

Высшее профессиональное образование

БАКАЛАВРИАТ

ГИДРАВЛИКА

УЧЕБНИК

В двух томах

Том 1

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Допущено

*Учебно-методическим объединением по образованию
в области автоматизированного машиностроения
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-
технологическое обеспечение машиностроительных производств»*



Москва

Издательский центр «Академия»

2012

УДК 556.556(075.8)
ББК 30.123я73
Г464

Рецензенты:

зав. кафедрой «Гидравлика» Московского автомобильно-дорожного
института (Государственный технический университет),
д-р техн. наук, профессор *С. П. Стесин*;
профессор Московского автомобильно-дорожного
института (Государственный технический университет),
д-р техн. наук *К. Л. Навроцкий*

Г464 **Гидравлика** : в 2 т. — Т. 1 : Основы механики жидкостей и газов : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / [В. И. Иванов, И. И. Сазанов, А. Г. Схиртладзе, Г. О. Трифонова]. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 192 с. — (Сер. Бакалавриат).

ISBN 978-5-7695-8054-3

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (квалификация «бакалавр»).

Изложены основные законы жидкой и газовой рабочих сред, характеристики одномерного течения рабочих сред, а также приведены сведения о гидравлических сопротивлениях. Описаны виды течения жидкостей. Даны основы теории подобия, а также расчеты трубопроводов. Изложены основные закономерности, описывающие динамические процессы, происходящие в трубопроводах.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 556.556(075.8)
ББК 30.123я73

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

© Иванов В. И., Сазанов И. И., Схиртладзе А. Г., Трифонова Г. О., 2012

ISBN 978-5-7695-8054-3 (т. 1) © Образовательно-издательский центр «Академия», 2012
ISBN 978-5-7695-8055-0 © Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первый том учебника «Гидравлика» посвящен изучению основных законов машиностроительной гидравлики и охватывает такие разделы, как основные физические законы жидкой рабочей среды и закономерности одномерного течения жидкостей и газов. В этих разделах рассматриваются основные физические и эксплуатационные свойства рабочих жидкостей, изучаются силы, действующие на жидкость и вызывающие возникновение в ней давления, описаны средства и способы измерения давлений, раскрыты свойства гидростатического давления, а также выводятся формулы для определения сил давления на поверхности различной формы. Большая часть тома отведена изучению уравнений движения вязких жидкостей, гидравлическим характеристикам потока рабочих жидкостей, влиянию различного рода сопротивлений на характер течения жидкостей при ламинарных и турбулентных режимах. Кроме того, в учебнике рассмотрено течение жидкости и зависимости, описывающие эти процессы, приведена методика расчета трубопроводов, исследовано явление гидравлического удара, возникающего в трубах.

Предлагаемый учебник составлен на основе опыта преподавания дисциплины «Гидравлика» и смежных с нею учебных дисциплин в Московском государственном технологическом университете «Станкин». Материал учебника представлен с таким расчетом, чтобы студент, изучив его, смог в дальнейшем самостоятельно овладевать новыми знаниями и использовать их для решения практических задач совершенствования машиностроительной техники.

Излагаемый учебный материал основан на тех сведениях по математике и теоретической механике, которые изучаются в рамках основных образовательных программ бакалавриата машиностроительных направлений подготовки.

Механика как раздел физики изучает законы равновесия и движения материальных тел различных видов. Она разделяется на механику твердого тела, которая изучает покой и движение тел как совокупности сильно связанных материальных точек; механику сыпучих сред, изучающую движение песчаных грунтов, зерна и других аналогичных тел; механику жидких сред, в которой изучают равновесие и движение жидкости.

Часть механики жидких сред, которая рассматривает движение жидкости, а также силовое взаимодействие между жидкостью и обтекаемыми ею телами или ограничивающими ее поверхностями, называется *гидромеханикой*. Раздел механики, в котором изучают движение газов и жидкостей и обтекание ими тел, называется *аэромеханикой*.

Прикладная часть гидромеханики, для которой характерен определенный круг технических вопросов, задач и методы их решения, называется *технической механикой жидкости*, или *гидравликой*.

Обычно гидравлику определяют как науку о законах равновесия и движения жидкостей и о способах приложения этих законов к решению практических задач. В гидравлике рассматриваются главным образом потоки жидкости, ограниченные и направленные твердыми стенками, т. е. течения в открытых и закрытых руслах (каналах). Можно сказать, что в гидравлике изучают внутренние течения жидкостей и решают так называемую *внутреннюю* задачу в отличие от «*внешней*» задачи, связанной с внешним обтеканием тел сплошной средой, которое имеет место при движении твердого тела в жидкости или газе (воздухе). «Внешнюю» задачу рассматривают в собственно гидромеханике, или аэрогидромеханике. Этот раздел в основном связан с потребностями авиации и судостроения.

В гидравлике при решении различных практических задач широко используются те или иные допущения и предположения, упрощающие рассматриваемый вопрос. Достаточно часто гидравлические решения основываются на результатах экспериментов, и потому в гидравлике применяется много различных эмпирических и полуэмпирических формул. При этом, как правило, оцениваются только главные характеристики изучаемого явления и часто используются те или иные интегральные и осредненные величины, которые дают достаточную для технических задач характеристику рассматриваемых явлений.

По своему характеру гидравлика (техническая гидромеханика) близка к известным дисциплинам — сопротивлению материалов и строительной механике, в которых под тем же углом зрения изучаются вопросы механики твердого тела. Следует учитывать, что гидравлика, являясь общетехнической дисциплиной, может рассматриваться как «профессиональная физика жидкого тела», в которой, в частности, даются основы соответствующих гидравлических расчетов, используемых при проектировании инженерных гидротехнических сооружений, конструкций, а также гидросистем технологического оборудования, применяемых в различных областях техники.

Гидравлика разделяется на статику жидкости (гидростатику), кинематику потоков жидкости и динамику жидкости (гидродинамику).

Метод, применяемый в современной гидравлике при исследовании движения, заключается в следующем. Исследуемые явления сначала упрощают, и к ним применяют законы теоретической механики. Затем полученные результаты сравнивают с данными опытов, выясняют степень расхождения, уточняют и исправляют теоретические выводы и формулы для приспособления их к практическому использованию. Целый ряд явлений, крайне трудно поддающихся теоретическому анализу ввиду своей сложности, исследуют экспериментальным путем, а результаты такого исследования представляют в виде эмпирических формул.

Особенно велико значение гидравлики в машиностроении, где приходится иметь дело с закрытыми потоками в трубах и давлениями, многократно превышающими атмосферное. Гидросистемы, состоящие из насосов, трубопроводов, различных гидроагрегатов, широко используют в машиностроении в качестве систем передачи и преобразования энергии, систем жидкостного охлаждения, топливоподачи, смазки и др.

Можно также отметить, что имеет место и другой подход к классификации разделов механики жидких сред. В этом подходе говорят о двух разных методах исследования: метод «технической механики жидкости» и метод «математической механики жидкости», основанный на относительно сложном математическом аппарате, используя который большинство практических задач решить невозможно. Можно сказать, что в гидравлике (в технической гидромеханике) приближенно решаются сложные задачи при помощи простых методов. В математической же гидромеханике относительно точно решаются только некоторые простейшие задачи при помощи сложных методов.

Гидромеханика развилась на базе древней науки о течении воды — гидравлики — с применением законов теоретической механики. В развитии гидромеханики можно выделить несколько характерных этапов: древнее время, период средневековья, возрождения, первая техническая революция, современный этап. Постепенно в процессе

труда человека накапливались отдельные наблюдения, открывались закономерности движения жидкости и газа, которые со временем оформились в определенную систему-науку. Уже в древнем мире было накоплено много наблюдений и изобретены интересные гидравлические и пневматические устройства, отдельные наблюдения были изложены в трудах древнегреческого философа Аристотеля. Некоторые законы гидростатики были сформулированы великим математиком и механиком Древней Греции Архимедом. Большой вклад в развитие основ гидромеханики сделан в период средневековья Леонардо да Винчи (1452—1519), Симоном Стевином (1548—1620), Галилео Галилеем (1564—1642), Блезом Паскалем (1623—1662). Исаак Ньютон (1642—1727) в своих «Математических началах естественно-научной философии» установил квадратичный закон зависимости сопротивления движению жидкости от скорости.

Начало теоретической гидромеханики было положено в XVIII в. в трудах академиков Российской академии наук Михаилом Васильевичем Ломоносовым (1711—1765), Леонардом Эйлером (1707—1783), Даниилом Ивановичем Бернулли (1700—1782). Величайший русский ученый М. В. Ломоносов внес крупный вклад в гидромеханику. Им выполнены работы «О вольном движении воздуха в рудниках примеченном», «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих», «Попытка теории упругой силы воздуха». Он разработал и построил прибор для измерения скорости и направления ветра, создал аппарат — прообраз современного вертолета. Л. Эйлером были выведены уравнения равновесия и движения жидкости и газов, указаны некоторые их интегралы и сформулирован закон сохранения массы применительно к жидкости. Л. Эйлер вывел основное уравнение лопастных гидромашин, исследовал вопросы движения к практическим задачам судостроения и конструирования гидравлических машин.

Д. Бернулли впервые ввел термин «гидромеханика». Он установил зависимость между удельными энергиями при движении жидкости, исследовал давление струи жидкости на пластину. Событием в истории развития гидравлической техники явился выход его книги «Гидродинамика, или Записки о силах и движениях в жидкостях».

Дальнейший этап развития гидромеханики, объединяющий конец XVIII и начало XIX в., относится к периоду первой промышленной революции. На этом этапе разрабатывался математический подход к гидродинамике идеальной жидкости. В этот период вышли труды математиков Жозефа Луи Лагранжа (1736—1813), Огюстена Луи Коши (1789—1857), посвященные потенциальным потокам. Основы теории вязкой жидкости были заложены Луи Навье (1785—1836) и Джорджем Стоксом (1819—1903). В 1881 г. профессор Казанского университета Ипполит Степанович Громеко (1851—1889) дал новую форму уравнений движения жидкости, удобную для получения энергетических зависимостей. Им были впервые внедрены исследования нестациона-

нарного движения жидкости в капиллярах. В ходе опытов английского физика Осборна Рейнольдса (1842—1912) установлен закон подобия течения в трубах. Целую эпоху составляют исследования по воздухоплаванию, включающие в себя разработку теории полета самолета и ракет. Результаты этих исследований были изложены в трудах выдающихся русских ученых Дмитрия Ивановича Менделеева (1834—1907), Николая Егоровича Жуковского (1849—1912), Сергея Алексеевича Чаплыгина (1869—1942). Созданная Н. Е. Жуковским теория крыла и воздушного винта имела значение не только для авиации, но и для современного турбомашиностроения. Н. Е. Жуковский, как Александр Густав Эйфель (1832—1923) во Франции, Людвиг Прандтль (1875—1950) в Германии, был создателем экспериментальной аэромеханики в России. Он организовал известный всему миру аэродинамический институт ЦАГИ. С. А. Чаплыгин, бывший много лет директором ЦАГИ, развил теорию обтекания крыла и решеток профилей. Он разработал теорию определения разрезного крыла с подкрылком и закрылком, разработал теорию определения сил, действующих на самолет при полете с переменной скоростью. С. А. Чаплыгин положил начало новому разделу гидромеханики — теории неустановившегося обтекания крыла.

Создателем теории пограничного слоя, лежащей в основе теории конвективного теплообмена, является известный аэродинамик Людвиг Прандтль. До сих пор популярной остается полуэмпирическая теория пристенной турбулентности Л. Прандтля (1904 г.) с известным логарифмическим распределением скоростей. Блестящее экспериментальное подтверждение теория Прандтля получила в классических работах И. Никурадзе (1894—1979). Иван Ильич Никурадзе родился в 1894 г. в г. Самтредия (Грузия), закончил гимназию в г. Кутаиси и поступил (вместе с братом) в Тбилисский университет. В 1919 г. он был зачислен в группу студентов, направленных для обучения в зарубежные страны. И. Никурадзе учился в Геттингенском университете и в 1923 г. успешно защитил докторскую диссертацию под руководством Л. Прандтля «Наблюдения на распределение скорости в турбулентном течении». В 1921 г. в Грузию пришла советская власть, однако И. Никурадзе, судя по материалам, которые стали доступны в последнее время, получил в консульстве советский паспорт и написал несколько писем ректору Тбилисского университета с просьбой принять его на работу. Вот отрывок из его письма: «Я решил вернуться в Грузию в сентябре этого года (1927 г.) и приступить к работе в родном университете». Но с 1926 г. начались гонения на ученых, работающих за рубежом, и мечте Ивана Никурадзе не суждено было сбыться. Такая же участь постигла и его брата Александра Никурадзе, ставшего известным специалистом в области физики твердого тела, этнографии и истории. В результате наша страна потеряла двух выдающихся ученых, возможный вклад которых в отечественную науку трудно переоценить.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ ЖИДКОЙ И ГАЗОВОЙ РАБОЧИХ СРЕД

1.1. Жидкость как объект изучения гидравлики

Жидкости, как и все вещества, имеют молекулярное строение. Они занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами. Это определяется величинами межмолекулярных сил и характером движений составляющих их молекул. В газах расстояния между молекулами больше, а силы межмолекулярного взаимодействия меньше, чем в жидкостях и твердых телах, поэтому газы отличаются от жидкостей и твердых тел большей сжимаемостью. По сравнению с газами жидкости и твердые тела мало сжимаемы.

Молекулы жидкости находятся в непрерывном хаотическом тепловом движении, отличающемся от хаотического теплового движения газов и твердых тел. В жидкостях это движение осуществляется в виде колебаний (10^{13} колебаний в секунду) относительно мгновенных центров и скачкообразных переходов от одного центра к другому. Тепловое движение молекул твердых тел состоит в колебаниях относительно стабильных центров. Тепловое движение молекул газа выглядит как непрерывные скачкообразные перемены мест.

При этом надо заметить, что изменения температуры и давления приводят к изменениям свойств жидкостей таким образом, что при повышении температуры и уменьшении давления свойства жидкостей приближаются к свойствам газов, а при понижении температуры и увеличении давления — к свойствам твердых тел.

Термин «жидкость» применяется для обозначения и собственно *жидкости*, которую рассматривают как несжимаемую или мало сжимаемую среду, и *газа*, который можно рассматривать как сжимаемую жидкость. Это следует помнить при дальнейшем чтении гл. 1 и 2.

Рассматривать и математически описывать жидкость как совокупность огромного количества отдельных частиц, находящихся в постоянном непрогнозируемом движении, на современном уровне науки не представляется возможным. По этой причине жидкость рассматривается как некая не существующая в действительности, гипотетическая, сплошная деформируемая среда, имеющая возможность непрерывно заполнять пространство, в котором она заключена. Такое представление жидкости часто называют *гипотезой сплошности*. Иначе можно сказать, что под жидкостями понимают все

тела, для которых характерно свойство текучести, основанное на явлении диффузии. Текучесть можно определить как способность тела как угодно сильно менять свой объем под действием сколь угодно малых сил. Таким образом, в гидравлике жидкость понимают как абстрактную среду — *континуум*, который является основой гипотезы сплошности. Континуум считается непрерывной средой без пустот и промежутков, свойства которой одинаковы во всех направлениях. Это означает, что все характеристики жидкости являются непрерывными функциями и все частные производные по всем переменным также непрерывны.

Такие тела (среды) называют также капельными жидкостями. *Капельные жидкости* — это такие жидкости, которые в малых количествах стремятся принять шарообразную форму, а в больших образуют свободную поверхность.

Очень часто в математических описаниях гидравлических закономерностей используются понятия «частица жидкости» или «элементарный объем жидкости». К ним можно относиться как к бесконечно малому объему, в котором находится достаточно много молекул жидкости. Например, если рассмотреть объем воды кубической формы со сторонами размером 1 мкм, то в нем окажется $3,3 \cdot 10^{10}$ молекул. Частица жидкости полагается достаточно малой по сравнению с размерами области, занятой движущейся или покоящейся жидкостью.

Сплошная среда представляет собой модель, которая успешно используется при исследовании закономерностей покоя и движения жидкости. Правомочность применения такой модели жидкости подтверждена всей практикой гидравлики.

1.2. Основные свойства жидкостей

Плотность. Масса единицы объема жидкости так же, как и любых других тел, называется *плотностью* ρ и может быть определена по формуле

$$\rho = \frac{dM}{dW}.$$

Для однородных жидкостей можно считать, что

$$\rho = \frac{M}{W},$$

где M — масса жидкости; W — объем жидкости.

Единицы измерения: $\text{кг}/\text{м}^3$, $\text{кг}/\text{дм}^3$, $\text{г}/\text{см}^3$.

Плотность жидкости зависит от температуры и давления. Все жидкости, кроме воды, характеризуются уменьшением плотности с

ростом температуры. Плотность воды имеет максимум при $t = 4^\circ\text{C}$ и уменьшается при любых других температурах. В этом проявляется одно из аномальных свойств воды. Температура, при которой плотность воды максимальная, с увеличением давления уменьшается. Так, при давлении 14 МПа вода имеет максимальную плотность при $0,6^\circ\text{C}$.

Плотность пресной воды равна $1\,000\text{ кг/м}^3$, соленой морской воды — $1\,020 \dots 1\,030\text{ кг/м}^3$, нефти и нефтепродуктов — $650 \dots 900\text{ кг/м}^3$, ртути — $13\,596\text{ кг/м}^3$.

При изменении давления плотность жидкостей изменяется незначительно. В большинстве случаев плотность жидкости в расчетах можно принимать постоянной. Однако встречаются случаи, когда изменением плотности пренебрегать нельзя, так как это может привести к значительным ошибкам.

Удельный вес. Наряду с плотностью часто используется свойство жидкости — удельный вес γ . Удельный вес — это вес единицы ее объема. Он выражается формулой

$$\gamma = \frac{dG}{dW} = \frac{gdM}{dW}.$$

Для однородных жидкостей можно считать

$$\gamma = \frac{G}{W} = \frac{Mg}{W},$$

где G — вес жидкости; g — ускорение свободного падения.

Удельный вес жидкости и плотность связаны соотношением

$$\gamma = \rho g.$$

Единицы измерения: Н/м^3 , Н/дм^3 , Н/см^3 , $1\text{Н} = 1\text{ кг}\cdot\text{м/с}^2$.

Значение ускорения свободного падения g на земле изменяется от $9,831\text{ м/с}^2$ на полюсах до $9,781\text{ м/с}^2$ на экваторе.

Для газов в некоторых случаях удобно использовать свойство, которое называют *удельный объем*. Удельный объем w — это величина, обратная плотности:

$$w = \frac{1}{\rho}.$$

Единицы измерения: $\text{м}^3/\text{кг}$, $\text{см}^3/\text{г}$.

Сжимаемость жидкости. Свойство жидкостей изменять свой объем при изменении давления называется *сжимаемостью жидкости*. Сжимаемость характеризуется *коэффициентом объемного сжатия* (сжимаемости) β_p , представляющим собой относительное

изменение объема жидкости W при изменении давления p на единицу:

$$\beta_p = -\frac{1}{W_0} \frac{dW}{dp},$$

где W_0 — начальный объем жидкости.

Знак «-» в формуле указывает, что при увеличении давления объем жидкости уменьшается.

Единица измерения: Па^{-1} .

Перепишем уравнение β_p в виде

$$\beta_p = -\frac{dW}{W_0} \frac{1}{dp}.$$

Обе части уравнения умножим на знаменатель и перенесем их в левую часть:

$$\beta_p W_0 dp + dW = 0. \quad (1.1)$$

Учтем, что

$$dW = W - W_0,$$

и подставим в равенство (1.1):

$$\beta_p W_0 dp + W - W_0 = 0.$$

Выразив отсюда W , можно получить формулу для вычисления нового значения объема при известном увеличении давления:

$$W = W_0 - \beta_p W_0 dp = W_0 (1 - \beta_p dp).$$

Если учесть, что все изменения объема происходят при неизменной массе за счет изменения плотности ($W_0 = \frac{M}{\rho_0}$ и $W = \frac{M}{\rho}$), можно получить формулу изменения плотности при изменении давления:

$$\frac{M}{\rho} = \frac{M}{\rho_0} (1 - \beta_p dp) \Rightarrow \frac{1}{\rho} = \frac{(1 - \beta_p dp)}{\rho_0},$$

где ρ_0 — начальная плотность жидкости.

Откуда, выразив ρ , получим

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \beta_p dp}.$$

Из последней формулы выразим β_p и, таким образом, определим коэффициент сжимаемости жидкости через изменение ее плотности:

$$\rho(1 - \beta_p dp) = \rho - \rho \beta_p dp = \rho_0 \Rightarrow \beta_p = \frac{\rho - \rho_0}{\rho dp}.$$

Учтем, что при малых приращениях $d\rho = \rho - \rho_0$, окончательно получим

$$\beta_p = \frac{d\rho}{\rho} \frac{1}{dp}. \quad (1.2)$$

Отсутствие знака « \rightarrow » в этом выражении означает, что увеличение давления приводит к увеличению плотности.

Величина, обратная коэффициенту сжимаемости β_p (коэффициенту объемного сжатия), обозначается

$$E_{ж} = \frac{1}{\beta_p}$$

и называется объемным модулем упругости жидкости.

Подставив в предыдущее уравнение коэффициент объемного сжатия β_p , получим закон Гука для жидкости:

$$E_{ж} = \rho \frac{dp}{d\rho}.$$

Единицы измерения: Па, Н/м², МПа.

Модуль упругости $E_{ж}$ зависит от температуры и давления. Поэтому различают два модуля упругости: адиабатический и изотермический. Адиабатический имеет место при быстротекущих процессах без теплообмена. Процессы, происходящие в большинстве гидросистем, происходят с теплообменом, поэтому чаще используется изотермический модуль упругости. Полученная экспериментальным путем форма зависимостей $E_{ж}$ от p и t представлена на графиках (рис. 1.1), которые говорят о том, что жидкости не вполне точно следуют закону Гука.

Приведем несколько примеров значений модулей упругости.

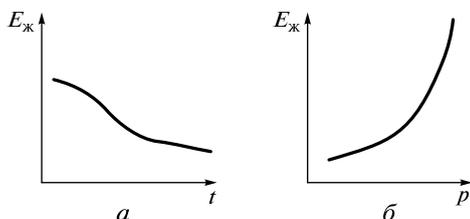


Рис. 1.1. Форма зависимости модулей упругости жидкостей от температуры (а) и давления (б)

Минеральные масла, используемые в технологических машинах с гидравлическим приводом, при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ имеют объемные модули упругости $(1,35 \dots 1,75) \cdot 10^3$ МПа (меньшее значение относится к более легкому маслу), бензин и керосин — приблизительно $1,3 \cdot 10^3$ МПа, глицерин — $4,4 \cdot 10^3$ МПа, ртуть — в среднем $3,2 \cdot 10^3$ МПа.

В практике эксплуатации гидравлических систем имеются случаи, когда вследствие действия того или иного возмущения в жидкости может значительно изменяться давление. В таких случаях пренебрежение сжимаемостью приводит к существенным погрешностям.

Известно, что скорость распространения звука a в однородной жидкости можно определить по формуле

$$a = \sqrt{\frac{E_{\text{ж}}}{\rho}}.$$

Если учесть, что $E_{\text{ж}} = \rho \frac{dp}{d\rho}$ и подставить это значение в формулу скорости распространения звука, получим

$$a = \sqrt{\frac{\rho \frac{dp}{d\rho}}{\rho}} = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}.$$

В этом случае изменение плотности жидкости, вызванное изменением давления, будет определяться выражением

$$d\rho = \frac{d\rho}{a^2}.$$

Если считать, что жидкость несжимаемая, т. е. $d\rho = 0$, то получится, что скорость распространения звука в жидкости по приведенной формуле окажется бесконечной ($a = \infty$). При использовании такого значения a в случае достаточно больших объемов жидкости (озеро или нефтепровод) или быстрого изменения давления, например при резком закрытии или открытии запорного устройства в трубопроводе, результаты расчетов окажутся существенно неточными. По этой причине в описанных условиях принимать жидкость несжимаемой недопустимо.

Температурное расширение жидкости. Жидкости могут изменять свой объем при изменении температуры. Это называется *температурным расширением жидкости*. Оно характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения, представляющим собой относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на единицу (на $1\text{ }^\circ\text{C}$) и при постоянном давлении:

$$\beta_t = \frac{1}{W_0} \frac{dW}{dt}.$$

Запишем изменение сжимаемости

$$W = W_0(1 + \beta_t dt)$$

и изменение плотности

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta_t dt}.$$

Изменение объема при изменении температуры происходит за счет изменения плотности.

Для большинства жидкостей коэффициент β_t с увеличением давления уменьшается. Коэффициент β_t с уменьшением плотности нефтепродуктов от 920 до 700 кг/м³ увеличивается от 0,0006 до 0,0008; для рабочих жидкостей гидросистем β_t обычно принимают не зависящим от температуры. Для этих жидкостей увеличение давления от атмосферного до 60 МПа приводит к росту β_t примерно на 10... 20 %. При этом чем выше температура рабочей жидкости, тем больше увеличение β_t . Для воды с увеличением давления при температуре до 50 °С β_t растет, а при температуре свыше 50 °С — уменьшается.

Растворение в жидкости газов. Растворение газов — способность жидкости поглощать (растворять) газы, находящиеся в соприкосновении с ней. Все жидкости в той или иной степени поглощают и растворяют газы. Это свойство характеризуется *коэффициентом растворимости* k_p . Если в закрытом сосуде жидкость находится в контакте с газом при давлении p_1 , то газ начнет растворяться в жидкости. Через какое-то время произойдет насыщение жидкости газом и давление в сосуде изменится.

Коэффициент растворимости связывает изменение давления в сосуде с объемом растворенного газа и объемом жидкости следующим соотношением:

$$\frac{W_r}{W_{ж}} = k_p \frac{p_2}{p_1},$$

где W_r — объем растворенного газа при нормальных условиях; $W_{ж}$ — объем жидкости; p_1 и p_2 — начальное и конечное давление газа соответственно.

Коэффициент растворимости зависит от жидкости, газа и температуры.

При температуре 20 °С и атмосферном давлении в воде содержится примерно 1,6 % растворенного воздуха по объему ($k_p = 0,016$). С увеличением температуры от 0 до 30 °С коэффициент растворимости воздуха в воде уменьшается. Коэффициент растворимости воз-

духа в маслах при температуре 20 °С равен примерно 0,08...0,1. Кислород отличается более высокой растворимостью, чем воздух, поэтому содержание кислорода в воздухе, растворенном в жидкости, примерно на 50 % выше, чем в атмосферном. При уменьшении давления газ из жидкости выделяется. Процесс выделения газа протекает интенсивнее, чем растворение.

Кипение. Переход жидкости в газообразное состояние называется *кипением*. Иначе это свойство жидкостей называют *испаряемостью*.

Жидкость можно довести до кипения повышением температуры до значений, больших температуры кипения при данном давлении, или понижением давления до значений, меньших давления насыщенных паров $p_{н.п}$ жидкости при данной температуре. Образование пузырьков при понижении давления до давления насыщенных паров называется *холодным кипением*.

Жидкость, из которой удален растворенный в ней газ, называется *дегазированной*. В такой жидкости кипение не возникает и при температуре, большей температуры кипения при данном давлении.

Кавитация. В некоторых случаях при движении жидкости возникают явления, связанные с изменением ее агрегатного состояния, а именно: с превращением некоторых ее частиц в газообразное состояние. Например, при течении жидкости через местное сужение трубы происходит увеличение скорости и падение давления. Если абсолютное давление при этом уменьшается до значения, равного упругости насыщенных паров этой жидкости при данной температуре, или давления, при котором начинается интенсивное выделение из нее газов, то в данном месте потока начинается интенсивное парообразование и выделение газов. В расширяющейся части потока скорость уменьшается, а давление возрастает, и выделение паров и газов прекращается; выделившиеся пары частично или полностью конденсируются, а газы постепенно растворяются.

Это местное нарушение сплошности течения с образованием паровых и газовых пузырей (каверн), обусловленное местным падением давления в потоке, называется *кавитацией*.

Если в прозрачной трубке, диаметр которой сначала плавно уменьшается, а затем еще более плавно увеличивается (рис. 1.2), течет поток жидкости, скорость которого регулируется, то можно визуальным образом наблюдать следующие явления.

При малой скорости жидкости падение давления в узком месте трубки незначительно, поток вполне прозрачен. При увеличении скорости в трубке абсолютное давление в соответствии с уравнением Бернулли будет падать и при некотором значении

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{н.п}},$$

где $p_{н.п}$ — давление насыщенных паров.

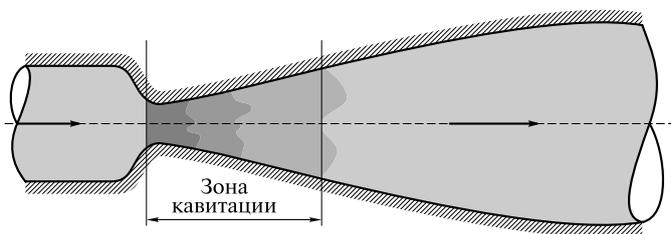


Рис. 1.2. Явление кавитации

В трубке появляется отчетливо видимое помутнение жидкости, обусловленное появлением пузырьков газа, — это и есть зона кавитации.

При дальнейшем увеличении скорости размеры зоны кавитации возрастают. Кавитация сопровождается характерным шумом, а при длительном ее воздействии также эрозионным разрушением твердых, как правило, металлических стенок. Последнее объясняется тем, что конденсация пузырьков пара (и сжатие пузырьков газа) происходит со значительной скоростью, частицы жидкости, заполняющие полость конденсирующего пузырька, устремляются к его центру и в момент завершения конденсации вызывают местный гидравлический удар, т.е. значительное местное повышение давления. Разрушение материала при кавитации происходит не там, где выделяются пузырьки, а там, где они конденсируются.

Кавитация в обычных случаях — явление нежелательное. При кавитации также возрастает сопротивление трубопроводов и, следовательно, уменьшается их пропускная способность.

Кавитация может возникать во всех устройствах, где поток претерпевает местное сужение с последующим расширением, например в кранах, вентилях, задвижках, диафрагмах, жиклерах и т.п. [3]. В отдельных случаях возникновение кавитации возможно и без расширения потока вслед за его сужением, а также в трубах постоянного сечения при увеличении нивелирной высоты и гидравлических потерь.

Кавитация может иметь место в гидромашинах (насосах и гидротурбинах), а также на лопастях быстровращающихся гребных винтов. В этих случаях следствием кавитации является резкое снижение коэффициента полезного действия машины и затем постепенное разрушение ее деталей, подверженных воздействию кавитации. В гидросистемах кавитация может возникать в трубопроводах низкого давления — во всасывающих трубопроводах. В этом случае область кавитации распространяется на значительную часть всасывающего трубопровода или даже на всю его длину. Поток в трубо-

проводе при этом становится двухфазным, состоящим из жидкой и паровой фаз.

В начальной стадии паровыделения паровая фаза может быть в виде мелких пузырьков, распределенных по объему движущейся жидкости приблизительно равномерно. При дальнейшем парогазовыделении происходит укрупнение пузырьков, которые в случае горизонтального расположения трубы движутся преимущественно в верхней части ее сечения.

В дальнейшем возможны случаи полного разделения парогазовой и жидкой фаз и движения их самостоятельными потоками: первая фаза — в верхней, вторая — в нижней части сечения трубопровода. При небольших диаметрах трубопровода возможно образование парогазовых пробок и движение фаз, жидкой и газовой, чередующимися столбиками.

С увеличением парогазовой фазы пропускная способность трубопровода значительно уменьшается. Конденсация выделившихся паров и растворение газа происходит в насосах, где давление значительно повышается, и в напорных трубопроводах, по которым жидкость движется под высоким давлением от насоса к потребителю.

Кавитация, обусловленная выделением паров жидкости, происходит по-разному в однокомпонентных (простых) и многокомпонентных (сложных) жидкостях. Для однокомпонентной жидкости давление, соответствующее началу кавитации, определяется упругостью насыщенных паров, зависящей только от температуры, и кавитация протекает так, как было описано ранее.

Многокомпонентная жидкость состоит из так называемых легких и тяжелых фракций. Первые обладают большим значением упругости паров, чем вторые, поэтому при кавитации сначала вскипают легкие фракции, а затем тяжелые. Конденсация паров происходит в обратном порядке: сначала выпадают тяжелые фракции, затем — легкие.

При наличии легких фракций многокомпонентные жидкости более склонны к кавитации, и паровая фаза в них удерживается дольше, но процесс кавитации выражен менее резко, чем у однокомпонентных жидкостей.

Для характеристики течения в отношении кавитации применяется безразмерный критерий, называемый *числом кавитации* и равный

$$\chi = \frac{p - p_{н.п.}}{\frac{\rho v^2}{2}},$$

где p — абсолютное давление; $p_{н.п.}$ — давление насыщенных паров; v — скорость потока.

Обычно число кавитации χ определяют на входе в тот или иной агрегат, внутри которого возможно возникновение кавитации.