

Капиллярные явления играют большую роль в природе, технике, сельском хозяйстве, в быту и при научных исследованиях. По тонким капиллярным каналам в фитиле керосин поднимается из резервуара к горелке. Если между фундаментом и стенами строящегося здания не проложить слой гидроизоляции, то влага из почвы будет подниматься по капиллярным порам кирпича и вызовет отсыревание всего здания. Если диаметр обоих колен ртутного манометра неодинаков и притом один из них — капилляр, то ртуть в них будет находиться на неодинаковом уровне (рис. 3.36), что приведет к ошибкам в измерении давления.

§ 45. Явления переноса. Вязкость жидкости

При хаотическом тепловом движении, как указывалось в § 42, молекулы жидкости перескакивают из одних временных положений равновесия в соседние.

В отличие от газа «длина свободного пробега» при подобных перескоках имеет порядок диаметра молекул и практически не зависит от внешнего давления и температуры. Примерный путь, совершаемый молекулой в жидкости, изображен на рис. 3.37, где стрелками показаны колебания молекулы около временных положений равновесия, а линиями — перескоки их с места на место.

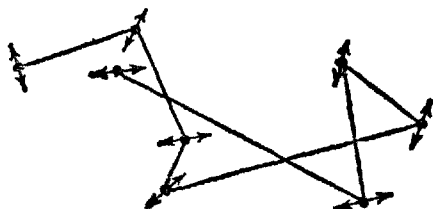


Рис. 3.37.

Переходя с места на место, молекулы диффундируют внутри жидкости. Это явление с а м о д и ф ф у з и и можно наблюдать, если примешать к жидкости некоторое число

молекул радиоактивного изотопа, за движением которых можно следить по их излучению.

Поток j молекул, диффундирующих через единицу площади за единицу времени, так же как и при диффузии в газе, определяется уравнением

$$j = -D \frac{dn}{dx}, \quad (45.1)$$

где n — концентрация диффундирующих молекул, $\frac{dn}{dx}$ — градиент этой концентрации, а D — коэффициент диффузии.

Этим же уравнением (45.1) описывается и диффузия посторонних молекул и ионов, растворенных в жидкости. Чем выше температура, тем меньшее число колебаний совершает молекула в положении равновесия до своего перескока, тем интенсивнее процесс диффузии и тем больше величина D . Однако коэффициенты

диффузии в жидкости все же имеют порядок 10^{-9} м²/с, т. е. во много раз меньше, чем в газах.

Перенос количества движения между слоями жидкости, движущимися с различными скоростями, также описывается формально теми же уравнениями, что и в газе. Сила трения между соседними слоями равна

$$\frac{F}{S} = -\eta \frac{dv}{dx}, \quad (45.2)$$

где S — площадь соприкосновения слоев, $\frac{dv}{dx}$ — градиент скорости движения жидкости (рис. 3.38) и η — коэффициент внутреннего трения, или вязкость жидкости.

В газе перенос количества движения осуществляется при переходе молекул из одного слоя в другой. Благодаря одинаковому механизму диффузии и внутреннего трения, коэффициенты D и η в газе прямо пропорциональны друг другу:

$$D_g \sim \eta_g. \quad (45.3)$$

В жидкости же механизм внутреннего трения отличен от механизма диффузии. Так как молекулы жидкости большую часть времени находятся около положений равновесия, то движущаяся масса жидкости увлекает соседние слои в основном за счет сил сцепления.

С ростом температуры текучесть жидкости возрастает, а вязкость падает. Поэтому, как показал Я. И. Френкель, вязкость жидкости обратно пропорциональна коэффициенту диффузии:

$$\eta_{ж} \sim \frac{1}{D_{ж}}. \quad (45.4)$$

При нагревании жидкость «разрыхляется» и возрастает ее свободный объем $V - b$ (где b — постоянная в уравнении ван-дер-Ваальса, характеризующая недоступную для молекул долю полного объема системы V). Учитывая это, А. И. Бачинский предложил очень простую формулу, описывающую зависимость вязкости от температуры:

$$\eta_{ж} = \frac{B}{V - b}, \quad (45.5)$$

где B — константа, различная для разных жидкостей.

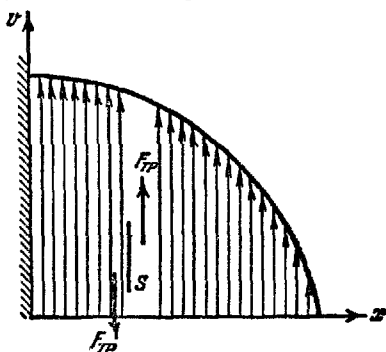


Рис. 3.38.

Формула Бачинского хорошо оправдывается на опыте, но не показывает явной зависимости $\eta_{ж}$ от температуры. Я. И. Френкель вывел формулу, непосредственно связывающую $\eta_{ж}$ с T :

$$\eta_{ж} = \text{const} \cdot \frac{\omega}{e^{kT}}. \quad (45.6)$$

Здесь ω — энергия, которую нужно сообщить молекуле жидкости, чтобы она могла перескочить из одного положения равновесия в соседнее. Величина ω обычно имеет порядок $(2 \div 3) \cdot 10^{-20}$ Дж. Поэтому согласно (45.6) при нагревании жидкости, например, на 10°C вязкость ее падает на 20—30%.

Вязкость жидкости обычно во много раз больше, чем вязкость газа. Так, для воды при 25°C $\eta_{\text{вода}} = 0,01$ П (пуаз) = $0,01$ г/(см·с) =

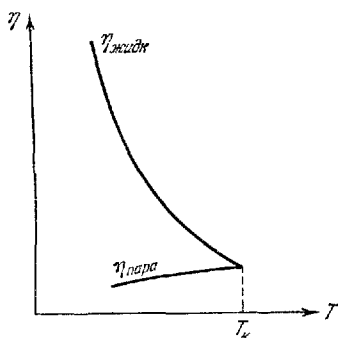


Рис. 3.39.

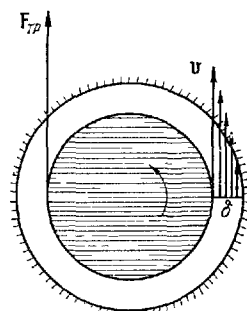


Рис. 3.40.

$= 10^{-3}$ кг/(м·с), а для насыщенного водяного пара $\eta_{\text{пар}} = 10^{-4}$ П. С ростом температуры вязкость жидкости быстро падает, а вязкость пара медленно возрастает, и при критической температуре T_k они сравниваются друг с другом, как это показано на рис. 3.39.

При понижении температуры вязкость большинства жидкостей быстро возрастает. Однако из этого общего правила имеется исключение П. Л. Капица нашел, что при приближении к абсолютному нулю температуры гелий не только не увеличивает своей вязкости, но переходит в «сверхтекучее» состояние, характеризующееся полным отсутствием вязкости. Природа этого явления чисто квантовая, и касаться ее здесь мы не будем.

Вязкость жидкости определяет силу сопротивления жидкости движению в ней тел. Так, сила сопротивления движению шара радиуса r при малых скоростях движения находится по тому же уравнению

$$F = 6\pi r\eta v, \quad (45.7)$$

как и при движении в газе (формула Стокса). Эта сила прямо пропорциональна вязкости среды η и скорости движения шара v . Также прямо пропорциональна η и v и сила сопротивления движению жидкости в капиллярах.

В 1883 г. Н. П. Петров, исходя из уравнения (45.2), рассчитал силу трения, действующую на смазанный шип, вращающийся в подшипнике:

$$F = \eta \frac{v}{\delta} S, \quad (45.8)$$

где v — окружная скорость шипа, S — его поверхность и δ — толщина зазора между шипом и подшипником (рис. 3.40). На этой основе была создана гидродинамическая теория смазки, применяемая для расчета трения и износа трущихся поверхностей машин.

Отметим, что с точностью до безразмерного коэффициента формула (45.7) может быть получена из анализа размерностей входящих в нее величин. Действительно, имеется сила F , размерность которой $[F] = \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$. Эта сила по характеру задачи должна зависеть от: 1) вязкости среды η с размерностью $[\eta] = \text{кг} / (\text{м} \cdot \text{с})$, 2) радиуса шарика $[r] = \text{м}$ и 3) его скорости $[v] = \text{м} / \text{с}$. Из этих трех величин можно получить величину размерности F только одним способом: если составить их произведение. Следовательно, с точностью до безразмерного множителя a

$$F = a r \eta v. \quad (45.9)$$

Для определения значения a = бл учет размерностей уже недостаточен.

Аналогичный «поиск» предварительного результата до точных расчетов с помощью анализа размерностей может быть применен в самых различных задачах.