

Предисловие

Учебник «Гидравлика и аэродинамика систем водоснабжения и водоотведения» написан на основе выдержавшего три издания нашего учебника «Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения», материал которого был тематически расширен.

В книге основное внимание уделено изложению физических явлений гидравлики и аэродинамики, происходящих при транспортировке жидкостей и газов в инженерных системах городов и промышленных предприятий.

При написании учебника авторы стремились к наиболее простому изложению материала, к тому, чтобы он был понятным для обучающихся по направлениям подготовки, перечисленным в присвоенном учебнику грифе, и в то же время полезным для широкого круга специалистов в области водопроводных и водоотводящих систем в условиях развития современных городов.

При подготовке нового учебника были учтены пожелания, высказанные преподавателями высшей школы и работниками научно-исследовательских и проектных организаций. Большую помощь оказали сотрудники кафедры водоснабжения и водоотведения НИУ МГСУ, возглавляемой доктором технических наук, профессором В.А. Орловым.

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору Е.В. Алексееву за важные замечания, касающиеся моделирования потока в главе «Гидравлические сопротивления и потери при движении жидкости и газа», доктору технических наук, профессору В.А. Орлову за помощь в изложении главы «Цели и задачи систем водоснабжения», кандидату технических наук, доценту К.И. Чижикю за консультации по главе «Гидромашины», заместителю председателя РО РАЕН, доктору технических наук, профессору, академику Л.С. Скворцову за ценные замечания по главе «Смешение водных масс с водой водоемов».

При подготовке к изданию нового учебника были приняты во внимание ценные замечания рецензентов — доктора технических наук, профессора В.А. Орлова, доктора технических наук, профессора В.И. Баженова, доктора технических наук, профессора И.И. Павлиновой, которым авторы выражают глубокую признательность.

В издании учебника необходимо также отметить важную роль коллектива редакции книжной литературы Издательства МИСИ — МГСУ, возглавляемой М.Э. Исмаиловой. С работой над новым учебником блестяще, на наш взгляд, справились редактор А.К. Смирнова, корректор В.К. Чупрова, верстальщик О.Г. Горюнова, дизайнер Д.Л. Разумный.

Все замечания и пожелания по изданию просьба направлять по адресу: Россия, г. Москва, 129337, Ярославское шоссе, д. 26, НИУ МГСУ, кафедра водоснабжения и водоотведения (аудитория 317) или по электронной почте vikulinp@yandex.ru.

Авторы

Введение

Гидравлика и аэродинамика (техническая гидромеханика) — наука, изучающая законы покоя, движения жидкостей (как капельных, так и газообразных) и методы применения этих законов в различных областях инженерной деятельности.

Развитие гидравлики и аэродинамики неразрывно связано с историей развития техники, и в частности, систем водоснабжения, водоотведения, газоснабжения и вентиляции. Указанные дисциплины (так же как аэродинамика и газовая динамика) в настоящее время могут рассматриваться как разделы механики жидкости.

Исторически накопление знаний о законах движения жидкостей шло по двум направлениям: специалисты создавали гидравлику, основанную главным образом на экспериментах, а математики — теоретическую гидромеханику, построенную на математическом анализе непрерывной деформации сплошной жидкой среды. Объектом изучения этих двух наук было одно, а задачи были различные.

Гидравлика носила прикладной характер и полученные о ней знания использовались в инженерной практике. Если точное решение оказывалось невозможным, то прибегали к приближенному решению. Если общего закона не удавалось выявить, устанавливали частные. В этом отношении в гидравлике существовал упрощенный подход к рассмотрению явлений движения жидкости (как правило, действительное распределение скоростей во всех точках потока не рассматривалось, а определялась лишь средняя скорость). Поэтому широкое использование в гидравлике результатов опытов привело к применению эмпирических коэффициентов.

Гидромеханика, в противоположность гидравлике, носила строго математический характер и при решении ее задач использовались дифференциальные уравнения движения жидкости. Реализовывались главные требования к механике как науке — строгая постановка задачи, точность полученных решений и стремление обойтись без случайных экспериментальных данных. Тем не менее, не всегда оказывалось возможным получить решение уравнений гидромеханики, в некоторых случаях полученные решения не давали достаточного совпадения с опытными данными и не могли ответить на насущные практические запросы.

В настоящее время происходит слияние двух наук в одну — гидравлики и теоретической гидромеханики в техническую гидромеханику, состоящую из синтеза достижений теоретического анализа и экспе-

риментальных исследований. По мнению российского ученого академика Н.П. Павловского (1884—1937), гидравлика внесла свой живой практический дух, а гидромеханика — свою теоретическую строгость и полноту исследования.

В технической гидромеханике используются основные принципы физики и механики, а полученные выводы согласуются с экспериментальными исследованиями, которые одновременно дополняют и аргументируют эти выводы.

Без знания технической гидромеханики невозможно решение многочисленных инженерных задач, в том числе в областях: санитарной техники, экологии, водоснабжении и водоотведении, теплогазоснабжении и вентиляции. Расчет трубопроводов различного назначения и инженерных систем, проектирование гидравлических сооружений, агрегатов и аппаратов, конструирование гидравлических и воздушных машин требуют четкого понимания законов технической гидромеханики.

Первый гидравлический закон о воздействии жидкости на погруженное в нее тело (закон о плавании тел) был сформулирован Архимедом за 250 лет до нашей эры.

В 1612 г. Галилео Галилей (1452—1519) в своей работе «Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и о тех, которые в ней движутся» сформулировал условия равновесия жидкости и теоретически подтвердил справедливость закона Архимеда о плавании тел. В 1643 г. итальянский математик и физик, ученик Г. Галилея Е. Торричелли (1608—1647) предложил формулу для определения скорости истечения идеальной жидкости через отверстия. В 1653 г. французский ученый Б. Паскаль (1623—1662) сформулировал закон о передаче внешнего давления жидкостью. Закон Паскаля до настоящего времени служит основой конструирования гидравлических машин (гидроподъемников, прессов, тормозов и т.п.). В 1686 г. английский ученый И. Ньютон (1643—1727) сформулировал понятие о вязкости жидкости и высказал основные положения о внутреннем трении в движущихся жидкостях.

Инженерное применение теоретических основ гидравлики систем водоснабжения и водоотведения в Западной Европе связано с работами французских ученых: А. Шези (движение воды в каналах и трубах), П. Дюбуа (расчеты водосливов и фильтрации), А. Дарси (напорное движение воды в трубах), Д. Вентури (истечение жидкости через отверстия и насадки), А. Базена (расчет водосливов), О. Рейнольдса (ламинарный и турбулентный режимы движения жидкости).

В России существенное теоретическое развитие гидравлики систем водоснабжения и водоотведения как науки связано с деятельностью

М.В. Ломоносова (общий закон сохранения энергии) и членов Петербургской академии наук Д. Бернулли (уравнение Бернулли) и Л. Эйлера (дифференциальные уравнения равновесия и движения идеальной жидкости). Уравнение Бернулли широко используется в гидравлике систем водоснабжения и водоотведения для практических расчетов гидравлических машин, трубопроводов и их элементов.

В 1715 г. был организован первый водомерный пост на Неве. В 1767 г. было учреждено главное управление водяных коммуникаций и начались более планомерные работы по исследованию и описанию водных путей.

Работы русских профессоров И.С. Громеко, Н.П. Петрова, Д.И. Менделеева, Н.Е. Жуковского, Р.Р. Чугаева, И.И. Леви, Н.М. Вернадского, Н.Т. Мелешенко, Г.Н. Сухомела, П.Г. Киселева, С.М. Слиского, Н.Н. Абрамовича, Л.С. Животовского и др. способствовали развитию законов гидравлики и аэродинамики в различных отраслях промышленного производства, а также в системах водоснабжения и водоотведения.

Большой вклад в развитие науки о гидравлических особенностях водоснабжения и водоотведения внесли Н.Н. Павловский, А.Н. Колмогоров, С.А. Христианович, М.А. Великанов, А.Я. Милович, А.Д. Алтшуль, В.И. Калищун и многие другие.

Гидравлика и аэродинамика составляют основу многих инженерных расчетов при конструировании специальных сооружений (плотин, трубопроводных коммуникаций различного назначения, отстойников, фильтров и т.п.).

Двадцатый век был ознаменован стремительным ростом авиационной техники, гидротехники, теплоэнергетики, гидромашиностроения, что привело к бурному развитию технической гидромеханики, основанной на синтезе теоретических и экспериментальных методов исследования.

Не производя гидравлических и аэродинамических расчетов, нельзя принять рационального экологически обоснованного проектного решения для любого объекта. Изучение курса «Гидравлика и аэродинамика систем водоснабжения и водоотведения» позволит обучающимся уяснить физическую сущность гидромеханических явлений, овладеть методами инженерного расчета основных типов сооружений, приобщить их к научно-техническому творчеству и рационализаторской деятельности.

Глава 1. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИДКОСТИ

Физическая величина — это количественная характеристика свойств физического тела. Любая физическая величина имеет единицу измерения. Единицы измерений физических величин объединяются в системы единиц.

Почти два столетия назад немецкий математик К. Гаусс (1777—1855) доказал, что если выбрать независимые единицы измерений нескольких величин, то на их основе с помощью физических законов можно установить единицы величин, входящих в любой раздел физики.

Единицы измерений, послужившие основой для выражения других единиц, называются *основными единицами системы*. Единицы, полученные из основных единиц с помощью физических закономерностей, называются *производными единицами системы*.

Обозначение физических величин должно соответствовать обозначениям, приведенным в государственных стандартах и другой нормативно-технической литературе.

В настоящее время применяется Международная система физических единиц СИ (система интернациональная), принятая в 1960 г. Она состоит из семи основных единиц (табл. 1.1) и производных (табл. 1.2), образованных по уравнениям связей между основными величинами.

Таблица 1.1

Основные и дополнительные единицы физических величин системы СИ

| Величина | | | Единица | | |
|--------------------------|-------------|---------------------------|--------------|-------------|---------------|
| Наименование | Обозначение | Рекомендуемое обозначение | Наименование | Обозначение | |
| | | | | русское | международное |
| <i>Основные</i> | | | | | |
| Длина | L | l | метр | м | m |
| Масса | M | m | килограмм | кг | kg |
| Время | T | t | секунда | с | s |
| Сила электрического тока | I | I | ампер | А | A |

| Величина | | | Единица | | |
|-------------------------------|-------------|---------------------------|--------------|-------------|---------------|
| Наименование | Обозначение | Рекомендуемое обозначение | Наименование | Обозначение | |
| | | | | русское | международное |
| Термодинамическая температура | θ | T | кельвин | К | К |
| Количество вещества | N | n, W | моль | моль | mol |
| Сила света | J | J | кандела | кд | cd |
| <i>Дополнительные</i> | | | | | |
| Плоский угол | — | — | радиан | рад | rad |
| Телесный угол | — | — | стерадиан | ср | sr |

Примечание. Кроме температуры Кельвина (обозначение T) допускается применять также температуру Цельсия (обозначение t), определяемую выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ К по определению. Температура Кельвина выражается в кельвинах, температура Цельсия — в градусах Цельсия (обозначение $^{\circ}\text{C}$). По размеру градус Цельсия равен кельвину, $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$.

Таблица 1.2

Важнейшие производные единицы СИ, применяемые в гидравлике

| Величина | | Единица | |
|---------------------------------|-------------|--------------------------------|-----------------|
| Наименование | Размерность | Наименование | Обозначение |
| Площадь | L^2 | квадратный метр | м^2 |
| Объем, вместимость | L^3 | кубический метр | м^3 |
| Скорость | LT^{-1} | метр в секунду | м/с |
| Ускорение | LT^{-2} | метр на секунду в квадрате | м/с^2 |
| Частота периодического процесса | T^{-1} | герц | Гц |
| Частота вращения | T^{-1} | секунда в минус первой степени | с^{-1} |
| Угловая скорость | T^{-1} | радиан в секунду | рад/с |
| Плотность | $L^{-3}M$ | килограмм на кубический метр | кг/м^3 |

| Величина | | Единица | |
|---|----------------------|--------------------------------------|------------------|
| Наименование | Размерность | Наименование | Обозначение |
| Момент инерции площади сечения | L^4 | метр в четвертой степени | m^4 |
| Количество движения (импульс) | $LM\Gamma^{-1}$ | килограмм-метр в секунду | $кг \cdot м/с$ |
| Момент количества движения (момент импульса) | $L^2M\Gamma^{-1}$ | килограмм-метр в квадрате на секунду | $кг \cdot м^2/с$ |
| Сила, вес, сила тяжести, грузоподъемная сила | $LM\Gamma^{-2}$ | ньютон | Н |
| Удельный вес | $L^{-2}M\Gamma^{-2}$ | ньютон на кубический метр | $Н/м^3$ |
| Момент силы, момент пары сил, крутящий момент | $L^2M\Gamma^{-2}$ | ньютон-метр | $Н \cdot м$ |
| Давление | $L^{-1}M\Gamma^{-2}$ | паскаль | Па |
| Напряжение | $L^{-1}M\Gamma^{-2}$ | паскаль | Па |
| Модуль упругости | $L^{-1}M\Gamma^{-2}$ | паскаль | Па |
| Энергия, работа | $L^2M\Gamma^{-2}$ | джоуль | Дж |
| Мощность | $L^2M\Gamma^{-3}$ | ватт | Вт |
| Динамическая вязкость | $L^{-1}M\Gamma^{-1}$ | паскаль-секунда | $Па \cdot с$ |
| Кинематическая вязкость | $L^2M\Gamma^{-1}$ | квадратный метр в секунду | $м^2/с$ |

Ускорение свободного падения g принимается в обычных технических расчетах равным $9,81 м/с^2$. Для различных мест земного шара величина g может быть найдена по формуле

$$g = 9,806056 - 0,025028 \cos 2\varphi - 0,000003h,$$

где φ — географическая широта места;

h — высота места измерения над уровнем моря, м.

Обозначения единиц, наименования которых образованы по фамилиям ученых, пишут с прописной (заглавной) буквы, например единица силы Ньютон, Н — сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение $1 м/с^2$ в направлении действия силы; единица давления паскаль, Па — давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью $1 м^2$.

Для выражения больших и малых значений физических величин применяются приставки и множители, приведенные в табл. 1.3, с их помощью образуют десятичные кратные и дольные единицы.

Таблица 1.3

Приставки и множители для образования десятичных кратных и дольных единиц

| Приставка | Обозначение | Множитель | Пример |
|-----------|-------------|-----------|--------------------|
| мега | М | 10^6 | МВт (мегаватт) |
| кило | к | 10^3 | кН (килоньютон) |
| гекто | г | 10^2 | гПа (гектопаскаль) |
| деци | д | 10^{-1} | дм (дециметр) |
| санти | с | 10^{-2} | см (сантиметр) |
| милли | м | 10^{-3} | мм (миллиметр) |
| микро | мк | 10^{-6} | мкм (микрометр) |

В гидравлике и аэродинамике укоренилась так называемая техническая система единиц, использующая как основные единицы измерения м, т* (тонна как единица силы) и с; они рассматриваются в настоящее время как «внесистемные». Их применение при решении многих задач гидравлики и аэродинамики представляет значительное удобство, поэтому отказываться от них в гидравлике и аэродинамике в настоящее время нецелесообразно. Представляется необходимым, однако, указать численные соотношения между основными величинами, встречающимися в гидравлике и аэродинамике, выраженными в рассматриваемой системе и в системе СИ. Такие соотношения даны в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Физические константы воды в разных системах единиц

| Величина | Система единиц | Размерность | Переходный коэффициент, связывающий данную систему с системой СИ |
|-----------------------|------------------------------|--|---|
| Удельный вес γ | СИ | н/м ³ | — |
| | МКГСС | кг*/м ³ | $1 \text{ кг}^*/\text{м}^3 = 9,80665 \text{ н/м}^3$ |
| | СГС | дин/см ³ | $1 \text{ дин}/\text{см}^3 = 1,10 \text{ н/м}^3$ |
| | Внесистемные: мт*с мтс | т*/м ³ т/м ² с ² | $1 \text{ т}^*/\text{м}^3 = 9806,65 \text{ н/м}^3$ $1 \text{ т}/\text{м}^2 \cdot \text{с}^2 = 1,103 \text{ н/м}^3$ |

| Величина | Система единиц | Размерность | Переходный коэффициент, связывающий данную систему с системой СИ |
|-------------------------------|------------------------------|--|--|
| Плотность ρ | СИ | кг/м ³ | — |
| | МКГСС | кг/м ³ | — |
| | СГС | г/см ³ | 1 г/см ³ = 1,103 кг/м ³ |
| | Внесистемные: мт*с мтс | т*с ² /м ⁴ т/м ³ | 1 т*с ² /м ⁴ = 9806,65 кг/м ³ 1 т/м ³ = 1 · 10 ³ кг/м ³ |
| Кинематическая вязкость ν | СИ | м ² /с | — |
| | МКГСС | м ² /с | — |
| | СГС | см ² /с (стоксы) | 1 стокс = 1 · 10 ⁻⁴ м ² /с |
| Динамическая вязкость μ | СИ | н с/м ² | — |
| | МКГСС | кг*с/м ² | 1 кг*с/м ² = 9,80665 н · с/м ² |
| | СГС | г/(см · с) (пуазы) | 1 пуаз = 0,1 н · с/м ² |
| | Внесистемные: мт*с мтс | т*с/м ² т/(м · с) | 1 т*с/м ² = 9806,65 н · с/м ² 1 т/м с = 1 · 10 ³ н · с/м ² |

Примечание. Системы единиц мтс и мт*с отнесены к внесистемным. Через т*, кг* и г* обозначены единицы силы (веса).

Имеет распространение также и так называемая физическая система единиц, основанная на единицах м, т (тонна как единица массы) и с. В той же таблице даны переходные множители от этой системы к системе СИ. Таким образом, обучающиеся или специалисты могут применять любую систему единиц и переходить от одной системы к другой по данным табл. 1.4.

Вопросы для самопроверки

1. В каких единицах измеряется термодинамическая температура?
2. Объясните связь физических величин систем СИ, СГС и английской системы мер.
3. В каких единицах измеряется удельный вес в системе СИ?
4. В каких единицах измеряется динамическая вязкость в системе СИ?

Глава 2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

2.1. Понятие жидкости

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 гидромеханики целесообразно начать с определения и оценки основных свойств жидкостей.

Жидкости (в широком смысле слова) отличаются от твердых тел легкой подвижностью частиц. В то время как для изменения формы твердого тела к нему нужно приложить конечные, иногда очень большие силы, изменение формы жидкости может происходить под действием даже самых малых сил (жидкость течет под действием собственного веса).

Жидкость как физическое тело имеет молекулярное строение, т.е. состоит из молекул, расстояние между которыми во много раз превосходит размеры самих молекул, т.е. жидкость, строго говоря, имеет прерывистую структуру. В технической гидромеханике при решении большинства задач принимают жидкость как 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. Тем самым вместо самой жидкости изучается ее модель, обладающая свойством непрерывности (фиктивная сплошная среда — континуум). Гипотеза о непрерывности или сплошности жидкой среды упрощает исследование, так как позволяет рассматривать все механические характеристики жидкой среды (скорость, плотность, давление и т.д.) как функции координат точки в пространстве и времени.

Интересуясь, например, вопросом, как велико в данной точке давление внутри жидкости или как велика скорость ее движения, 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. Так, известно, что в $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ воздуха находится $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. 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.

Жидкости по своим механическим свойствам разделяются на два класса: малосжимаемые (капельные) и 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 приложены так же и к газам, когда сжимаемостью последних можно пренебречь. В связи с отсутствием специального термина, который обозначал бы жидкость в широком смысле слова, в дальнейшем будут использоваться термины «капельная жидкость» (малосжимаемая), «сжимаемая жидкость» (газ) и «жидкость». Под последним термином в широком смысле будет пониматься как капельная жидкость, так и газ, т.е. под сжимаемой жидкостью будет пониматься всякая среда, обладающая свойством текучести.

2.2. Физические свойства жидкости

Плотность и удельный вес жидкости. *Плотность жидкости* ρ — это отношение массы тела M к объему W , который она занимает:

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

Плотность выражается в килограммах на кубический метр ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Определение плотности жидкости можно производить как непосредственным ее взвешиванием, так и с использованием закона Архимеда, для чего применяют ареометр (рис. 2.1).

Ареометр погружается в жидкость и плавает в ней. Чем больше плотность жидкости, тем меньше трубка ареометра погружается в нее. На шкале трубки указана плотность жидкости. Плотность жидкости зависит от температуры (табл. 2.1).



Рис. 2.1. Ареометр

Таблица 2.1

Зависимости плотности воды от температуры

| Температура t , °С | Плотность ρ , кг/м ³ | Температура t , °С | Плотность ρ , кг/м ³ |
|----------------------|---|----------------------|---|
| 0 | 999,87 | 40 | 992,35 |
| 3 | 999,99 | 50 | 988,20 |
| 4 | 1000,00 | 60 | 983,38 |
| 5 | 999,99 | 70 | 977,94 |
| 10 | 999,75 | 80 | 971,94 |
| 20 | 998,26 | 60 | 965,56 |
| 30 | 995,76 | 100 | 958,65 |

Удельный вес жидкости γ — отношение веса жидкости G к ее объему W :

$$\gamma = \frac{G}{W}.$$

В качестве единицы удельного веса принимают Н/м³. Удельный вес — векторная величина. Он не является характеристикой вещества, его значение зависит от ускорения силы тяжести, принимаемого обычно равным 9,81 м/с² в месте определения.

Удельный вес жидкости равен произведению плотности на ускорение силы тяжести:

$$\gamma = \rho \cdot g,$$

где g — ускорение свободного падения, м/с².

Относительным удельным весом жидкости (или относительным весом) δ называется отношение удельного веса данной жидкости к удельному весу воды при температуре 4 °С:

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

Плотность, а следовательно, удельный и относительный удельный вес жидкостей и газов меняются с изменением давления и температуры (табл. 2.2).

Таблица 2.2

**Приблизительные значения плотности ρ и удельного веса γ газов
при давлении $9,7 \cdot 10^4$ Па и $t = 15$ °С**

| Газ | γ , Н/м ³ | ρ , кг/м ³ | Газ | γ , Н/м ³ | ρ , кг/м ³ |
|----------------|-----------------------------|----------------------------|-------------|-----------------------------|----------------------------|
| Водород | 0,81 | 0,08 | Воздух | 11,6 | 1,20 |
| Водяной пар | 7,25 | 0,74 | Кислород | 12,8 | 1,30 |
| Окись углерода | 11,3 | 1,15 | Углекислота | 17,6 | 1,80 |
| Азот | 11,3 | 1,15 | | | |

Сжимаемость и температурное расширение жидкостей. Сжимаемость капельных жидкостей под действием давления характеризуется *коэффициентом объемного сжатия* β_W , представляет собой относительное изменение объема жидкости на единицу изменения давления:

$$\beta_W = -\frac{1}{W} \frac{\Delta W}{\Delta p},$$

где W — первичный объем жидкости, м³;

ΔW — изменение этого объема при увеличении давления на величину Δp , м³.

Коэффициент объемного сжатия имеет размерность Па⁻¹. Знак минус в формуле обусловлен тем, что положительному приращению давления соответствует отрицательное приращение (т.е. уменьшение) объема жидкости W .

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия, называется *модулем упругости* жидкости E_0 , Па:

$$E_0 = \frac{1}{\beta_W}.$$

Коэффициент объемного сжатия капельных жидкостей мало меняется при изменении температуры и давления (табл. 2.3), в среднем для воды в обычных условиях $E_0 = 2 \cdot 10^9$ Па:

$$\beta_W \approx \frac{1}{(2 \cdot 10^9) \text{Па}^{-1}}.$$

Таблица 2.3

Значения коэффициента объемного сжатия воды

| Температура, °С | $\beta_W \cdot 10^2, \text{Па}^{-1}$, при давлении, $\text{Па} \cdot 10^4$ | | | | |
|-----------------|---|------|------|------|------|
| | 50 | 100 | 200 | 390 | 780 |
| 0 | 5,4 | 5,37 | 5,31 | 5,23 | 5,15 |
| 5 | 5,29 | 5,23 | 5,18 | 5,08 | 4,93 |
| 10 | 5,23 | 5,18 | 5,08 | 4,98 | 4,81 |
| 15 | 5,18 | 5,10 | 5,03 | 4,88 | 4,70 |
| 20 | 5,15 | 5,05 | 4,95 | 4,81 | 4,60 |

Таким образом, при повышении давления на $9,8 \cdot 10^4$ Па объем воды уменьшается на $1/20\,000$ часть первоначальной величины. На практике во многих случаях сжимаемостью воды можно пренебрегать, считая удельный вес и ее плотность не зависящими от давления.

Температурное расширение капельных жидкостей характеризуется коэффициентом температурного расширения β_t (табл. 2.4), выражающим относительное увеличение объема жидкости при увеличении температуры на 1 градус, т.е.

$$\beta_t = \frac{1}{W} \frac{\Delta W}{\Delta t},$$

где ΔW — изменение этого объема при повышении температуры на величину Δt , $\text{м}^3/\text{°С}$.

Таблица 2.4

Коэффициенты температурного расширения воды

| Давление, $\text{Па} \cdot 10^4$ | β_t , 1/град при температуре, °С | | | | |
|----------------------------------|--|----------|----------|----------|----------|
| | 1–10 | 10–20 | 40–50 | 60–70 | 90–100 |
| 10 | 1,000014 | 0,000150 | 0,000422 | 0,000556 | 0,000719 |
| 980 | 0,000043 | 0,000165 | 0,000422 | 0,000548 | 0,000714 |
| 1960 | 0,000072 | 0,000183 | 0,000426 | 0,000539 | — |
| 4900 | 0,000149 | 0,000236 | 0,000429 | 0,000523 | 0,000664 |
| 8830 | 0,000229 | 0,000294 | 0,000437 | 0,000514 | 0,000621 |

Если приближенно считать, что плотность не зависит от давления, а определяется только температурой, то можно найти приближенное соотношение для расчета изменения капельных жидкостей с изменением температуры:

$$\rho_t = \rho_0 \frac{1}{1 + \beta_t(t - t_0)},$$

где t_0 — температура жидкости при нормальных условиях, °С.

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

Связь плотности, кинематической и динамической вязкости воды с температурой показана в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Зависимость плотности ρ , кинематической ν и динамической μ вязкости воды от температуры

| Температура, °С | ρ , кг/м ³ | $\nu \cdot 10^4$, м ² /с | $\mu \cdot 10^3$, Па · с |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| 0 | 999,9 | 0,0179 | 1,79 |
| 4 | 1000 | 0,0152 | 1,57 |
| 20 | 998 | 0,0101 | 1,01 |
| 40 | 992 | 0,0066 | 0,65 |
| 60 | 983 | 0,0048 | 0,48 |
| 80 | 972 | 0,0037 | 0,36 |
| 90 | 965 | 0,0033 | 0,31 |
| 99 | 959 | 0,0028 | 0,27 |

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 между его молекулами может не учитываться — это так называемый совершенный (идеальный) газ. Для

совершенных газов справедливо уравнение Клапейрона, позволяющее определять *плотность газа* при известном давлении и температуре, т.е.

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

где p — абсолютное давление, Па;

R — удельная газовая постоянная, различная для разных газов, но не зависящая от температуры и давления, Дж/(кг · К), для воздуха $R = 287$ Дж/(кг · К);

T — абсолютная температура, К.

Поведение реальных газов в условиях, далеких от сжижения, незначительно отличается от поведения совершенных газов, и для них в широких пределах можно пользоваться уравнениями состояния совершенных газов.

В технических расчетах плотность газа обычно приводят к нормальным физическим условиям ($t = 0$ °С; $p = 101\,325$ Па) или к стандартным условиям ($t = 20$ °С; $p = 101\,325$ Па).

Плотность воздуха при $R = 287$ Дж/(кг · К) в стандартных условиях будет равна:

$$\rho_0 = \frac{101\,325}{287(273 + 20)} = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

При других условиях плотность воздуха определяется по формуле

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}.$$

Кривые зависимости плотности воздуха от температуры при разных давлениях приведены на рис. 2.2.

Для изотермического процесса ($T = \text{const}$) имеем

$$\frac{p}{\rho} = \text{const},$$

а для адиабатического процесса

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{const},$$

где k — адиабатическая постоянная газа, $k = c_p/c_V$ (здесь c_p — теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж; c_V — то же при постоянном объеме, Дж).

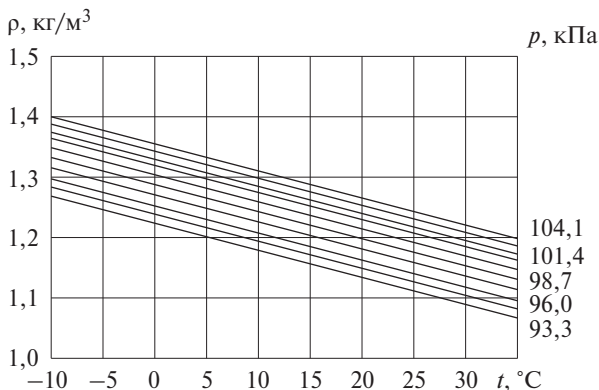


Рис. 2.2. Зависимость плотности воздуха от барометрического давления и температуры

Сжимаемость газа зависит от характера процесса изменения состояния:

- для изотермического процесса

$$E_0 = p,$$

- для адиабатического

$$E_0 = kp.$$

Изотермическая сжимаемость для атмосферного воздуха составляет $\sim 9,8 \cdot 10^4$ Па, что примерно в 20 тысяч раз превышает сжимаемость воды.

Важной характеристикой, определяющей зависимость изменения плотности газа при изменении давления в движущемся потоке,

является скорость распространения звука c . В однородной среде скорость распространения звуковых колебаний определяется из выражения

$$c^2 = \frac{dp}{d\rho}.$$

Скорость звука находится из зависимости

$$c = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}}.$$

Для адиабатического процесса следует

$$\frac{dp}{d\rho} = \frac{k\rho}{\rho} = kRT,$$

откуда для газов

$$c = \sqrt{kRT}.$$

Скорость распространения звука (при $t = 20^\circ\text{C}$) в воздухе составляет 330 м/с, в углекислом газе — 261 м/с, в воде — 1480 м/с.

Поскольку объем газа в большей мере зависит от температуры и давления, выводы, полученные при изучении капельных жидкостей, можно распространять на газы лишь в том случае, если в пределах рассматриваемого явления изменение давления и температуры невелико.

Значительные разности давлений, вызывающие существенное изменение плотности газов, могут возникнуть при движении газов с большими скоростями. Соотношение между скоростью движения жидкости и скоростью звука в ней позволяет судить о необходимости учета сжимаемости в каждом конкретном случае. Практически газ можно принимать несжимаемым при скоростях движения, не превышающих 100 м/с.

Вязкость жидкостей. Вязкость является чрезвычайно важным свойством реальной жидкости и проявляется при ее движении. В результате перемещений одних слоев жидкости относительно других между ними возникают силы трения. Например, слои, дви-

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru