

на единицу изменения температуры T :

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \left[\frac{1}{град} \right].$$

Величина β_T для данной жидкости зависит от температуры. При малых изменениях температуры можно приближенно считать β_T постоянной величиной; тогда получается линейная зависимость объема жидкости от температуры:

$$V = V_0 [1 + \beta_T (T - T_0)],$$

где V_0 есть объем при некоторой начальной температуре T_0 .

Все жидкости и газы, кроме уже перечисленных механических свойств, обладают также в той или иной мере *вязкостью*. Это свойство будет рассмотрено в следующем параграфе.

§ 4. Вязкость; ее происхождение у жидкостей и у газов

Вязкостью называется способность жидкостей и газов сопротивляться усилиям, касательным к поверхности выделенного объема, т. е. усилиям сдвига. Более вязкой считается та жидкость, в которой при прочих равных условиях касательные усилия больше. Мы будем рассматривать в настоящем курсе главным образом мало-вязкие жидкости (как вода, воздух и т. д.). К жидкостям с большой вязкостью относятся глицерин, минеральное масло, патока и др.

Следует иметь в виду, что возникновение касательных усилий в жидкостях и газах влечет за собой изменение усилий сжимающих, нормальных к поверхности выделенного объема, и таким образом, вязкость проявляется не только непосредственно в касательных усилиях, но косвенным образом и в нормальных.

Касательные усилия в жидкостях и газах возникают при перемещении частиц друг относительно друга или относительно поверхностей, ограничивающих жидкость или газ (стенки трубопровода, поверхность крыла и т. д.). Если жидкость находится в покое, то касательные усилия мы будем считать отсутствующими. В действительности у маловязких жидкостей трение покоя существует, но весьма мало.

У капельных жидкостей вязкость является свойством, обратным текучести, т. е. подвижности частиц: чем больше вязкость, тем меньше текучесть. Вязкость у капельных жидкостей представляет собою проявление механических связей между частицами (сил сцепления). Под действием этих механических связей молекулы жидкостей колеблются около своих средних по времени положений в пространстве. Так как кинетическая энергия колеблющейся молекулы возрастает с возрастанием температуры и ее колебательное движение при этом усиливается, то механические связи ослабевают с возрастанием температуры; поэтому вязкость капельных жидкостей уменьшается при

возрастании температуры¹⁾ и, наоборот, резко увеличивается при приближении температуры к точке замерзания.

Физическое происхождение вязкости газов иное, чем у капельных жидкостей. Напомним, что в кинетической теории газов предполагается беспорядочное тепловое движение молекул. Оно имеет место всегда, вне зависимости от того, находится ли газ в целом в покое или в движении. Но если газ движется, то на беспорядочное тепловое движение молекул накладывается движение газа в целом.

Согласно кинетической теории газов, молекулы газа движутся равномерно и прямолинейно до тех пор, пока не столкнутся друг с другом. Когда молекулы из какого-нибудь слоя попадают в другой с иной скоростью, то в результате столкновений они обмениваются количествами движения и тем самым изменяют скорость течения газа.

Таким образом, *диффузия молекул, сопровождающаяся переносом количества движения из одного слоя в другой, является причиной возникновения силы, касательной к слоям (силы трения).*

Как известно из кинетической теории газов, скорость теплового движения молекул газа с увеличением температуры возрастает. Поэтому с увеличением температуры увеличивается переносимое молекулами из слоя в слой количество движения, а следовательно, увеличивается и вязкость газа.

Касательные усилия в жидкостях и газах, по сравнению с нормальными к поверхности сжимающими усилиями, обычно весьма малы. Так, например, при скоростях полета обычных для современной скоростной авиации нормальные усилия, приходящиеся на один квадратный метр поверхности летательного аппарата, достигают величин порядка десятков тысяч килограмм, тогда как касательные усилия при тех же условиях имеют величину порядка десятков килограммов. Это обстоятельство позволяет при решении многих практических вопросов, в особенности при решении вопросов, относящихся к распределению нагрузок по поверхности летательного аппарата, к определению величины подъемной силы и аэродинамического момента, пренебрегать касательными усилиями по сравнению с нормальными, а значит, пренебрегать и вязкостью жидкой или газообразной среды. Поэтому в теории для решения указанных вопросов изучают жидкость, не имеющую вязкости; такая жидкость называется идеальной жидкостью; она значительно проще для изучения, чем жидкость вязкая.

Следует еще раз подчеркнуть, что жидкость можно считать идеальной только при определении нормальных усилий. Если же

¹⁾ Более подробно физическая теория жидкого состояния вещества изложена в книге: Френкель Я. И., Кинетическая теория жидкости, Изд-во АН СССР, 1945.

задача состоит в определении, например, сопротивления трению при движении тела, то предполагать среду идеальной нельзя, а нужно рассматривать и касательные усилия, т. е. учитывать присущую среде вязкость.

§ 5. Гипотеза о непрерывности жидкой и газообразной среды. Границы ее применения

Для изучения механики жидкостей и газов необходимо ясно представлять себе их физическое строение.

Действительное строение материи, в частности жидкости или газа, как мы знаем, молекулярное, и следовательно, силы взаимодействия между частицами являются в конечном счете молекулярными. При движении жидкости или газа на основной поток накладывается беспорядочное молекулярное движение. Таким образом, действительное движение жидкости или газа оказывается чрезвычайно сложным.

Но теория не может рассматривать действительность такой, какова она есть, со всей присущей ей сложностью явлений. Теория всегда начинает с того, что упрощает, лучше сказать, схематизирует действительность; эта схематизация приводит к так называемой модели явления, которая затем кладется в основу исследования.

Вообще говоря, можно придумать очень много предположений, упрощающих действительность, но практическую ценность для исследования имеют только те из них, в которых пренебрегают свойствами и величинами, для данного исследования не существенными (т. е. такими, которые не изменяют основных результатов), и наоборот, подчеркивают именно те особенности рассматриваемого явления, которые определяют его сущность.

Мы остановимся сейчас на основной для всей аэродинамики гипотезе о структуре жидкостей и газов. Эта гипотеза удачно упрощает действительность и создает тем самым модель жидкой или газообразной среды.

Беспорядочное молекулярное движение, которое накладывается на основной поток, значительно его усложняет, и поэтому естественно в первом приближении не принимать его во внимание. Для решения задачи о силовом взаимодействии между жидкой или газообразной средой и телом (если газ не очень разрежен) оказывается достаточным изучить движение частиц среды, размеры которых во много раз превосходят молекулярные. Вспомним, что в одном кубическом миллиметре воздуха содержится при нормальных условиях $2,7 \cdot 10^{16}$ молекул; нет надобности определять движение каждой из них; достаточно для технических приложений изучить движение такой частицы в целом, как если бы она была сплошь заполнена материей. Можно поэтому во многих аэродинамических исследованиях отказаться от действительного, молекулярного строения материи и предположить,