

1.7 ЯВЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ВЯЗКОСТИ

Явление теплопроводности вещества определяет многие очень важные технические процессы и широко применяется в разнообразных расчетах. Эмпирическое уравнение теплопроводности было получено французским ученым Фурье: количество тепла ΔQ , проходящее за время Δt через площадку S , перпендикулярную к направлению переноса тепла, равно

$$\Delta Q = -\chi(dT/dz)S\Delta t, \quad (1.31)$$

где dT/dz – градиент температуры, dT – изменение температуры на расстоянии dz вдоль направления потока тепла, χ – коэффициент теплопроводности вещества. Градиент температуры показывает скорость изменения температуры вдоль потока тепла. Если численно положить $(dT/dz) = -1$, $S = 1$, $\Delta t = 1$, то согласно (1.31) получим $\Delta Q = \chi$. Отсюда следует *физический смысл коэффициента χ* : коэффициент теплопроводности численно равен количеству тепла, проходящего за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно к потоку тепла, при градиенте температуры, равном единице. Размерность коэффициента теплопроводности $[\chi] = \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Мы рассмотрели два явления переноса: **диффузию** и **теплопроводность**. В явлении диффузии наблюдается перенос молекул из одного места пространства в другое, вызванный тепловым движением. В явлении теплопроводности тепловое движение молекул переносит энергию от молекул с большей кинетической энергией в места с меньшей энергией молекул. За счет этого происходит поток тепла.

Существует еще одно явление переноса, называемое **явлением вязкости** и связанное с переносом импульса, которым обладает слой частиц. Рассмотрим это явление.

Реальной жидкости присуща вязкость, которая проявляется в том, что любое движение жидкости и газа самопроизвольно прекращается при отсутствии причин, вызвавших его. Рассмотрим опыт, в котором слой жидкости расположен над неподвижной поверхностью, а сверху его перемещается со скоростью \vec{U}_0 плавающая над ней пластина с поверхностью S . Опыт показывает, что для перемещения пластины с постоянной скоростью необходимо действовать на нее с силой \vec{F} . Так как пластина не получает ускорения, значит, действие этой силы

уравновешивается другой, равной ей по величине и противоположной по направлению силой, которая является силой трения $\vec{F}_{\text{тр}}$. Ньютон показал, что сила трения равна

$$F_{\text{тр}} = -\eta(\nu_0/d)S, \quad (1.32)$$

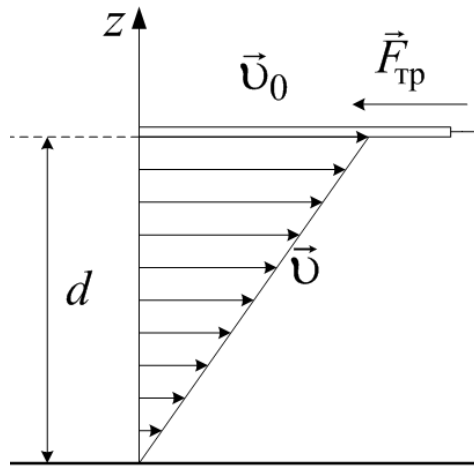


Рисунок 1.8

где d – толщина слоя жидкости, η – коэффициент вязкости или коэффициент трения жидкости, знак “–” учитывает различное направление векторов $\vec{F}_{\text{тр}}$ и \vec{U}_0 . Если исследовать скорость частиц жидкости в разных местах слоя, то оказывается, что она изменяется по линейному закону (рисунок 1.8): $\nu(z) = (\nu_0/d)z$. Дифференцируя это равенство, получим $d\nu/dz = \nu_0/d$. С учетом

этого равенства выражение (1.32) примет вид

$$F_{\text{тр}} = -\eta(d\nu/dz)S, \quad (1.33)$$

где η – коэффициент динамической вязкости. Величина $d\nu/dz$ называется градиентом скорости. Она показывает, как быстро изменяется скорость в направлении оси z . При $d\nu/dz = \text{const}$ градиент скорости численно равен изменению скорости ν при изменении z на единицу. Положим численно в выражении (1.33) $d\nu/dz = -1$ и $S = 1$, получим $\eta = F_{\text{тр}}$. Отсюда следует **физический смысл η : коэффициент вязкости численно равен силе внутреннего трения, возникающей на единице площади соприкосновения двух слоев жидкости, движущихся друг относительно друга с градиентом скорости равном единице.** Единица измерения вязкости в системе СИ является $[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$, в системе СГС $[\eta] = \text{П}$ (пуаз), причем $1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 10 \text{ П}$.

Для газов вязкость объясняется тем, что при тепловом движении молекулы, перелетая из слоя в слой, переносят импульс слоя. Попадая в слой, движущийся с большей скоростью из более медленного слоя, молекулы замедляют его движение, и наоборот, попадая в слой, движущийся с меньшей скоростью из слоя с более высокой скоростью, молекулы ускоряют его движение. Возникает

выравнивание скоростей слоев и, следовательно, сила вязкости. Уравнение вязкости определяется соотношением (1.33). Это уравнение и уравнение теплопроводности (1.31) можно получить, исходя из молекулярно-кинетических представлений. При этом, как и для явления диффузии, применительно к газам получаются следующие теоретические выражения для коэффициентов вязкости и теплопроводности:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v_{\text{ср}} \lambda \quad \text{и} \quad \chi = \frac{1}{3} \rho c_V v_{\text{ср}} \lambda, \quad (1.34)$$

где ρ – плотность газа, c_V – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме (будет рассмотрена в подразделе 2.4). Произведение $\rho \lambda$ не зависит от давления. Следовательно, из формул (1.34) следует, что коэффициенты η и χ не зависят от давления, что подтверждается опытом.

Однако в области вакуума рассмотренный механизм явления не применим и $\chi \sim p$, с уменьшением давления коэффициент теплопроводности уменьшается. В термосах и сосудах Дьюара делают двойные зеркальные стенки и из пространства между ними откачивают воздух до глубокого вакуума. При этом разреженный воздух становится хорошим теплоизолятором.