



• А.А. Андрижиевский

Механика жидкости и газа

А. А. Андрижиевский

Механика жидкости и газа

*Допущено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений
высшего образования
по техническим и технологическим
специальностям*



Минск
«Вышэйшая школа»
2014

УДК 532/533(075.8)
ББК 22.253я73
А65

Рецензенты: кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» Белорусского национального технического университета; заведующий лабораторией дисперсных систем ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси *В.А. Бородуля*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

ISBN 978-985-06-2509-0

© Андрижиевский А.А., 2014
© Оформление. УП «Издательство
«Вышэйшая школа»», 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка научно обоснованных решений по совершенствованию технологических процессов и технических устройств связана в частности с моделированием и оптимизацией лежащих в их основе массообменных процессов. Успешное решение подобных задач предполагает знание методов описания гидрогазодинамических процессов в областях и каналах различной конфигурации.

В данном учебном пособии автор попытался в лаконичной и доступной для восприятия форме изложить теоретические основы механики жидкости и газа, а также показать их приложение к важным для практики задачам течения идеальной и вязкой жидкостей.

Книга создана на базе курса лекций, прочитанных автором в Белорусском государственном технологическом университете. При подготовке к изданию были частично использованы материалы (§ 4.2, 4.3, прил. 3), разработанные ранее автором совместно с П.С. Клепацким.

Основная цель пособия — разъяснить базовые понятия статики и кинематики газожидкостных систем, показать их фундаментальный характер, развить практические навыки применения основных положений и законов механики жидкости и газа к анализу эффективности работы и совершенствованию технологических устройств и систем.

В пособии рассматривается феноменологический метод описания жидкости и газа в рамках так называемой модели сплошной среды, приводятся основные положения теории напряженного состояния капельной жидкости, представлены физические свойства жидкости и газа, изложены основы механики жидкости и газа, в том числе статика и кинематика жидкостей и газов, а также элементы газовой динамики. Рассматриваются основные дифференциальные и интегральные условия равновесия жидкостей и газов в неподвижных и подвижных координатных системах, силы статического давления жидкости на плоскую и криволинейную поверхности, основные понятия кинематики жидкости и газа, дифференциальные формы выражения законов сохранения массы и им-

пульсов, вихревое и потенциальное течения, закономерности ламинарного и турбулентного движений, основы теории подобия, элементы газовой динамики, включая звуковые колебания и ударные волны.

В учебном пособии приведен ряд практических приложений теоретических основ механики жидкости и газа, включая описание интегральных и одномерных методов анализа установившихся течений жидкости в пористых средах, трубопроводных системах, открытых каналах, а также при истечении из отверстий и насадков.

Изучение механики жидкости и газа, понимание сущности рассматриваемых физических явлений и процессов тесно связаны с усвоением достаточно развитого математического аппарата, которым эта наука оперирует. Соответственно автор счел полезным привести в приложении сведения из векторного анализа и теории поля, в основном известные студентам из курса математики.

Каждая из глав учебного пособия содержит достаточный объем теоретической информации, примеры решения задач по темам, а также задачи для самостоятельного решения, контрольные вопросы и задания.

Основой для освоения предмета являются общенаучные и общепрофессиональные дисциплины — математика, физика, химическая технология и т.д.

Учебное пособие предназначено для студентов учреждений высшего образования по техническим и технологическим специальностям. Оно может быть полезно магистрантам, аспирантам, студентам физических специальностей, преподавателям и практическим работникам.

Все отзывы и пожелания просьба направлять по адресу: издательство «Вышэйшая школа», пр. Победителей, 11, 220048, Минск.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Предмет механики жидкости и газа. Само понятие «*механика жидкости и газа*» включает в рамках данного пособия такие разделы, как *техническая гидромеханика* и *газовая динамика*. В свою очередь, техническая гидромеханика объединяет такие понятия, как гидравлика и аэродинамика (рис. В.1).



Рис. В.1. Составные части механики жидкости и газа

Гидравлика — наука о законах движения капельных жидкостей (так называемая внутренняя задача — движение жидкостей в ограниченных областях, например в трубах, каналах и т.д.).

Аэродинамика — наука о законах движения газов (так называемая внешняя задача — обтекание газовым потоком твердых тел).

Газовая динамика — наука о законах движения газов с большими скоростями.

Знание механики жидкости и газа, в частности технической гидромеханики, необходимо для решения многочисленных инженерных задач. Например:

- расчет трубопроводов различного назначения (воздухопроводы, водопроводы, газопроводы, паропроводы и др.);
- конструирование гидравлических и воздушных машин (насосы, компрессоры, вентиляторы и пр.);
- проектирование котельных агрегатов, печных и сушильных установок, теплообменных, воздухо- и газоочистных аппаратов;
- расчет отопительных и вентиляционных устройств и т.д.

Исторические сведения. Техническая гидромеханика в своем историческом развитии прошла длинный путь. Некоторые принципы гидростатики (теория равновесия жидкостей) были установлены еще Архимедом в трактате «О плавающих телах» (250 лет до н. э.), а затем возрождены и развиты Г. Галилеем (1564–1642) и Б. Паскалем (1623–1662).

В середине XV в. Леонардо да Винчи (1452–1519) положил начало экспериментальной гидравлике, исследовав в лабораторных условиях некоторые вопросы движения воды в каналах, через отверстия и водосливы. Э. Торичелли (1608–1647) предложил известную формулу для скорости жидкости, вытекающей из отверстия, а И. Ньютон (1643–1727) высказал основные положения о внутреннем трении в движущихся жидкостях.

В XVIII в. Д. Бернулли (1700–1782) и Л. Эйлер (1707–1783) разработали общие уравнения движения так называемой идеальной жидкости и тем самым положили начало теоретической гидромеханике. Однако применение этих уравнений приводило к удовлетворительным результатам лишь в немногих случаях.

С конца XVIII в. многочисленные ученые и инженеры (А. Шези, А. Дарси, А. Базен, Ю. Вейсбах и др.) начали опытным путем изучать движение воды и получили значительное число эмпирических формул. Созданная таким путем чисто практическая гидравлика все более отдалялась от теоретической гидродинамики. Сближение между ними наметилось лишь к концу XIX в., когда сформировались новые взгляды на движение жидкости, основанные на исследовании структуры потока. Тонкие экспериментальные исследования законов внутреннего трения в жидкостях при ламинарном движении (в работах Н.П. Петрова (1836–1920)) и перехода от ламинарного движения к турбулентному (в работах О. Рейнольдса (1842–1912)) позволили глубже проникнуть в физическую природу гидравлических сопротивлений.

Несколько позже работы Н.Е. Жуковского (1847–1921) и Л. Прандтля (1875–1953) значительно продвинули изучение важнейших вопросов гидродинамики (в частности, турбулентных потоков), которое завершилось созданием так называемых полуэмпирических теорий турбулентности, получивших широкое практическое применение.

Двадцатый век был ознаменован стремительным развитием авиационной техники, гидротехники, теплоэнергетики,

гидромашиностроения, что обусловило, в свою очередь, бурное развитие технической гидромеханики на базе синтеза теоретических и экспериментальных методов исследования.

Феноменологический подход в механике жидкости и газа.

Одной из важнейших особенностей механики жидкости и газа является то, что в основу ее положена так называемая модель сплошной среды. Как известно, для описания среды, состоящей из большого числа молекул в сравнительно малом объеме (жидкости и газа), в физике широко используются два пути: феноменологический и статистический.

Феноменологический подход изучения основывается на простейших допущениях. Оставляя в стороне вопрос о строении вещества, он наделяет его такими свойствами, которые наилучшим образом устанавливают соответствие между наблюдаемыми явлениями и их описанием.

При феноменологическом подходе жидкости и газы рассматриваются как непрерывная среда, способная делиться до бесконечности. В соответствии с такой моделью все параметры жидкости (плотность, вязкость и др.) изменяются непрерывно от точки к точке. Это позволяет применять при анализе движения сред математический аппарат дифференциального и интегрального исчисления, хорошо разработанный для непрерывных функций.

Понятие о частицах жидкости, которым широко оперирует механика жидкости и газа, неразрывно связано с понятием о физически бесконечно малом объеме. Этот объем, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с характерными размерами объекта, но он содержит настолько много молекул, что его средние характеристики становятся устойчивыми к изменению объема. Таким образом, принятая в механике жидкости и газа процедура «стягивания объема в точку» означает, что он стремится не к нулю, а к физически бесконечно малому объему.

Все законы механики жидкости и газа справедливы до тех пор, пока справедлива модель сплошной среды. Количественно это можно оценить по значению *числа Кнудсена*

$$Kn = l / L,$$

где l — длина свободного пробега молекул; L — характерный размер течения.

Принято считать, что законы механики жидкости справедливы, если $Kn < 0,01$.

Теория напряженного состояния (общие рассуждения). Рассмотрим *напряженное состояние* жидкости, находящейся в равновесии. Прежде чем определить это понятие, заметим, что общие теоремы о равновесии сил применимы также и к жидким телам. Это следует из так называемого *принципа отвердевания*.

Если отдельные части какой-либо подвижной системы, находящейся в равновесии, сделать неподвижными, то равновесие всей системы не нарушится. Следовательно, в случае жидкости, находящейся в равновесии, всегда можно вообразить, что некоторая ее часть отвердела, но от этого равновесие всей жидкости не нарушится, к отвердевшей же части можно применить теоремы о равновесии твердых тел*. Однако для исследования равновесия жидкости не обязательно прибегать к представлению об отвердевании.

Прежде всего напомним, что любые силы представляют собой взаимодействие масс. Если, например, масса m_1 притягивает к себе другую массу m_2 с силой F , то с такой же силой масса m_2 притягивает к себе массу m_1 . Следовательно, обе силы направлены прямо противоположно друг другу (закон Ньютона о равенстве действия и противодействия).

В системе масс, каким-либо образом выделенной среди других масс, следует различать два вида сил:

1) *внутренние силы*, действующие между массами, принадлежащими к рассматриваемой системе;

2) *внешние силы*, действующие между каждой массой рассматриваемой системы и массами, находящимися вне системы.

Теорема В.1. Во всей совокупности сил, действующих в рассматриваемой системе масс, внутренние силы входят всегда по парно в виде равных и прямо противоположных сил, а внешние силы — всегда в одиночку. При суммировании (векторном или координатном) всех сил внутренние силы попарно уничтожаются и остаются только внешние силы.

Следовательно, для равновесия системы необходимо, чтобы сумма сил, приложенных к каждой отдельной массе системы, была равна нулю. При сложении таких сумм для всех масс системы остается, согласно сказанному выше, только сумма всех внешних сил, а так как каждая отдельная из

* Применяя принцип отвердевания, следует иметь в виду не физическое отвердевание, а воображаемое, идеальное отвердевание без всякого перемещения частиц и изменения объема.

сложенных сумм при равновесии равна нулю, то равна нулю и сумма всех внешних сил.

Если вычисления ведутся в координатах, то эта теорема записывается в виде трех уравнений:

$$\sum X = 0, \sum Y = 0, \sum Z = 0,$$

где X, Y, Z — проекции внешних сил на оси x, y, z .

Совершенно аналогичная теорема существует и для моментов внешних сил.

Теорема В.2. Сумма всех моментов сил, приложенных к каждой отдельной массе системы, при равновесии равна нулю.

Как для упругих твердых тел, так и для жидких важно знать напряженное состояние внутри тела, т.е. внутренние силы, действующие между мельчайшими частицами тела во всех направлениях и во всех точках тела. Однако в общем случае приходится ограничиваться указанием только среднего напряженного состояния.

Но как же вообще можно получить представление о внутренних силах, если теоремы В.1 и В.2 об условиях равновесия говорят только о внешних силах? Для этого необходимо внутренние силы сделать внешними.

Вообразим некоторое тело, к которому приложены внешние силы (на рис. В.2 они обозначены стрелками). Мысленно разрежем его на две части и одну из частей, например I, примем за нашу систему масс. Тогда все силы, с которыми частицы части II действовали на частицы части I и которые раньше были внутренними силами, теперь будут внешними. Эти силы распределены по площади сечения, и сумма их должна быть такова, чтобы выделенная часть тела продолжала оставаться в равновесии. Следовательно, результирующая этих сил должна быть равна и прямо противоположна результирующей внешних сил, действующих на выделенную часть тела.

Таким образом, мы получили вполне определенное и однозначное представление о результирующей внутренних сил

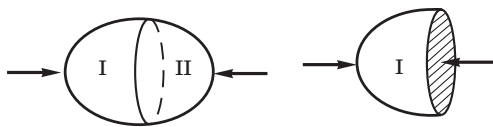


Рис. В.2. Метод сечений

в проведенном сечении тела*. Результирующая внутренних сил, отнесенная к единице площади сечения, называется *напряжением*. Более подробно ознакомимся с этим понятием в следующих главах.

Очевидно, что, разделив найденную в рассмотренном выше примере результирующую внутренних сил на площадь сечения, получим среднее напряжение в сечении. Вообще же на различных площадках сечения напряжение может быть разным. Напряжение на площадке, подобно силе, является вектором.

Из многочисленных и важных теорем о напряженном состоянии приведем следующую.

Теорема В.3. Если в трех сечениях, образующих друг с другом трехгранный угол, напряжения известны, то напряжения во всех других сечениях могут быть определены.

Для доказательства теоремы поступим следующим образом. Пересечем трехгранный угол четвертой плоскостью, именно той, в которой требуется определить напряжение (рис. В.3). Эта плоскость образует вместе с первыми тремя тетраэдр. Силы $1, 2, 3$, действующие на грани, напряжения на которых известны, мы получим, если умножим заданные напряжения на площади соответствующих граней. Имеется только одна сила 4 , которая уравнивает сумму сил $1 + 2 + 3$. Эта сила, разделенная на площадь соответствующей грани, и дает искомое напряжение. Для выполнения вычислений удобнее всего совместить заданные сечения с координатными плоскостями (рис. В.3).

Теперь, после того как мы разъяснили понятие напряжения, можно дать более точное определение напряженного состояния. *Напряженным состоянием в какой-либо точке* называется совокупность напряжений во всех сечениях, проходящих через заданную точку.

Как можно выразить напряжение в точке? Мысленно проведем внутри рассматриваемой массы поверхность, разделяющую объем массы на две части (рис. В.4).

На элементарной площадке $\Delta\omega$ разделяющей поверхности, действует сила ΔF . Площадка $\Delta\omega$ может быть стянута в точку M

* Мы получили бы совершенно такой же результат, если бы вместо части I тела рассмотрели часть II, только теперь результирующая внутренних сил была бы приложена к части II и направлена в прямо противоположную сторону.

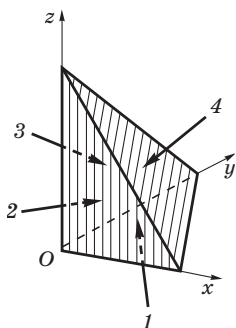


Рис. В.3. Равновесие тетраэдра

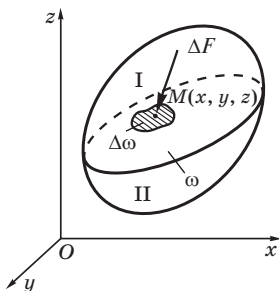


Рис. В.4. К определению напряжения в точке

с координатами x, y, z . В этом случае как площадь поверхности $\Delta\omega$, так и сила ΔF стремятся к нулю. Отношение силы ΔF к площади поверхности $\Delta\omega$ стремится к пределу

$$\lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta F}{\Delta\omega} \right| = \sigma.$$

Значение этого предела называется *напряжением в точке* с координатами x, y, z .

Не вдаваясь в подробности теории напряженного состояния, отметим только, что напряженное состояние в точке может быть связано с некоторым эллипсоидом — так называемым *эллипсоидом напряжений*.

В каждом эллипсоиде имеются три взаимно перпендикулярные оси. Этим осям эллипсоида, называемым *главными осями*, соответствуют в напряженном теле такие три взаимно перпендикулярных сечения, в которых напряжения нормальны к сечениям. Такие напряжения называются *главными напряжениями*, а соответствующие направления — *главными направлениями напряженного состояния*.

Давление жидкости. Напряженное состояние в жидкости, находящейся в равновесии, особенно простое. Сопротивление жидкости деформации, т.е. перемещению ее частей относительно друг друга, имеет некоторое сходство с трением. Если при соприкосновении двух твердых тел трение отсутствует, то давление одного тела на другое в плоскости их соприкосновения должно быть обязательно перпендикулярно к этой плоскости. Следовательно, при скольжении вдоль плоскости

соприкосновения не должно совершаться никакой работы. Аналогично проявляется и отсутствие в жидкости сопротивления деформации. В этом случае напряжение внутри жидкости, или, как принято говорить, *давление жидкости*, должно быть везде перпендикулярно к поверхности того сечения, на которое оно действует. Данное свойство давления жидкости может рассматриваться как определение жидкости, эквивалентное определению, приведенному раньше.

На основании указанного свойства давления можно с помощью простых соображений вывести другое важное свойство: *давление в одной и той же точке жидкости одинаково во всех направлениях* (точнее, одинаково во всех сечениях, проведенных через рассматриваемую точку).

Для определения такого напряженного состояния, которое принято называть *статическим напряженным состоянием*, достаточно указания одного-единственного параметра — давления p . Согласно сказанному выше оно означает силу, действующую на единицу площади сечения.

Величина, равная модулю напряжения, в гидромеханике называется *статическим давлением* в точке и обозначается буквой p :

$$p = [\sigma].$$

Статическое давление является скалярной величиной (в отличие от напряжения). Сила статического давления P , равная давлению, умноженному на площадь площадки, к которой оно отнесено, — величина векторная, т.е. имеющая направление действия.

Первое свойство статического давления: сила статического давления направлена по внутренней нормали к площадке, которая воспринимает это давление. Направление действия силы статического давления по внутренней нормали доказывается свойством жидкости или газа не оказывать сопротивления растягивающим усилиям.

Второе свойство статического давления — значение статического давления в точке не зависит от ориентации (угла наклона) площадки.

Простейшим прибором для измерения статического давления в сосуде с жидкостью является *пьезометр*, представляющий собой вертикальную открытую сверху стеклянную трубку, присоединяемую к сосуду. Пьезометр измеряет избыточное (свыше атмосферного) давление на поверхности жидкости в сосуде.

Для измерения давления применяются следующие приборы:

- *барометры* (для измерения атмосферного давления);
- *манометры* (для измерения избыточного, т.е. выше атмосферного, давления);
- *вакуумметры* (для измерения вакуума, т.е. давления ниже атмосферного);
- *дифференциальные манометры* (для измерения разности давлений в двух точках).

Применение манометров (в частности, жидкостных) привело к установлению особого рода единиц для измерения давления, широко распространившихся в практике.

Давление жидкости можно условиться измерять непосредственно высотой того столба жидкости, который уравновешивается этим давлением. Поскольку жидкостные манометры могут наполняться разными жидкостями с разными удельными весами, то при таком способе измерения давления необходимо каждый раз указывать название жидкости.

Так, например, говорят о *миллиметрах водяного столба*, *ртутного столба* (сокращенно: вод. ст., рт. ст.). Как легко подсчитать, 1 мм вод. ст. = $1 \text{ кг/м}^2 = 10^4 \text{ кг/см}^2$ (в самом деле, столб воды с основанием площадью 1 м² и высотой 1 мм имеет объем 1 л и весит 1 кг). Первое соотношение (1 мм вод. ст. = 1 кг/м^2) особенно легко запоминается. Это привело к тому, что единица давления 1 кг/м^2 получила очень широкое распространение в технике.

В тех случаях, когда требуется точность отсчета высоты столба жидкости, вода как жидкость для измерения давления мало пригодна, так как она легко и неравномерно прилипает к стенкам стеклянной трубки. Значительно удобнее жидкости, растворяющие жир (алкоголь, толуол, ксилол и др.).

Для измерения значительных разностей давлений лучше всего применять ртуть, которая в чистом виде в не слишком узких трубках дает очень удобный для отсчета мениск.

На применении барометра основана единица давления, называемая *физической атмосферой*. Средняя высота столба ртути в барометре на уровне моря составляет 760 мм. Давление воздуха, соответствующее этому показанию барометра при температуре ртути 0 °С, условились считать нормальным и называли *физической атмосферой*. Прилагательное «физическая» добавлено к «атмосфере» для того, чтобы устранить смешивание с технической атмосферой, равной 1 кг/см^2 и обычно применяемой в технике.

Удельный вес ртути при температуре 0°C равен $13,595\text{ г/см}^3$, следовательно, 1 см^3 ртути весит $13,595\text{ г}$. Поэтому столбу ртути высотой 76 см соответствует давление воздуха, равное $1033,2\text{ г/см}^2$. Если наполнить барометр вместо ртути водой, то высота столба, уравновешивающего давление, равное $1,0332\text{ кг/см}^2$, т.е. одной физической атмосфере, будет составлять $10,332\text{ м}$.

Из определения физической атмосферы следует, что ее значение в известной мере зависит от притяжения Земли. Для того чтобы освободиться от этих несколько произвольных требований, введена новая единица давления, связанная с системой единиц CGS и равная 10^6 дин/см^2 . Эта единица давления получила название *бар*. Одному бару при нормальной тяжести соответствует ртутный столб высотой $750,06\text{ мм}$.

Контрольные вопросы и задания

1. Определите предмет и состав механики жидкости и газа.
2. Обозначьте основные этапы развития теоретической и экспериментальной гидромеханики и газодинамики.
3. Что понимается под феноменологическим описанием жидкости и газа?
4. Какие силы называются внутренними, а какие — внешними?
5. Как вы понимаете напряженное состояние выделенного объема капельной жидкости?
6. Сформулируйте основные теоремы теории напряженного состояния.
7. Что такое эллипсоид напряжений?
8. Как можно определить понятие «давление»? В каких единицах оно измеряется?
9. В чем сходство и различие понятий «напряжение» и «давление»?
10. Как классифицируются приборы для измерения давления по принципу действия?
11. Какие единицы используются для измерения давления?

СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

1.1. Свойства жидкости

Общие сведения. Жидкость, как и всякое физическое тело, имеет молекулярное строение, т.е. состоит из молекул, расстояние между которыми во много раз превосходит размеры самих молекул. Строго говоря, жидкость имеет прерывистую структуру.

В технической гидромеханике при решении большинства задач жидкость принимают за сплошную (непрерывную) среду ввиду чрезвычайной малости не только самих молекул, но и расстояний между ними по сравнению с объемами, рассматриваемыми при изучении равновесия и движения жидкости. Таким образом, вместо самой жидкости изучается ее модель, обладающая свойством непрерывности (фиктивная сплошная среда — *континуум*).

Гипотеза о непрерывности (сплошности) жидкой среды упрощает исследование, поскольку позволяет рассматривать все механические характеристики жидкой среды (скорость, плотность, давление и т.д.) как функции координат точки в пространстве и во времени.

Интересуясь, например, вопросом о том, как велики в данной точке давление внутри жидкости или скорость ее движения, практически важно знать давление и скорость в некотором весьма малом объеме, а не строго именно в данной геометрической точке. Этот объем действительно может быть очень малым. Даже в таком малом объеме, как кубик со стороной 0,001 мм, находится $2,7 \cdot 10^7$ молекул. Этот пример показывает, что замена реальной жидкости ее моделью в виде сплошной жидкой среды не приводит к погрешностям до тех пор, пока не рассматривается движение молекул.

Основные законы, используемые в технической гидромеханике, те же, что и в механике твердых тел. Однако применение этих законов к задачам гидромеханики отличается некоторыми особенностями вследствие различия свойств жидкостей и твердых тел. Поэтому изучение технической гидромехани-

ки целесообразно начать с определения и оценки основных свойств жидкостей.

Жидкость и твердые тела. Жидкости отличаются от твердых тел легкой подвижностью своих частиц. Для изменения формы твердого тела к нему необходимо приложить силы конечной (иногда весьма значительной) величины. Между тем для медленной деформации жидкости достаточны самые ничтожные силы, которые в предельном случае бесконечно малой деформации равны нулю.

На основании этого мы можем дать следующее определение жидкости: *жидкостью* называется такое тело, в котором в состоянии равновесия всякое сопротивление деформации равно нулю.

При быстрой деформации жидкость, подобно твердому телу, оказывает сопротивление деформации. Но как только движение жидкости прекращается, это сопротивление очень быстро исчезает. Свойство жидкостей оказывать сопротивление деформации называется *вязкостью*.

Кроме обычных, легкоподвижных жидкостей, существуют очень вязкие жидкости, сопротивление которых деформации весьма значительно, но в состоянии покоя по-прежнему равно нулю. По мере увеличения вязкости жидкость становится все более похожей на твердое тело, однако нельзя провести резкой границы между жидкостью с очень большой вязкостью и твердым телом: некоторые вещества при быстрой деформации ведут себя как твердые тела, а при медленной — как жидкости. К таким веществам принадлежит, например, асфальт.

Согласно кинетической теории материи мельчайшие частицы всех тел (атомы и молекулы) находятся в непрестанном движении; кинетическая энергия этого движения проявляется в теплоте. С точки зрения данной теории жидкости отличаются от твердых тел тем, что в них отдельные частицы более или менее часто меняются местами с соседними частицами, в то время как в твердых телах каждая частица занимает в пространстве вполне определенное положение, правда, совершая около него небольшие колебания.

Другим свойством жидкостей является их большое сопротивление изменению объема. Никаким способом невозможно сжать 1 л воды так, чтобы он поместился в сосуде вместимостью 0,5 л. Обратно, если налить 1 л воды в сосуд вместимостью 2 л и выкачать из последнего воздух, то вода по-прежнему будет занимать только половину сосуда. Однако в некоторой мере

вода при больших давлениях сжимается; при давлении около 1000 атм это сжатие достигает 5% первоначального объема. Аналогичным образом ведут себя и другие жидкости.

Жидкость и газ. По своим механическим свойствам жидкости подразделяются на два класса:

- 1) малосжимаемые (*капельные*);
- 2) сжимаемые (*газообразные*).

С позиций физики капельная жидкость значительно отличается от газа, с позиций механики жидкости различие между ними не так велико и законы, справедливые для капельных жидкостей, могут быть применены и к газам, когда сжимаемостью последних можно пренебречь.

В связи с отсутствием специального термина, который обозначал бы жидкость в широком смысле слова, в дальнейшем будем пользоваться терминами «капельная жидкость» (малосжимаемая), «сжимаемая жидкость» (газ) и «жидкость», применяя последний термин в широком смысле, охватывающем как капельную жидкость, так и газ. Другими словами, под жидкостью будем понимать всякую среду, обладающую свойством текучести.

Капельные жидкости имеют вполне определенный объем, который практически не изменяется под действием сил.

Газ (сжимаемая жидкость), занимая все предоставленное ему пространство, может значительно изменять объем, сжимаясь и расширяясь под действием внешних сил.

Таким образом, капельные жидкости легко изменяют форму (в отличие от твердых тел), но с трудом изменяют объем, а газы легко изменяют как объем, так и форму.

Основные свойства жидкостей, существенные при рассмотрении задач технической гидромеханики, — *плотность* и *вязкость*. В некоторых случаях (при образовании капель, течении тонких струй, образовании капиллярных волн и др.) имеет значение также *поверхностное натяжение*.

Изменение агрегатного состояния (фазовые переходы). В технической гидромеханике, как уже отмечалось, жидкость обычно заменяется моделью в виде непрерывной среды. Однако иногда приходится сталкиваться с нарушением сплошности (непрерывности) жидкости. В таких случаях можно, как правило, выделить границы раздела, отделяющие одну непрерывную среду (фазу) от другой; при переходе через такие границы свойства жидкости меняются скачкообразно.

Системы, состоящие из нескольких фаз, называются *многофазными* (*полифазными*). Простейшим случаем много-

фазной системы являются двухфазные системы. Например, газ — твердые частицы (пневмотранспорт, пылеулавливание); газ — капли жидкости (распылители, сушилки, газовое охлаждение, испарение); жидкость — пузырьки пара (испарители, эрлифты). Во всех этих примерах первая из указанных фаз (основная) условно называется *непрерывной*, вторая — *дискретной*.

Количество дискретной фазы в непрерывной определяется объемной концентрацией. Обычно за *объемную концентрацию* β принимается отношение объема, занятого дискретной фазой W_1 , к общему объему многофазной системы W_Σ :

$$\beta = \frac{W_1}{W_\Sigma}.$$

При некоторых условиях многофазные системы могут переходить в однородные (гомогенные), и наоборот. Например, в воде при обычных условиях находится растворенный воздух. При снижении давления и повышении температуры воздух начинает выделяться, образуя воздушные пузыри значительных размеров, иными словами, наблюдается переход однофазной системы (вода) к двухфазной (вода + газ).

1.2. Плотность и удельный вес

Плотностью жидкости ρ называется ее масса m , заключенная в единице объема W :

$$\rho = m/W. \quad (1.1)$$

Плотность пресной воды при температуре 4 °С равна 1000 кг/м³.

Величина, обратная плотности, называется *удельным объемом*:

$$v = 1/\rho.$$

Если жидкость неоднородна, то формула (1.1) определяет лишь среднюю плотность жидкости. Для определения плотности в данной точке следует пользоваться формулой

$$\rho = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta W},$$

где ΔM — масса выделенного объема ΔW жидкости.

Среднюю плотность многофазной системы можно представить в следующем виде:

$$\rho = \beta \rho_2 + (1 - \beta) \rho_1,$$

где ρ_2 , ρ_1 — плотности соответственно непрерывной и дискретной фаз.

Вес G жидкости, приходящийся на единицу объема W , называется *удельным весом*:

$$\gamma = G/W. \quad (1.2)$$

Удельный вес воды при температуре 4 °С равен 9810 Н/м³ (1000 кгс/м³).

Если жидкость неоднородна, то формула (1.2) определяет только средний удельный вес жидкости. Для определения удельного веса жидкости в данной точке применяется формула

$$\gamma = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta W}.$$

Плотность и удельный вес связаны между собой известным соотношением

$$\lambda = \rho g,$$

где g — ускорение свободного падения.

Относительным удельным весом жидкости (или *относительным весом*) δ называется отношение удельного веса данной конкретной жидкости $\gamma_{\text{ж}}$ к удельному весу воды $\gamma_{\text{в}}$ при температуре 4 °С:

$$\delta = \gamma_{\text{ж}} / \gamma_{\text{в}}.$$

В отличие от удельного веса относительный удельный вес представляет собой отвлеченную (безразмерную) величину, числовое значение которой не зависит от выбранной системы единиц измерения.

Плотность, а следовательно, и удельный объем, удельный и относительный удельный вес жидкостей и газов меняются с изменением давления и температуры, т.е. являются функцией давления и температуры:

$$\rho = f(p, T).$$

Данная зависимость называется *уравнением состояния жидкости (газа)*.

1.3. Сжимаемость и температурное расширение

Сжимаемость и температурное расширение жидкостей. Как указывалось выше, плотность и удельный объем жидкости и газа являются в общем случае функцией давления и температуры. Вместе с тем на практике довольно часто реализуются условия, когда с достаточной точностью можно принять постоянным один из этих параметров.

Сжимаемость каплевых жидкостей под действием давления характеризуется *коэффициентом объемного сжатия*, который представляет собой относительное изменение объема жидкости на единицу изменения давления:

$$\beta_W = -\frac{1}{W} \frac{\partial W}{\partial p} \Big|_{T = \text{const}}, \quad (1.3)$$

где W — первоначальный объем жидкости; ∂W — изменение этого объема при увеличении давления на величину ∂p .

Коэффициент объемного сжатия измеряется в паскалях в минус первой степени (Па^{-1}). Знак «—» в формуле (1.3) обусловлен тем, что положительному приращению давления p соответствует отрицательное приращение (т.е. уменьшение) объема W жидкости.

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия β_W , называется *модулем упругости жидкости*:

$$E_0 = 1/\beta_W.$$

Коэффициент объемного сжатия каплевых жидкостей мало меняется при изменении температуры и давления.

В среднем для воды $E_0 = 2 \cdot 10^9$ Па, соответственно $\beta_W = 1/(2 \cdot 10^9) \text{Па}^{-1}$.

Во многих случаях, встречающихся в практической деятельности, сжимаемостью воды можно пренебрегать, считая удельный вес и плотность ее не зависящими от давления.

Температурное расширение каплевых жидкостей характеризуется *коэффициентом температурного (теплового) расширения*, выражающим относительное увеличение объема жидкости при увеличении температуры на 1 К:

$$\beta_T = \frac{1}{W} \frac{\partial W}{\partial T} \Big|_{p = \text{const}}, \quad (1.4)$$

где ∂W — изменение этого объема при повышении температуры на ∂T .

При температуре от 10 до 20 °С и давлении 10^5 Па можно приближенно принимать $\beta_T \approx 0,0001$ °С.

Если приближенно считать, что плотность не зависит от давления, а определяется только температурой, то из выражений (1.1) и (1.4) можно найти приближенное соотношение для расчета изменения плотности капельных жидкостей с изменением температуры:

$$\rho_T = \rho_0 \frac{1}{1 + \beta_T (T - T_0)},$$

где T_0 — температура жидкости, к которой относится плотность ρ_0 .

Способность жидкостей менять плотность (и удельный вес) при изменении температуры широко используется для создания естественной циркуляции в котлах, отопительных системах, для удаления продуктов сгорания и т.д.

Сжимаемость и температурное расширение газов. В отличие от капельных жидкостей газы характеризуются значительной сжимаемостью и высокими значениями коэффициента температурного расширения. Зависимость плотности газов от давления и температуры устанавливается уравнением состояния.

Наиболее простыми свойствами обладает газ, разреженный настолько, что взаимодействие его молекул может не учитываться, — так называемый *совершенный (идеальный) газ*. Для совершенных газов справедливо *уравнение Клапейрона*, позволяющее определять плотность газа при известных значениях давления и температуры, т.е.

$$\rho = \frac{p}{RT},$$

где p — абсолютное давление; R — удельная газовая постоянная, различная для разных газов, но не зависящая от температуры и давления*; T — абсолютная температура.

Поведение реальных газов незначительно отличается от поведения совершенных газов, и для них в широких пределах

*Для воздуха $R = 287$ Дж/(кг · К).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>14</i>
1. СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА	15
1.1. Свойства жидкости	15
1.2. Плотность и удельный вес	18
1.3. Сжимаемость и температурное расширение	20
1.4. Вязкость	24
1.5. Поверхностное натяжение	26
1.6. Смачивание, капиллярный эффект	30
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>37</i>
2. РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА	39
2.1. Условия равновесия	39
2.2. Основное дифференциальное уравнение равновесия	48
2.3. Сила статического давления жидкости на плоскую стенку	50
2.4. Сила статического давления жидкости на криволинейные стенки. Закон Архимеда.	56
2.5. Относительное равновесие жидкости.	59
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>65</i>
3. КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА	67
3.1. Основные понятия кинематики жидкости и газа	67
3.2. Уравнение неразрывности	70
3.3. Уравнение движения.	74
3.4. Гидромеханическое подобие потоков вязких жидкостей	83
3.5. Вихревые и потенциальные течения	88
3.6. Природа турбулентности	93
3.7. Уравнение Бернулли	99
3.8. Относительное движение жидкости и твердого тела	104
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>110</i>
	205

4. ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА	112
4.1. Звуковые колебания	112
4.2. Относительное движение газа и твердых тел со сверх- звуковыми скоростями	118
4.3. Ударная волна	124
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>132</i>
5. МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА В ПРИЛОЖЕНИЯХ . . .	134
5.1. Гидравлический расчет трубопроводных систем	134
5.2. Течение жидкостей и газов в пористых средах	142
5.3. Истечение жидкости из отверстий, насадков и из-под затворов	150
5.4. Движение жидкости в открытых руслах и искусственных каналах	159
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>163</i>
ПРИЛОЖЕНИЯ	165
1. Математический аппарат механики жидкости и газа	165
2. Термодинамические и переносные свойства веществ	170
3. Таблица газодинамических функций	184
ЛИТЕРАТУРА	203

- Андрижиевский, А. А.**
А 65 **Механика жидкости и газа : учеб. пособие / А. А. Андри-
жиевский. — Минск : Вышэйшая школа, 2014. — 206 с. : ил.
ISBN 978-985-06-2509-0.**

Рассмотрены теоретические основы механики жидкости и газа, в том числе статика и кинематика жидкости и газа, а также элементы газовой динамики. Приведен ряд практических приложений теории, включая методы анализа установившихся течений жидкости в пористых средах, трубопроводных системах, открытых каналах, а также при истечении из отверстий и насадков.

Для студентов учреждений высшего образования по техническим и технологическим специальностям. Может быть полезно магистрантам, аспирантам, студентам физических специальностей, преподавателям и практическим работникам.

**УДК 532/533(075.8)
ББК 22.253я73**

Учебное издание

Андрижиевский Анатолий Альгертович

**МЕХАНИКА
ЖИДКОСТИ И ГАЗА**

Учебное пособие

Редактор *Е.В. Малышева*

Художественный редактор *Т.В. Шабунько*

Технический редактор *Н.А. Лебедевич*

Корректор *Е.З. Липень*

Компьютерная верстка *И.В. Войцехович*

Подписано в печать 19.11.2014. Формат 84×108/32. Бумага офсетная.

Гарнитура «Times New Roman». Офсетная печать.

Усл. печ. л. 10,92. Уч.-изд. л. 12,02. Тираж 400 экз. Заказ 2109.

Республиканское унитарное предприятие

«Издательство «Вышэйшая школа»».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013.

Пр. Победителей, 11, 220048, Минск.

e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Открытое акционерное общество «Типография “Победа”».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, производителя и
распространителя печатных изданий № 2/38 от 28.10.2013.

Ул. Тавлая, 11, 222310, Молодечно.