

8. МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

8.1. Механические свойства жидкостей и газов

Раздел механики, изучающий состояние равновесия и движения жидкостей и газов под действием внешних сил, называется *гидроаэромеханикой*.

Кристаллические твердые тела обычно сохраняют свой объем и форму, поскольку частицы этих тел совершают лишь небольшие колебания около узлов кристаллической решетки. Для изменения и объема, и формы твердого тела на конечную величину необходимы конечные силы, тем больше, чем больше деформация тела.

Жидкость представляет собой вещество в конденсированном состоянии, промежуточном между твердым и газообразным. Область существования жидкости ограничена со стороны низких температур фазовым переходом в твердое состояние (кристаллизацией), а со стороны высоких температур – в газообразное (испарение). В жидкости силы, действующие между молекулами, значительно меньше, чем в твердых телах, и быстрее убывают с расстоянием.

Экспериментальные исследования показали, что жидкости обладают определенной структурой. Ближайшие соседи каждой молекулы жидкости только в течение небольших отрезков времени в основном располагаются в каком-либо порядке, так что число ближайших соседей и их взаимное расположение в среднем для всех молекул одинаковы. Это означает, что в жидкостях существует так называемый ближний порядок. Этот «ближний порядок» в расположении молекул жидкости через небольшие промежутки времени нарушается вследствие хаотических смещений молекул из одних положений в другие. Следует отметить, что в жидкостях силы молекулярного взаимодействия еще достаточны для того, чтобы расстояния между молекулами в среднем оставались неизменными, следствием чего является постоянство объема данного количества жидкости. Всякий объем жидкости всегда ограничен определенной поверхностью, которая отделяет его от твердого тела или газа. В таком случае поверхность жидкости называют *свободной*.

В газах при обычных условиях силы молекулярного взаимодействия настолько малы, что молекулы свободно и бес-

порядочно перемещаются, время от времени соударяясь по законам, близким к законам упругого удара. Молекулы газа в процессе столкновений воздействуют одна на другую со значительными силами, изменяющими состояния их движения. В результате столкновений молекулы газов беспорядочно разлетаются по всем направлениям, заполняя весь предоставленный газу объем. Этот объем обычно ограничен или поверхностью жидкости, или поверхностью твердых тел.

Жидкости и газы в отличие от твердых тел обладают упругими свойствами только по отношению к изменению объема. Внешними силами, какими бы малыми они ни были, всегда можно изменить форму объема жидкости или газа. Для изменения же объема твердого тела необходимо приложить конечные внешние силы. Жидкости имеют определенный объем, газам не свойственны ни форма, ни объем. Жидкости и газы могут испытывать только всестороннее сжатие или растяжение. В жидкостях и газах, как в твердых телах, при сжатии возникают силы, препятствующие сжатию, причем они возрастают с возрастанием деформации сжатия. Подобно упругим, эти силы уравнивают деформирующие силы в стационарном состоянии жидкости или газа.

Сжимаемость характеризует способность вещества изменять свой объем под действием всестороннего давления. Ею обладают все вещества. Сжимаемость газов значительно больше, чем жидкостей, которые с определенной степенью точности можно считать практически несжимаемыми. В механике жидкости и газы рассматриваются как сплошные однородные среды.

Вследствие общности ряда свойств жидкостей и газов во многих механических явлениях они ведут себя качественно одинаково, что позволяет многие вопросы механики жидкостей и газов рассматривать с одной точки зрения. Вследствие этого обычно под термином «жидкость» в механике понимается как жидкость, так и газ, если к ним одинаково применим какой-либо теоретический вывод, основанный на учете их общих свойств. Например, поскольку жидкостям и газам свойственна только упругая деформация всестороннего сжатия, это позволяет не делать между ними различия при решении ряда задач механики.

Величину сжимаемости характеризует *коэффициент сжимаемости* β , который выражает уменьшение единичного

объема (или плотности ρ) тела при увеличении давления p на единицу:

$$\beta = -\frac{1}{V} \left(\frac{\Delta V}{\Delta p} \right) = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\Delta \rho}{\Delta p} \right),$$

где ΔV , $\Delta \rho$ – изменения соответственно V и плотности ρ при изменении p на Δp .

Знак « \leftarrow » учитывает, что ΔV и $\Delta \rho$ всегда противоположны по знаку. На практике установлено, что в жидкостях и газах в состоянии равновесия возникают только нормальные усилия. Эти усилия, как правило, сжимают выделенный объем (для газов – всегда).

8.2. Равновесие жидкости и газа.

Закон Паскаля. Закон Архимеда

Степень сжатия жидкости (газа) определяет величину тех сил, с которыми отдельные части жидкости (газа) действуют друг на друга или на соприкасающиеся с ними тела. В состоянии равновесия напряжение в жидкости (газе) всегда нормально к площадке, на которую оно действует. Жидкости и газы могут быть определены как среды, в которых при равновесии касательные напряжения существовать не могут. Это следует из того факта, что сила трения покоя в случае внутреннего трения, которое имеет место в рассматриваемых случаях, равна нулю (см. § 7.11).

Физическая величина, равная силе, действующей на единицу площади поверхности выделенного объема по нормали к поверхности, называется *давлением*:

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S}. \quad (8.1)$$

Если сила ΔF распределена по площади неравномерно, то выражение (8.1) определяет среднее давление. Давление в данной точке жидкости при этом определяется следующим образом:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS}.$$

Давление – скалярная величина, которая характеризует напряженное состояние сплошной среды. В данной точке жидкости или газа оно одинаково при любой ориентации пло-

шадки выделенного элемента. Для доказательства этого положения воспользуемся *принципом отвердения* по отношению к жидкости, которая находится в равновесном состоянии. В соответствии с этим принципом любой объем жидкости можно, не нарушая условий равновесия, рассматривать как твердое тело, плотность которого равна плотности жидкости.

Выделим внутри жидкости произвольную трехгранную призму (рис. 8.1, а) сравнительно небольших размеров. На каждую грань призмы по нормали к ней действуют силы давления \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , \vec{F}_3 . Силы давления, действующие на противоположные основания призмы (на рисунке они не обозначены), равны по величине и противоположны по направлению. В условиях равновесия векторная сумма всех сил должна быть равной нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0.$$

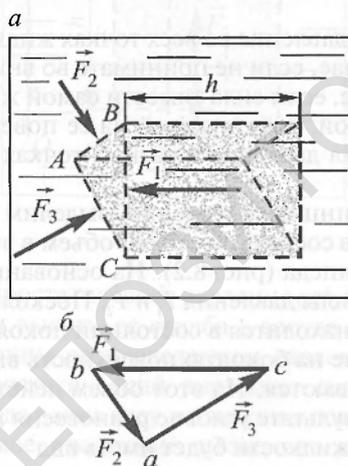


Рис. 8.1

Построим на этих силах треугольник abc . Он подобен треугольнику сечения призмы, параллельного основанию (рис. 8.1, б), поскольку силы \vec{F}_1 , \vec{F}_2 и \vec{F}_3 перпендикулярны к соответствующим граням призмы. Исходя из пропорциональности сторон, будем иметь:

$$\frac{F_1}{BC} = \frac{F_2}{AB} = \frac{F_3}{AC}. \quad (8.2)$$

Разделим соотношение (8.2) на высоту призмы h . Тогда знаменатель каждого члена равенства будет представлять площадь соответствующей грани. В результате получим:

$$p_1 = p_2 = p_3.$$

Таким образом, давление покоящейся жидкости одинаково для любой ориентации площадки. Уменьшая размеры призмы, приходим к бесконечно малым площадкам, различно ориентированным относительно некоторой точки.

Давление в жидкостях, находящихся в состоянии покоя, подчиняется *закону Паскаля*: *давление, создаваемое внешними силами, которые действуют на поверхность жидкости, передается без изменения во все точки жидкости*. Этот закон в равной степени справедлив и для газов. На использовании закона Паскаля основано действие гидравлических прессов, пневматических и гидравлических тормозов и других технических приспособлений.

Отметим, что давление во всех точках жидкости одинаково только в том случае, если не принимать во внимание действие объемных сил (т.е. если сила тяжести самой жидкости мала по сравнению с силой, действующей на ее поверхность). С учетом объемных сил давление в разных точках жидкости будет различным.

Применив принцип отвердения, выделим в жидкости, которая находится в состоянии покоя, объем в виде прямоугольного параллелепипеда (рис. 8.2). На основания параллелепипеда действуют силы давления \vec{F}_1 и \vec{F}_2 . Поскольку выделенный объем жидкости находится в состоянии покоя, то силы давления, действующие на боковую поверхность выделенного объема, уравновешиваются. На этот объем действует также сила тяжести $m\vec{g}$. В результате условие равновесия выделенного параллелепипеда в жидкости будет иметь вид

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + m\vec{g} = 0.$$

Спроецировав последнее равенство на вертикальную ось Y , получим:

$$-p_1\Delta S + p_2\Delta S - \rho gh\Delta S = 0,$$

где ρ — плотность жидкости. Отсюда

* Паскаль Блез (1623–1662) — французский философ, писатель, математик и физик.

$$p_2 = p_1 + \rho gh,$$

где $p = \rho gh$ — гидростатическое давление.

Если давление на свободную поверхность жидкости обозначить p_0 , то в произвольной точке жидкости, находящейся на глубине h , гидростатическое давление

$$p = p_0 + \rho gh.$$

Полученное уравнение называют *гидростатическим уравнением*.

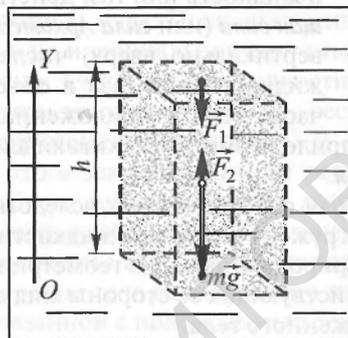


Рис. 8.2

Как видно, гидростатическое давление ρgh зависит от плотности жидкости и высоты ее столба в сосуде и не зависит от формы сосуда. Таким распределением давления в жидкости объясняется гидростатический парадокс: сила давления на дно сосуда не всегда равна весу жидкости в сосуде (рис. 8.3).

Гидростатическое уравнение позволяет сформулировать условия равновесия однородных и неоднородных жидкостей в сообщающихся сосудах. Однородные жидкости ($\rho_1 = \rho_2$) уста-

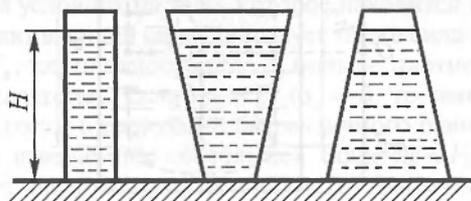


Рис. 8.3

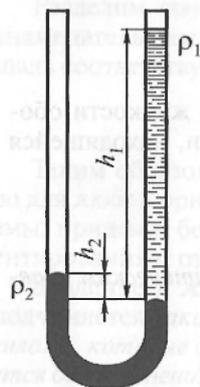


Рис. 8.4

наливаются в сообщающихся сосудах на одном уровне; если жидкости в сообщающихся сосудах неоднородны (рис. 8.4), то их высоты обратно пропорциональны плотностям жидкостей:

$$h_1 / h_2 = \rho_2 / \rho_1.$$

В соответствии с законом, установленным древнегреческим ученым Архимедом (ок. 287–212 до н.э.), на тело, погруженное в жидкость или газ, действует *выталкивающая сила* (или *сила Архимеда*), направленная вертикально вверх, численно равная весу жидкости или газа в объеме погруженной части тела и приложенная в центре этого

объема. Точку приложения выталкивающей силы называют *центром давления*.

Выталкивающая сила возникает вследствие упругого взаимодействия погруженного тела и жидкости, т.е. имеет электромагнитную природу. Она равна геометрической сумме всех сил давления, действующих со стороны жидкости (газа) на поверхность погруженного тела.

Пусть сосуд с жидкостью находится в состоянии покоя относительно инерциальной системы отсчета. Рассмотрим цилиндр высотой H с площадью основания S , погруженный в жидкость плотностью ρ (рис. 8.5). Пусть внешнее давление равно p_0 , а основания цилиндра находятся на глубине h_1 и h_2 . Сила давления на верхнее основание цилиндра $F_1 = (p_0 + \rho g h_1) S$

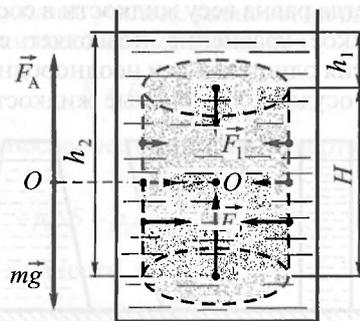


Рис. 8.5

и направлена вертикально вниз. Сила давления на нижнее основание цилиндра $F_2 = (p_0 + \rho gh_2)S$ и направлена вертикально вверх.

Силы давления на боковую поверхность цилиндра скомпенсированы, поскольку в противном случае он начал бы двигаться в горизонтальном направлении. По определению выталкивающая сила $F_A = F_1 + F_2$. В скалярной форме $F_A = F_2 - F_1$. Если в последнюю формулу подставить значения сил давления, получим: $F_A = \rho gSH$. Поскольку $SH = V$, где V – объем цилиндра, то $F_A = \rho gV$. Произведение ρV выражает массу жидкости, которую можно было бы налить в цилиндр, если бы он был пустым, поэтому $F_A = mg$. Поскольку жидкость находится в покое относительно инерциальной системы отсчета, связанной с поверхностью Земли, то вес жидкости G равен ее силе тяжести mg . С учетом этого $F_A = G$, где G – вес жидкости в объеме цилиндра, погруженного в жидкость.

Подчеркнем, что в законе Архимеда речь идет именно о весе жидкости в объеме тела (части тела), которое погружено в жидкость, а не о силе тяжести самой жидкости. Это очень существенно, поскольку вес тела равен силе тяжести только при условии, что ускорение тела относительно инерциальной системы отсчета, связанной с поверхностью Земли, равно нулю.

В общем случае, если сосуд с жидкостью движется с ускорением \vec{a} , вес жидкости в объеме погруженной части тела $G = m(g - \vec{a})$, поэтому $F_A = m(\vec{g} - \vec{a})$. Из последнего выражения следует, что если жидкость находится в состоянии полной невесомости (например, в сосуде, который свободно падает, или в космическом корабле, летящем с выключенными двигателями), то на погруженное в нее тело выталкивающая сила не действует.

Приведенная формулировка закона остается справедливой и в случае, если тело частично погружено в жидкость, но не соприкасается со стенками сосуда.

В земных условиях на тело, которое находится в жидкости, кроме выталкивающей силы действует также сила тяжести mg . Если $mg > F_A$, т.е. плотность тела ρ_t больше плотности жидкости ρ , то тело тонет. Если $mg = F_A$ ($\rho_t = \rho$), то тело находится внутри жидкости в состоянии безразличного равновесия (так называемое взвешенное состояние). Если $mg < F_A$ ($\rho_t < \rho$), то тело плавает на поверхности жидкости, частичногрузившись в нее.

В СИ давление измеряется в паскалях ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).