5.4. Вязкость.

Вязкость, или *внутреннее трение*, возникает при движении слоев газа и состоит в вовлечении в движение соседних слоев. Вязкость в газах обусловлена переносом импульса молекул поперек движения слоев газа. Молекулы газа участвуют в двух движениях: направленного движения газа и хаотического движения молекул при данной температуре.

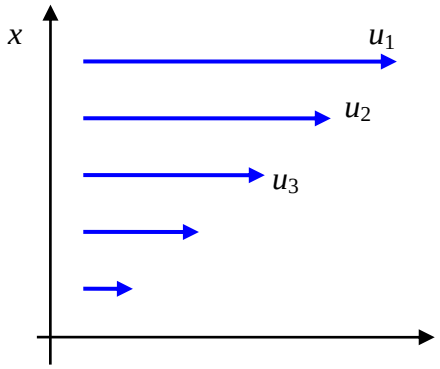

Рис. 4.1.

Пусть направленная скорость молекул газа $u = u(x)$, где x – координата, перпендикулярная направлению направленной скорости (см пример на рис. 4.1). Передача импульса молекул происходит за счет перехода молекул, в результате их хаотического движения, из одного слоя в соседний слой, распространяющийся с другой скоростью. Отсюда возникает внутреннее трение газовых слоев: быстрый слой тормозится, а медленный – ускоряется.

Сила трения между слоями пропорциональна поперечному градиенту скорости и площади соприкасающейся поверхности S:

$$F = \frac{dp}{dt} = \eta \frac{du}{dx} S \qquad (5.4.1)$$

Здесь введен коэффициент η – *коэффициент вязкости*, du/dx – градиент скорости упорядоченного движения, S – площадь поверхности, вдоль которой происходит соприкосновение двух слоев газа.

Наша задача состоит в том, чтобы найти коэффициент вязкости η и связать его с параметрами газовой системы. Сила трения, отнесенная к площади трущихся поверхностей газа, равна плотности потока импульса упорядоченного движения в перпендикулярном скорости направлении. Итак пусть $G = mu(x)$ – импульс упорядоченного движения одной молекулы. Тогда записывая производную:

$$\frac{\partial G}{\partial x} = m \frac{\partial u(x)}{\partial x}, \qquad (5.4.2)$$

подставим полученный градиент импульса упорядоченного движения в общее уравнение переноса (5.2.9). Таким образом, для плотности потока импульса вдоль оси x (т.е. поперек направленному движению, см рис. 4.2) получаем обычное уравнение:

$$j_G = -\frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \lambda \frac{\partial G}{\partial x} = -\frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \lambda m \frac{\partial u}{\partial x} \qquad (5.4.3)$$

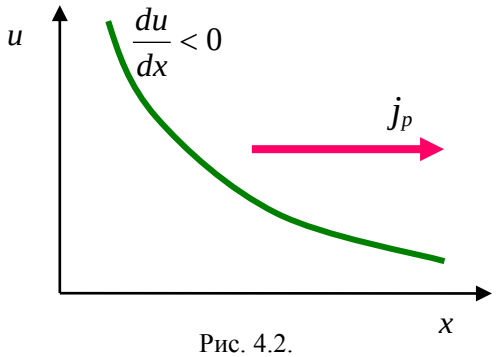

Рис. 4.2.

Физически плотность потока импульса – это импульс, переданный единичной площадке в единицу времени, т.е. сила, отнесенная к единице площади:

в единицах системы CGSE: *Дн/см*^{2},
в единицах системы СИ: *Н/м*^{2}.

Сравнивая (5.4.3) с силой трения, отнесенной к единице поверхности, из соотношения (5.4.1):

$$j_p = -\eta \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{F}{S} \qquad (5.4.4)$$

получаем выражение для коэффициента вязкости η (Максвелл 1860 г.):

$$\eta = \frac{1}{3} m n_0 \langle v \rangle \lambda = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \lambda \qquad (5.4.5)$$

Итак, коэффициент вязкости выражается опять же через концентрацию молекул, их среднюю скорость и длину свободного пробега.

Рассмотрим основные следствия из полученных соотношений.

1). Размерность коэффициента вязкости в системе СИ:

$$[\eta] = 1\,Па \cdot с = 1 \frac{Н \cdot с}{м^2}.$$

В системе CGSE коэффициент вязкости измеряется в *Пуазах* 1 *Пз* = 1 *Дн·с/см*^{2} = 1 *г/см·с*.

2). Преобразуем немного коэффициент вязкости, подставив выражение для средней длины пробега:

$$\eta = \frac{1}{3} m n_0 \langle v \rangle \lambda = \frac{1}{3} m n_0 \langle v \rangle \cdot \frac{1}{\sqrt{2}\sigma n_0} = \frac{m\langle v \rangle}{3\sqrt{2}\sigma} \tag{5.4.6}$$

Отсюда видно, что коэффициент вязкости не зависит от давления. В самом деле, длина свободного пробега обратно пропорциональна p, а концентрация прямо пропорциональна давлению p. То есть коэффициент η не зависит от плотности, что справедливо для достаточно плотных газов и нарушается в разреженных газах. С другой стороны, если пренебречь зависимостью сечения от температуры (считая, что $\sigma = const$), то коэффициент вязкости пропорционален корню из температуры $\eta \sim \sqrt{T}$ из-за зависимости средней скорости от температуры.

3). Типичные значения коэффициента динамической вязкости при температуре $t°C = 20°C$ и давлении $p = 1$ *атм* составляют величину ~ 10^{-5} *Па·с*. Так для некоторых газов имеем:

$\eta(\mathrm{He}) = 1.96\ 10^{-5}$ *Па·с*,

$\eta(\text{воздух}) = 1.82\ 10^{-5}$ *Па·с*,

$\eta(O_2) = 2.02\ 10^{-5}$ *Па·с*.

4). Связь между коэффициентами теплопроводности и вязкости получается из формул (5.3.4) и (5.4.5):

$$\frac{\chi}{\eta} = C_V \tag{5.4.7}$$

Т.е. отношение коэффициентов теплопроводности и вязкости равно молярной теплоемкости газа.