

§ 89. Общие свойства жидкостей и газов

1. В отличие от твердых тел жидкости и газы в состоянии равновесия не обладают упругостью формы *). Они обладают только объемной упругостью. В состоянии равновесия напряжение в жидкости и газе всегда нормально к площадке, на которую оно действует. Касательные напряжения вызывают только изменения формы элементарных объемов тела (сдвиги), но не величину самих объемов. Для таких деформаций в жидкостях и газах усилий не требуется, а потому в этих средах при равновесии касательные напряжения не возникают. С точки зрения механики жидкости и газы могут быть определены как такие среды, в которых при равновесии касательные напряжения существовать не могут.

Из этого определения следует, что в состоянии равновесия величина нормального напряжения в жидкости или газе не зависит от ориентации площадки, на которую оно действует. Для доказательства возьмем произвольно ориентированную площадку, внешнюю нормаль к которой будем характеризовать единичным вектором \mathbf{n} . Так как напряжение нормально к площадке, то его можно представить в виде $\sigma_n = -P\mathbf{n}$. Напряжения на площадках, перпендикулярных к координатным осям, запишутся как $\sigma_x = -P_x\mathbf{i}$, $\sigma_y = -P_y\mathbf{j}$, $\sigma_z = -P_z\mathbf{k}$, где \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} — координатные орты. Подставляя эти значения в формулу (74.1), получим

$$P\mathbf{n} = P_x n_x \mathbf{i} + P_y n_y \mathbf{j} + P_z n_z \mathbf{k}.$$

Умножая скалярно это соотношение последовательно на \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} , найдем

$$P = P_x = P_y = P_z. \quad (89.1)$$

Отсюда заключаем, что в состоянии равновесия нормальное напряжение (давление P) не зависит от ориентации площадки, на которую оно действует. Это — закон Паскаля (1623—1662).

2. В случае газов нормальное напряжение всегда направлено внутрь газа, т. е. имеет характер давления. В жидкостях, как

*) Исключения составляют жидкие пленки и поверхностные слои жидкостей. Однако связанные с ними явления в настоящей главе не рассматриваются. Они будут рассмотрены в т. II нашего курса.

исключение, могут реализоваться и такие случаи, когда нормальное напряжение является *натяжением* (отрицательным давлением): жидкости оказывают сопротивление на разрыв. Это сопротивление, вообще говоря, довольно значительно и в однородных жидкостях составляет несколько десятков ньютонов на квадратный миллиметр. Однако обычные жидкости неоднородны. Они содержат мельчайшие пузырьки газов, которые действуют подобно надрезам на натянутой веревке и сильно ослабляют прочность жидкости на разрыв. Поэтому в подавляющем большинстве случаев в жидкостях напряжения также имеют характер давлений. Вот почему для обозначения нормального напряжения мы пользуемся символом — Pn (давление), а не $+Tn$ (натяжение). Если давление переходит в натяжение, т. е. становится отрицательным, то это, как правило, ведет к нарушению сплошности жидкости. С отмеченными особенностями связано и то обстоятельство, что газы обладают способностью к неограниченному расширению: газ всегда полностью заполняет объем сосуда, в котором он заключен. Напротив, каждой жидкости свойствен определенный *собственный объем*, лишь незначительно меняющийся с изменением внешнего давления. Жидкости имеют свободную поверхность и могут собираться в капли. Чтобы отметить эти обстоятельства, жидкие среды называют также *капельно-жидкими*. В механике при рассмотрении движений капельных жидкостей и газов газ обычно рассматривают как частный случай жидкости. Таким образом, под жидкостью в обобщенном смысле слова понимают либо капельную жидкость, либо газ. *Отдел механики, занимающийся изучением движения и равновесия жидкостей, называется гидродинамикой.*

3. Давление, существующее в жидкости, обусловлено ее сжатием. А так как касательные напряжения не возникают, то упругие свойства жидкостей по отношению к малым деформациям характеризуются только одной упругой постоянной: *коэффициентом сжимаемости*

$$\gamma = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP}, \quad (89.2)$$

или обратной ему величиной — *модулем всестороннего сжатия*

$$K = -V \frac{dP}{dV}. \quad (89.3)$$

Предполагается, что температура жидкости при сжатии поддерживается постоянной. При рассмотрении деформаций, сопровождающихся изменениями температуры, вместо (89.2) и (89.3) предпочтительнее писать

$$\gamma_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dP} \right)_{T=\text{const}}, \quad (89.2a)$$

$$K_T = -V \left(\frac{dP}{dV} \right)_{T=\text{const}} \quad (89.3a)$$

и называть γ_T и K_T — *изотермическими коэффициентом и модулем всестороннего сжатия*. В быстрых процессах, происходящих практически без теплообмена, особую роль играют *адиабатические коэффициенты и модули упругости* (см. § 75, п. 8).

При рассмотрении деформаций твердых тел модуль всестороннего сжатия мы определили формулой (77.3), отличающейся от (89.3) тем, что вместо величины dP в ней стоит просто P . Такое определение было возможно потому, что твердое тело обладает определенным объемом, когда внешнее давление P обращается в нуль, и этот объем меняется мало даже при конечных изменениях P . Формула (89.3) переходит в (77.3), если положить $dP = P - P_0$ и считать, что $P_0 = 0$. Так же можно было бы поступать и в случае капельных жидкостей. Но в случае газов формула (77.3) не годится. Надо пользоваться более общей формулой (89.3), так как при отсутствии внешнего давления объем газа становится бесконечно большим. Именно так мы поступали в § 85 при рассмотрении вопроса о скорости звука в газах.

Можно также сказать, что некоторое состояние тела с давлением P_0 (и температурой T) мы выбираем за *нормальное* и рассматриваем изменения объема тела по отношению к этому нормальному состоянию. В случае твердых и капельно-жидких тел модуль упругости (89.3) в широких пределах не зависит от величины P_0 . По этой причине и можно положить $P_0 = 0$. В случае же газов конкретизация значения P_0 существенна. Приравнивать P_0 нулю в этом случае нельзя. Так, если воспользоваться законом Бойля — Мариотта $P \sim 1/V$ (при $T = \text{const}$), то из (89.3) легко получить $K = P$. Отсюда видно, что о модуле упругости газа можно говорить лишь тогда, когда указано его давление (при заданной температуре).

4. Малую сжимаемость капельных жидкостей можно продемонстрировать с помощью следующего эффектного опыта. Сосуд из пластмассы наполовину наполняется водой. Если произвести выстрел из мелкокалиберной винтовки, чтобы пуля пролетела выше уровня жидкости, то она оставляет лишь отверстия в стенках сосуда, а самый сосуд остается целым. Если же пуля попадает в сосуд на несколько сантиметров ниже уровня жидкости, то сосуд разлетается вдребезги. Дело в том, что для проникновения пули в воду она должна либо сжать ее на величину своего объема, либо вытеснить вверх. Для вытеснения недостаточно времени. Происходит сжатие — в жидкости развиваются большие давления, которые и разрывают стенки сосуда. Для опыта годятся также деревянные ящики или бумажные коробки, наполненные водой. В последнем случае опыт удастся уже с духовым ружьем. Аналогичные явления возникают при разрывах глубинных бомб, применяемых против подводных лодок. Вследствие малой сжимаемости воды при взрыве в воде развиваются громадные давления, которые и разрушают лодку.

Малая сжимаемость жидкостей позволяет во многих случаях вообще полностью пренебречь изменениями их объема. Тогда вводят представление об *абсолютно несжимаемой жидкости*. Это — идеализация, которой постоянно пользуются. Конечно, и в несжимаемой жидкости давление определяется степенью ее сжатия. Однако даже при очень больших давлениях изменения объема «несжимаемых жидкостей» столь ничтожны, что с ними можно не считаться. Можно сказать, что несжимаемая жидкость — это предельный случай сжимаемой жидкости, когда для получения бесконечно больших давлений уже достаточны бесконечно малые сжатия. Несжимаемая жидкость является такой же абстракцией, как и твердое тело. Деформации твердых тел существенны для выяснения механизма возникновения внутренних напряжений. Но когда деформации малы, можно в ряде случаев заменить реальное тело идеализированным твердым телом. Твердое тело — это предельный случай реального тела, когда для получения бесконечно больших напряжений достаточны бесконечно малые деформации.

Можно или нельзя реальную жидкость заменять идеальной — это зависит не столько от того, насколько мала сжимаемость жидкости, сколько от содержания тех вопросов, на которые надо получить ответы. Так, при рассмотрении звуковых волн, вообще говоря, принципиально невозможно отвлекаться от сжимаемости жидкостей. А при рассмотрении воздушных течений, если только перепады давления не слишком велики, воздух часто можно рассматривать как несжимаемую жидкость (см. § 94, п. 5).

5. В состоянии равновесия давление жидкости (или газа) P меняется с изменением ее плотности ρ и температуры T . Оно однозначно определяется значениями этих параметров. Соотношение

$$P = f(\rho, T) \quad (89.4)$$

между давлением, плотностью и температурой в состоянии равновесия называется *уравнением состояния*. Оно имеет разный вид для разных веществ и особой простотой отличается в случае разреженных газов. Вопросы, связанные с уравнением состояния, подробно разбираются во втором томе нашего курса. Здесь мы ограничимся замечанием, что, зная уравнение состояния, изотермический модуль упругости K_T можно вычислить простым дифференцированием. Он в общем случае является функцией плотности и температуры или давления и температуры.

6. Если жидкость находится в движении, то наряду с нормальными напряжениями в ней могут возникать и касательные силы. Однако последние определяются не самими деформациями жидкости (сдвигами), а их скоростями, т. е. производными деформаций по времени. Поэтому их следует относить к классу сил трения или вязкости. Они называются *касательными* или *сдвиговыми силами*.

внутреннего трения. Наряду с касательными могут существовать и *нормальные* или *объемные* силы внутреннего трения. От обычных сил давления P эти силы отличаются тем, что они также определяются не степенью сжатия жидкости, а *скоростью изменения сжатия во времени.* Эти силы играют существенную роль в быстрых процессах, например при распространении предельно коротких ультразвуковых волн (длина которых приближается к молекулярным размерам и межмолекулярным расстояниям). В предельном случае, когда скорость изменения деформаций в жидкости стремится к нулю, в ней исчезают все силы внутреннего трения, как сдвиговые, так и обусловленные сжатием. Жидкость, в которой при любых движениях не возникают силы внутреннего трения (как касательные, так и нормальные), называется *идеальной.* Иными словами, идеальной называют жидкость, в которой могут существовать только силы нормального давления P , однозначно определяемого степенью сжатия и температурой жидкости. Такие силы могут быть вычислены с помощью уравнения состояния жидкости (89.4) не только тогда, когда жидкость покоится, но и тогда, когда она движется произвольным образом. Конечно, строго идеальных жидкостей не существует. Это — абстракции, которыми можно пользоваться, когда скорости изменения деформаций в жидкости не очень велики.

7. Если к жидкости приложить касательные напряжения, то возникнет движение. Оно в конце концов прекращается и переходит в состояние покоя, в котором касательные напряжения отсутствуют. Скорости изменения деформаций жидкости могут меняться в широких пределах. Для таких жидкостей, как вода или спирт, эти изменения происходят весьма быстро; для очень вязких жидкостей, как мед или патока, — весьма медленно. Наконец, есть вещества, которые при быстрых воздействиях на них ведут себя, как твердые тела, а при медленных — как очень вязкие жидкости. Сюда относятся так называемые *аморфные твердые тела.* Например, кусок сапожного вара или асфальта разбивается на мелкие части, если его ударить молотком. На асфальте можно стоять и по нему можно ходить. Но асфальт вытекает из бочки в течение недель или месяцев. Скорость вытекания сильно увеличивается с температурой. Стеклянная палочка, положенная своими концами на две опоры, прогибается, если подождать достаточно длительное время (месяцы или годы), причем ее прогиб не исчезает по прекращении действия силы тяжести. Эти примеры показывают, что нельзя провести резкое разграничение между жидкостями и аморфными твердыми телами. Истинно твердыми телами являются только *кристаллы.* Впрочем, говоря о жидкостях, мы будем всегда иметь в виду жидкости, не обладающие аномально большой вязкостью, когда отличие их от аморфных твердых тел выступает вполне отчетливо.