием только сил поверхностного натяжения, когда исключено влияние других сил. Примером может служить форма капли жидкости в условиях невесомости.

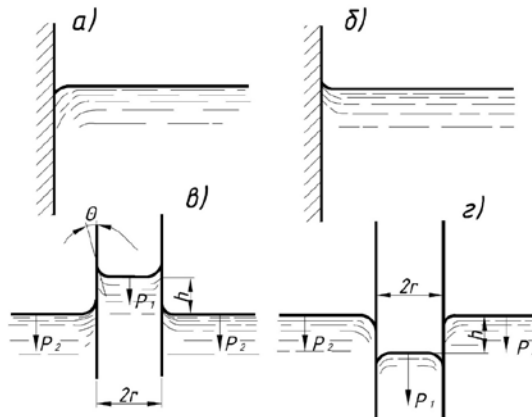


Рис. 1.2 — К вопросу явления на границах сред

В месте контакта жидкости, твердого тела и газа свободная поверхность, если твердое тело не смачивается, принима-

ет выпуклые очертания, что приводит к местному снижению уровня (рис. 1.2 а). Противоположный характер поведения поверхности жидкости наблюдается в месте контакта со смачиваемым твердым телом, когда силы взаимодействия в состоянии подтянуть ближайшие молекулы жидкости выше уровня свободной поверхности. Последняя принимает очертания вогнутой поверхности (рис. 1.2 б).

Искривление свободной поверхности изменяет молекулярное давление, при этом оно повышается при выпуклой свободной поверхности и снижается при вогнутой.

Наиболее ярко последствия изменения молекулярного давления проявляются в тонких каналах — *капиллярах*. Если стенки капилляра смачиваются, то местное снижение молекулярного давления в нем создает перепад p_2 — который уравнивается весом жидкости за счет высоты капиллярного поднятия h (рис. 1.2, в). В капиллярах из несмачиваемых материалов наблюдается снижение уровня (рис. 1.2 г).

Высоту капиллярного поднятия в трубке радиусом r (рис. 1.2 в, г) можно рассчитать по формуле $h=2\cdot\sigma \cos\theta/(\rho\cdot g\cdot r)$, где θ — угол между смоченной поверхностью и касательной к мениску.

Поднятие жидкости в тонких капиллярах, например в глинистых грунтах, может достигать нескольких метров. Капиллярный подъем может оказаться определяющим в процессе водонасыщения грунта, в потере из-за этого его несущей способности как основания сооружения, в пучинообразовании и т. д.

В большинстве случаев в гидравлике рассматриваются движения жидкости по смачиваемым поверхностям русла. Превышение сил сцепления жидкости в местах контакта со стенками по сравнению с молекулярными силами внутри самой жидкости обеспечивает очень важное и широко применяемое во многих решениях условие: скорость движения u смоченной поверхности равна нулю. Слой жидкости, ближайший к смоченной поверхности, прилипает к ней и в движении не участвует ($u=0$).

Модели жидкости

В гидравлике наиболее использование имеет модель жидкости как сплошной несжимаемой среды с непрерывным

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине «Электронный универс»
(e-Univers.ru)