ЛЕКЦИЯ № 19 Явления переноса

Понятие о физической кинетике

Кинетические процессы – это процессы установления в неравновесных средах состояния равновесия.

Физическая кинетика – раздел физики, изучающий кинетические процессы.

Конвекция – вынужденный процесс перехода неравновесной среды в состояние равновесия в результате перемешивания среды.

Явление переноса – самопроизвольный процесс перехода неравновесной среды в состояние равновесия в результате хаотического (теплового) движения атомов и молекул.

К явлениям переноса относятся:

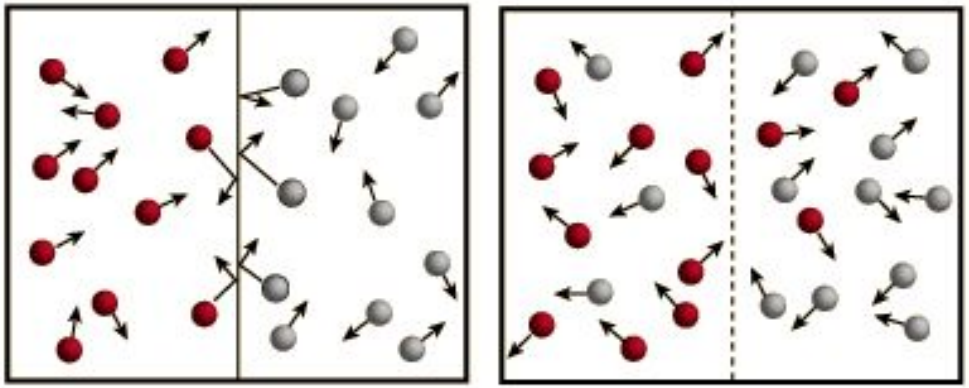
1) диффузия (массоперенос);

2) теплопроводность (теплоперенос);

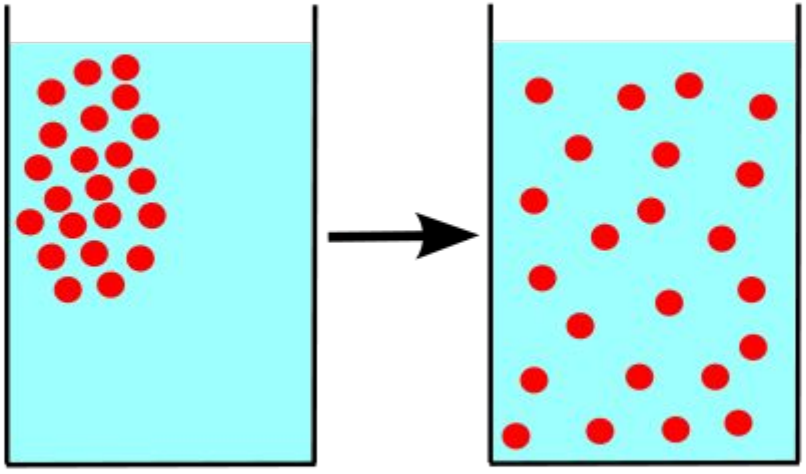
3) вязкость (внутреннее трение) и т. д.

Диффузия. Закон Фика

Взаимодиффузия – взаимное проникновение соприкасающихся веществ друг в друга.



Самодиффузия – процесс выравнивания концентрации в пределах одного вещества.



Плотность диффузионного потока – векторная величина, совпадающая по направлению с направлением распространения молекул вещества и численно равная количеству молекул, проходящему в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению диффузионного потока, [j]=м$^{-2}\cdot$с$^{-1}$.

$$\left|\vec{j}\right| = \frac{N}{St} \quad . \qquad (19.1)$$

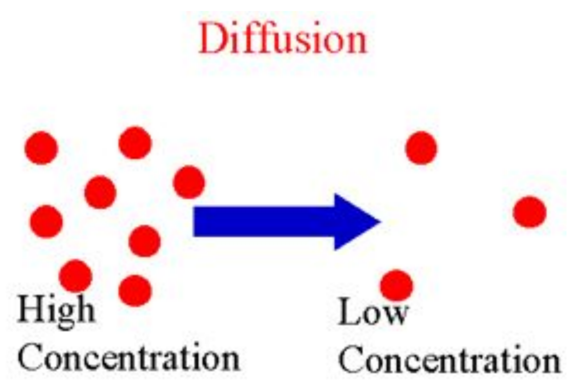
Закон Фика (немецкий физиолог Адольф Фик, 1855 г.): плотность диффузионного потока пропорциональна градиенту концентрации молекул вещества.

$$\left|\vec{j}\right| = -D \cdot \nabla n \quad . \qquad (19.2)$$

где D – коэффициент диффузии – величина, определяющая скорость переноса молекул, [D]=м^2/с.

Одномерный случай: $n=n(y)$

$$j = -D \cdot \frac{dn}{dy} \quad . \qquad (19.2a)$$

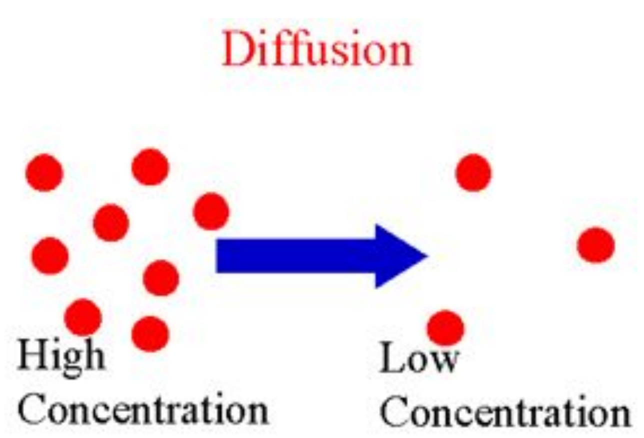


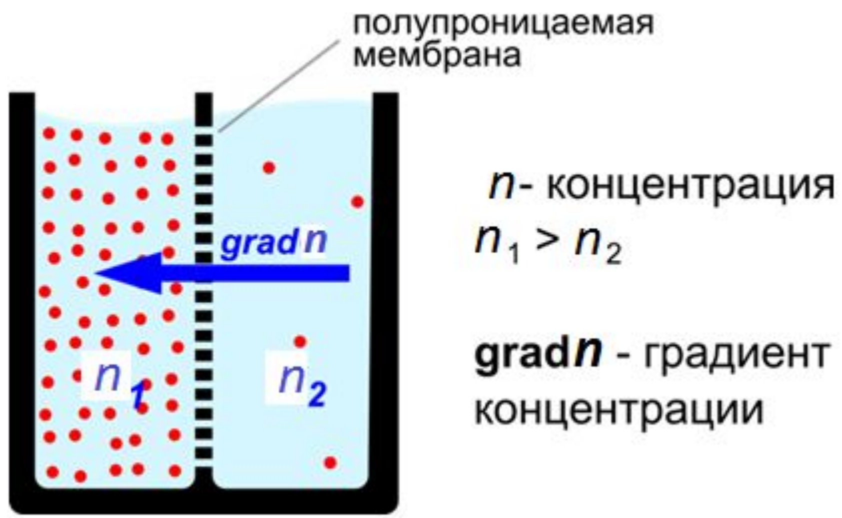
Закон Фика: $\left|\vec{j}\right| = -D \cdot \nabla n$

∇n – градиент концентрации - векторная величина, характеризующая направление и величину максимального роста концентрации какого-либо вещества в данной точке среды, [∇n]=м$^{-4}$.

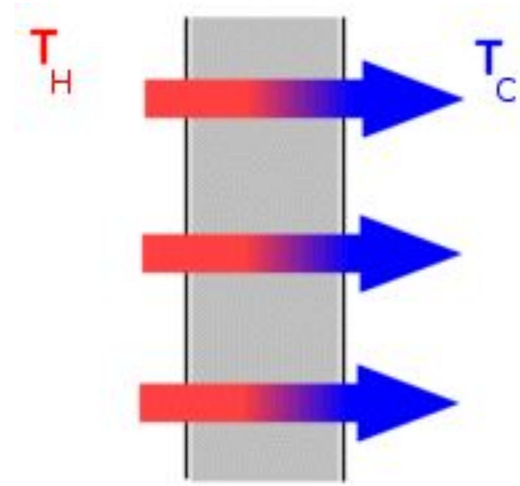
Например, если рассмотреть две области с различной концентрацией какого-либо вещества, разделенные полупроницаемой мембраной, то градиент концентрации будет направлен из области меньшей концентрации вещества в область с большей его концентрацией.

Знак «−» в законе Фика указывает на то, что направление диффузионного потока противоположно направлению градиента концентрации (направлению максимального роста концентрации).





Теплопроводность. Закон Фурье



Теплопроводность – направленный перенос теплоты от более нагретых частей тела к менее нагретым, приводящий к выравниванию их температуры.

Механизм процесса связан с беспорядочным движением молекул: молекулы из более нагретых частей тела, сталкиваясь при своем движении с молекулами соседних, менее нагретых участков, передают им часть своей энергии.

Плотность теплового потока – векторная величина, совпадающая по направлению с направлением распространения теплоты и численно равная количеству теплоты, проходящему в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению теплового потока, [q]=Дж/(м$^2 \cdot$ с).

$$|\vec{q}| = \frac{Q}{St} \quad . \qquad (19.3)$$

Закон Фурье (французский ученый Жан Фурье, 1811 г.): плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры вещества.

$$\left|\vec{q}\right| = -\kappa \cdot \nabla T \quad . \qquad (19.4)$$

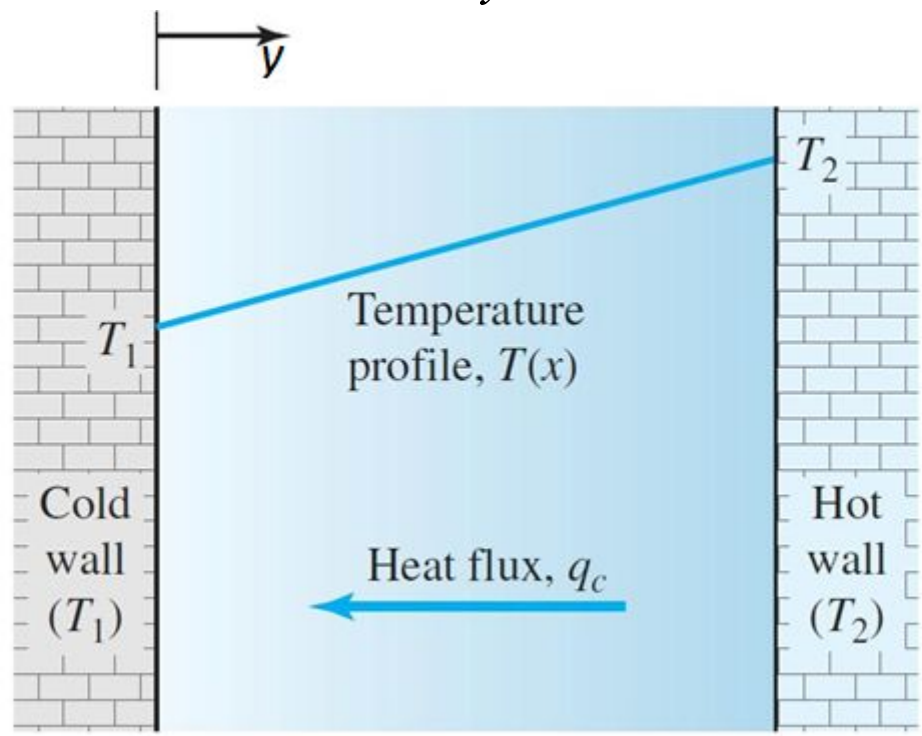
где к – коэффициент теплопроводности – величина, определяющая скорость передачи тепла от более нагретых участков тела к менее нагретым [к]=Вт/(м·К).

Одномерный случай: $T=T(y)$

$$q = -\kappa \cdot \frac{dT}{dy} \quad . \qquad (19.4a)$$

∇T – градиент температуры - векторная величина, характеризующая направление и величину максимального роста температуры, [∇T]=К/м.

Знак «−» в законе Фурье указывает на то, что направление теплового потока противоположно направлению градиента температуры (направлению максимального роста температуры).

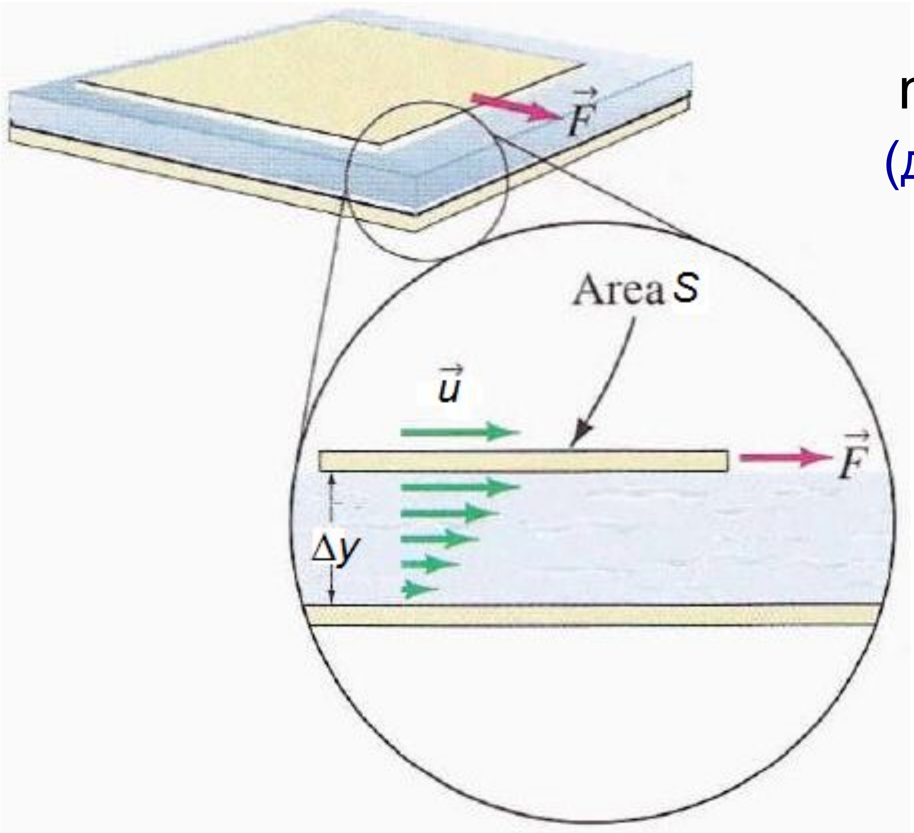


Внутреннее трение (вязкость). Закон Ньютона

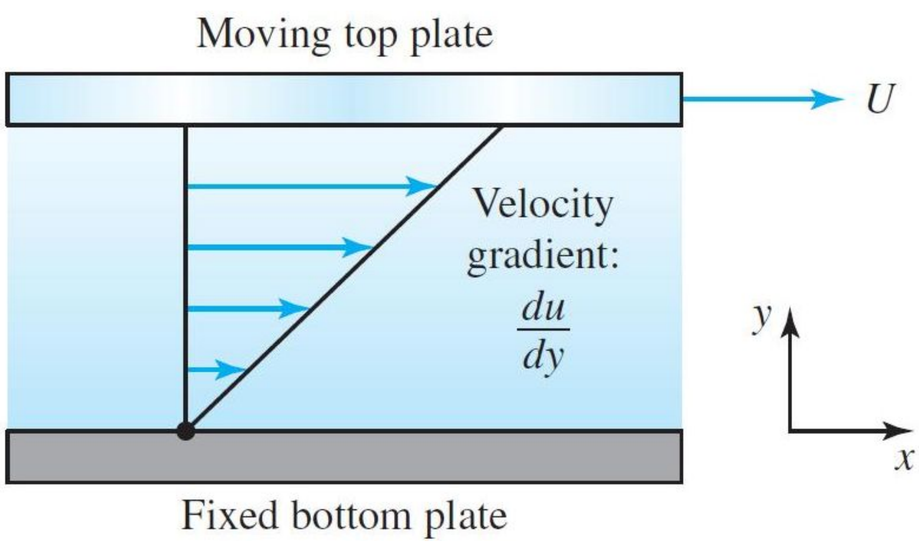
Вязкость – свойство газов и жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

Закон Ньютона (И. Ньютон, 1686 г.): сила внутреннего трения, приходящаяся не единицу площади движущихся слоев газа (жидкости), прямо пропорциональна градиенту скорости движения слоев:

$$\frac{|\vec{F}|}{S} = \eta \frac{du}{dy}, \qquad (19.5)$$

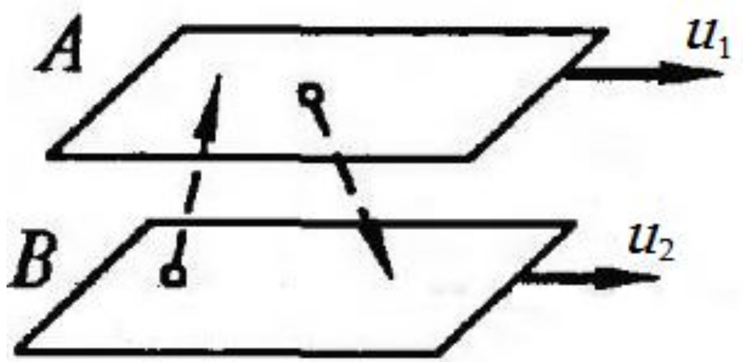


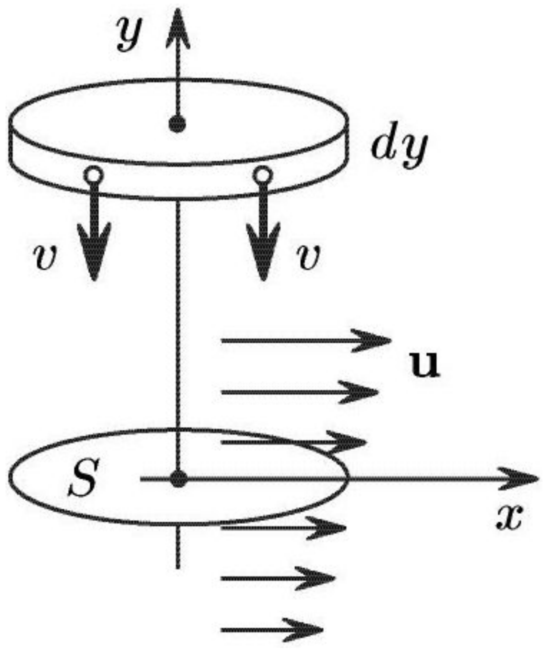
η - коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость), [η]= $м^2$/с.



Причина вязкости: наложение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями и хаотического (теплового) движения молекул.

Механизм явления: хаотическое движение молекул переносит молекулы из слоя движущегося с большей скоростью (слой *A* на рисунке) в слой, движущийся с меньшей скоростью (слой *B* на рисунке); в результате перехода молекул из одного слоя в другой и их столкновений с молекулами этого слоя происходит выравнивание скоростей упорядоченного движения: более быстрый слой замедляет движение, а более медленный слой ускоряется.





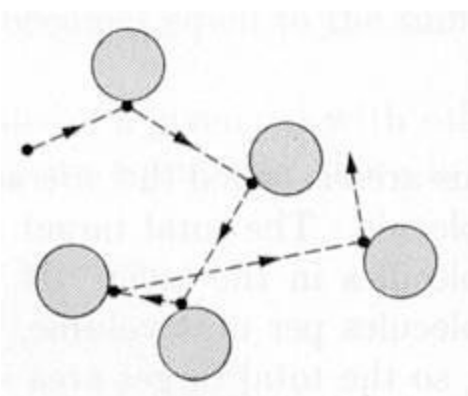
Явления переноса в газах

Кинематические характеристики молекулярного движения

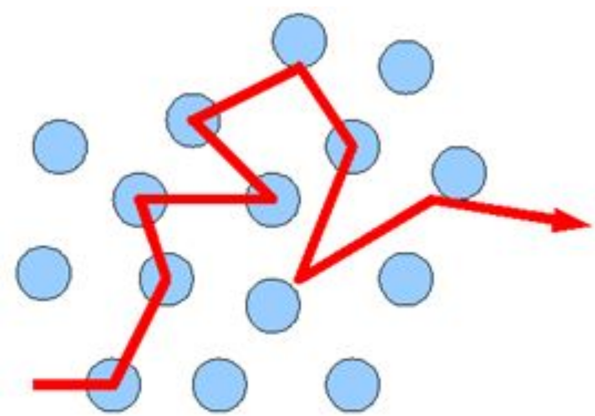
При движении в газе молекула испытывает столкновения, в результате чего она изменяет направление своего движения. Для описания движения молекул в газе вводят следующие кинематические характеристики:

1) средняя длина свободного пробега, $\langle\lambda\rangle$ – среднее расстояние, которое проходит молекула между двкмя последовательными столкновениями;

2) средняя частота столкновений, $\langle f\rangle$ - среднее число столкновений молекулы за единицу времени.



Molecular free paths

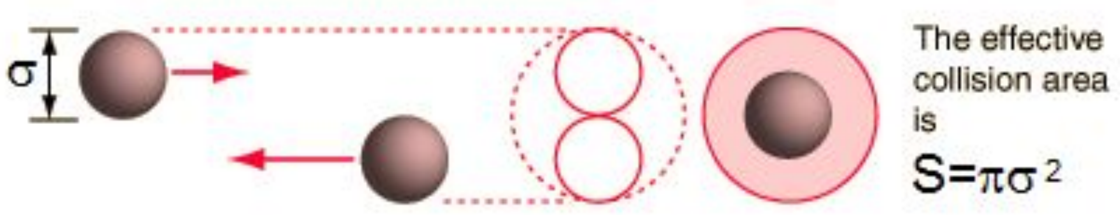


Формулы расчета кинематических характеристик молекулярного движения

1) средняя частота столкновений

$$\langle f \rangle = \sqrt{2}\pi\sigma^2 n\langle v \rangle, \qquad (19.6)$$

где σ - эффективное сечение молекулы (Рудольф Клаузиус, 1859 г.) – минимальное расстояние, на которое могут сблизиться центры двух сталкивающихся молекул. Множитель √2 учитывает движение встречных молекул.



2) средняя длина свободного пробега молекулы

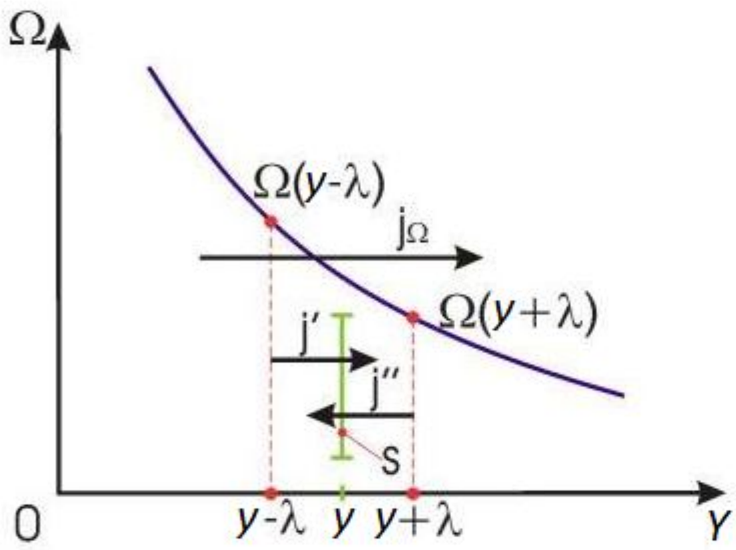
$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle f \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n}. \qquad (19.7)$$

Общее уравнение переноса в газах

Пусть величина Ω характеризует некоторое молекулярное свойство, отнесенное к одной молекуле. Этим свойством может быть концентрация, энергия, импульс и т.д. В равновесном состоянии Ω постоянна по объему. При наличии градиента Ω имеет место движение величины Ω в направлении ее уменьшения.

Пусть ось OY направлена вдоль градиента Ω. Тогда по аналогии с уравнениями (19.2a), (19.4a) и (19.5) поток величины Ω в положительном направлении оси OY:

$$j_\Omega = -b\frac{d\Omega}{dy} \qquad (19.8)$$



В газах коэффициент пропорциональности b зависит от трех величин: n_0, $\langle v \rangle$ и $\langle \lambda \rangle$. Причем, очевидно, что с ростом этих величин будет расти коэффициент пропорциональности b, т.е.

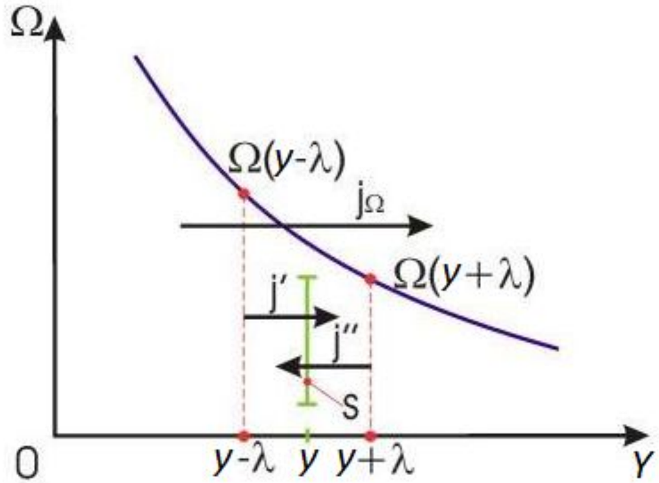
$$b = \frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \quad , \qquad (19.9)$$

где коэффициент $^1/_3$ входит потому, что рассматривается поток лишь в одном из трех взаимно перпендикулярных направлений.

Объединяя уравнения (19.8) и (19.9), получаем общее уравнение переноса в газах:

$$j_\Omega = -\frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \frac{d\Omega}{dy} \quad , \qquad (19.10)$$

где n_0 - равновесная концентрация молекул газа.



Самодиффузия

Переносимая величина – концентрация молекул; поскольку в уравнении (19.10) Ω - характеристика переносимой величины, отнесенная к одной молекуле, то в случае самодиффузии

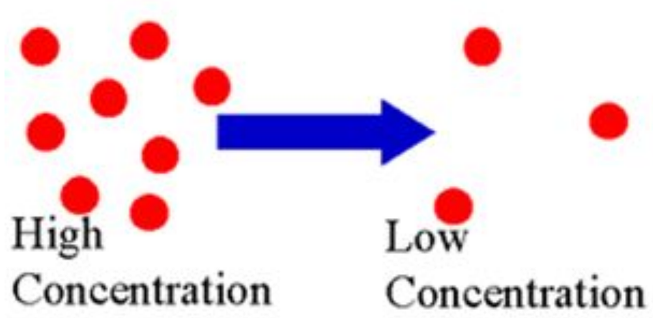
$$\Omega(y) = n(y)/n_0 \quad . \tag{19.11}$$

Подставляя формулу (19.11) в уравнение (19.10), имеем

$$j_\Omega = -\frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \frac{d}{dy}\left[\frac{n(y)}{n_0}\right] = -\frac{1}{3}\langle v \rangle \langle \lambda \rangle \frac{dn}{dy} \overset{(19.2a)}{=} -D\frac{dn}{dy} \quad ,$$

откуда коэффициент диффузии газа

$$D = \frac{1}{3}\langle v \rangle \langle \lambda \rangle \quad . \tag{19.12}$$



Теплопроводность

Переносимая величина – энергия теплового движения молекул, поэтому при теплопроводности Ω - средняя энергия теплового движения молекулы:

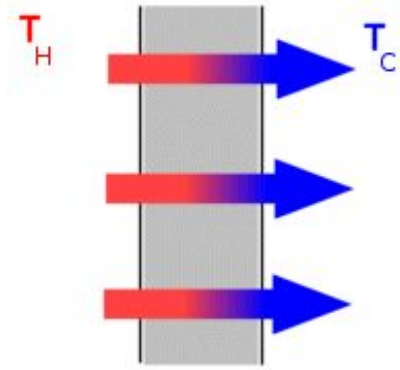
$$\Omega(y)=\langle\varepsilon(y)\rangle=\frac{i}{2}kT(y)=\frac{i}{2}\frac{kN_A}{N_A}T(y)=\frac{i}{2}\frac{R}{\mu}\frac{\mu}{N_A}T(y)=c_V m_m T(y) \qquad (19.13)$$

Подставляя формулу (19.13) в уравнение (19.10), имеем

$$j_\Omega=-\frac{1}{3}n_0\langle v\rangle\langle\lambda\rangle\frac{d}{dy}\left[c_V m_m T(y)\right]=-\frac{1}{3}\rho\langle v\rangle\langle\lambda\rangle c_V\frac{dT}{dy}\overset{(19.4a)}{=}-\kappa\frac{dT}{dy},$$

откуда коэффициент теплопроводности газа

$$\kappa=\frac{1}{3}\rho\langle v\rangle\langle\lambda\rangle c_V. \qquad (19.14)$$



Внутреннее трение (вязкость)

Переносимая величина Ω – импульс упорядоченного движения молекулы:

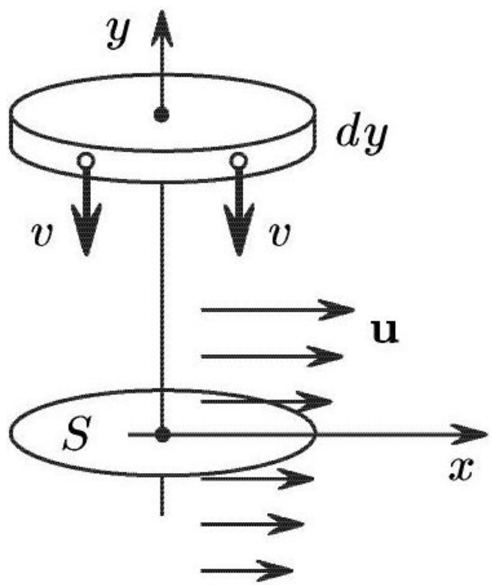
$$\Omega(y) = m_{\mathrm{m}} u(y) \quad . \qquad (19.15)$$

Внимание: u – скорость упорядоченного движения молекулы;
v – скорость хаотического (теплового) движения молекулы.

Подставляя формулу (19.15) в уравнение (19.10), имеем

$$j_{\Omega} = -\frac{1}{3} n_0 \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \frac{d}{dy}\left[m_m u(y)\right] = -\frac{1}{3}\rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \frac{du}{dy} \overset{(19.5)}{=} -\eta \frac{du}{dy} \quad ,$$

откуда коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость) газа



$$\eta = \frac{1}{3}\rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \quad . \qquad (19.16)$$

Зависимость коэффициентов от макропараметров идеального газа:

$$D \sim T^{3/2} / p, \quad \kappa \sim \sqrt{T}, \quad \eta \sim \sqrt{T} \quad . \qquad (19.17)$$