

# Лекция 19

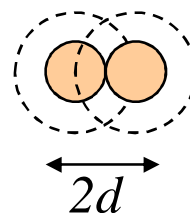
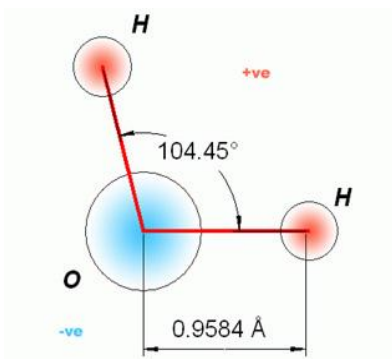
***Средняя длина свободного пробега.***

***Явления переноса.***

***Теплопроводность,  
диффузия, вязкость.***

# Средняя длина свободного пробега

Средняя длина свободного пробега — это среднее расстояние, которое молекула пролетает от одного столкновения до другого.



Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется эффективным диаметром молекулы.

# Средняя длина свободного пробега

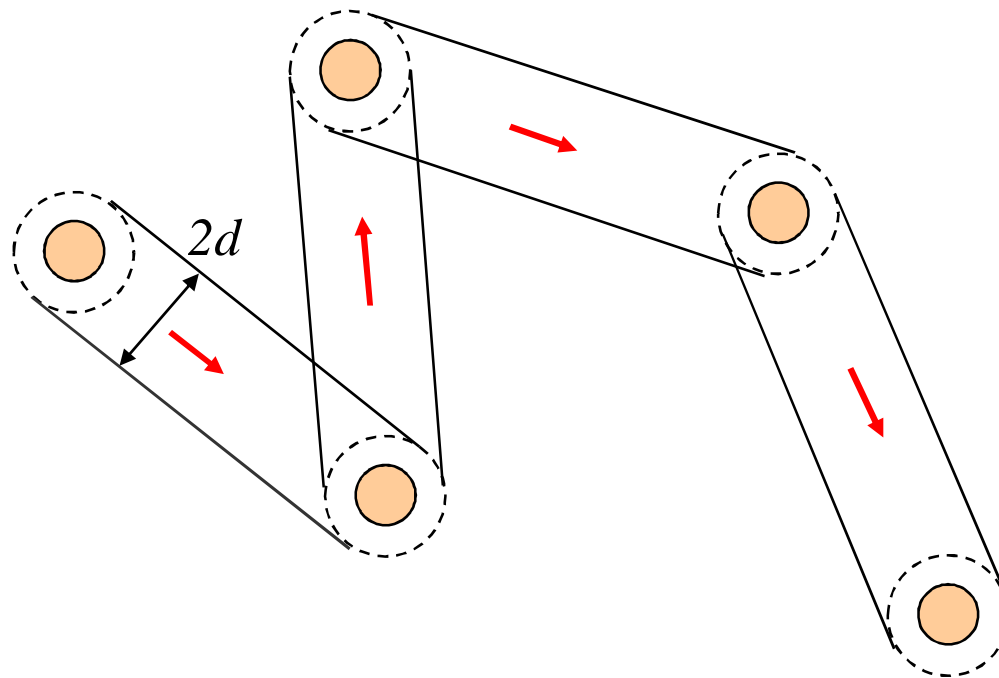
$$Z = nV$$

$$V = \pi d^2 v_{\Delta t}$$

$$z = Z / \Delta t$$

$$\langle l \rangle = v_{\Delta t} / Z$$

$$\langle l \rangle = (\pi d^2 n)^{-1}$$



$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}$$

Вакуум

$$\langle l \rangle > L$$

## *Явления переноса*

Явления переноса – необратимые процессы в термодинамически неравновесных системах, в результате которых происходит пространственный перенос энергии, массы или импульса.

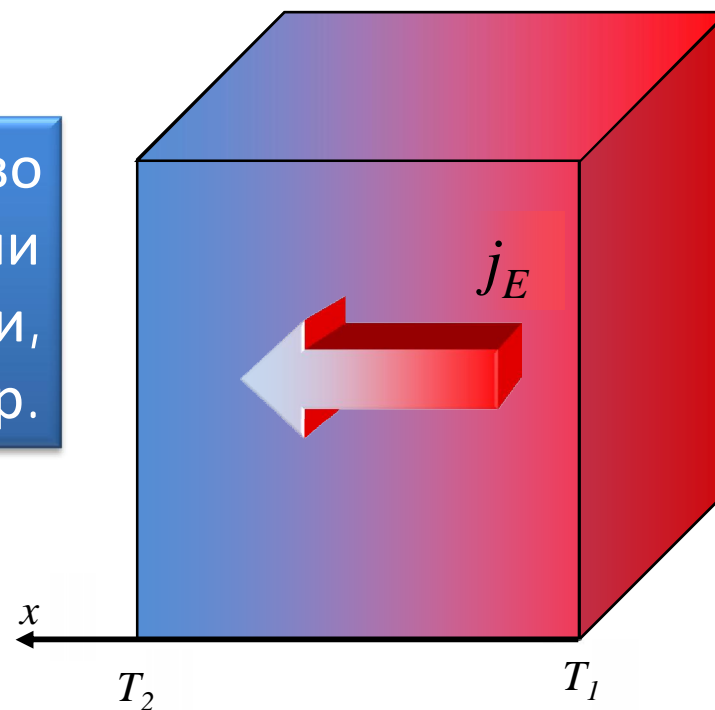
*В том числе:*

- ✓ теплопроводность,*
- ✓ диффузия,*
- ✓ внутреннее трение (вязкость).*

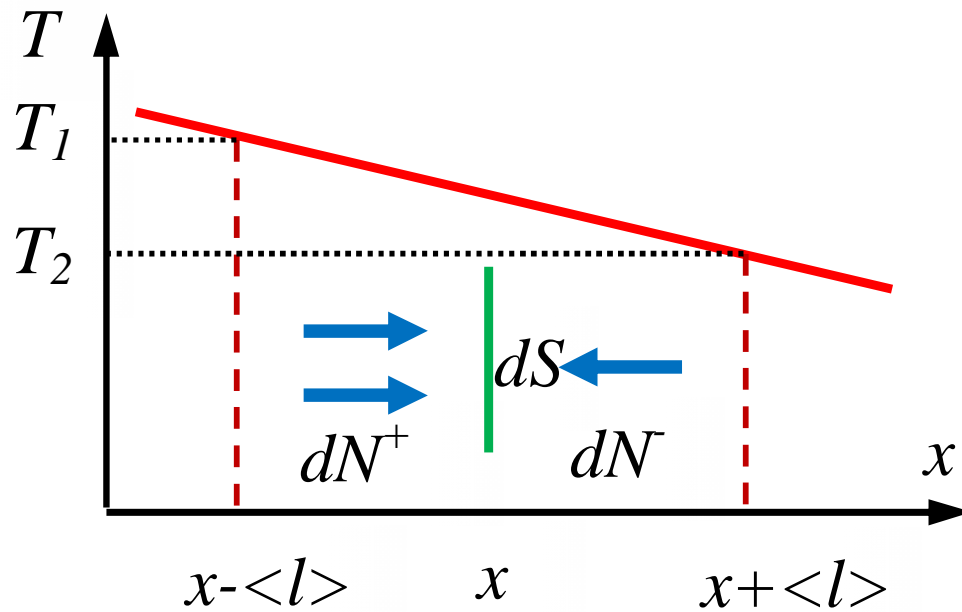
# Теплопроводность

Плотность теплового потока – количество энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной градиенту температур.

$$j_E = \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta S}$$



**Теплопроводность** – процесс переноса теплоты от более нагретых частей тела к менее нагретым частям, осуществляемый хаотически движущимися атомами и молекулами.



$$\langle V \rangle \approx const$$

$$n \approx const$$

Число молекул прилетающих слева

$$dN^+ = \frac{1}{6} n \langle V \rangle dS dt$$

Каждая молекула несет энергию

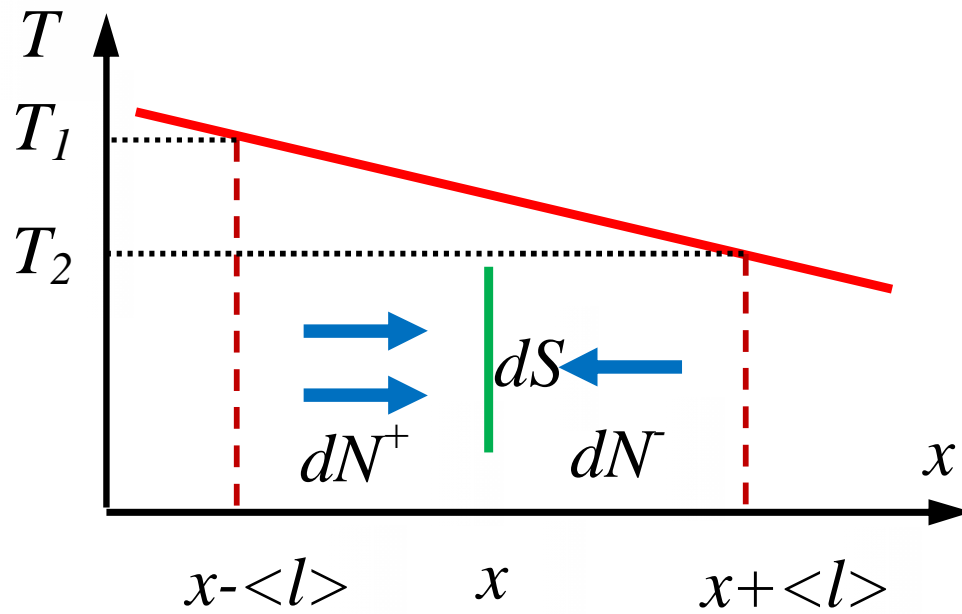
$$U_1 = \frac{i}{2} k T_1$$

Число молекул прилетающих справа

$$dN^- = \frac{1}{6} n \langle V \rangle dS dt$$

Каждая молекула несет энергию

$$U_2 = \frac{i}{2} k T_2$$



$$dQ^+ = U_1 dN^+$$

$$dQ^- = U_2 dN^-$$

$$dQ = dQ^+ - dQ^- = \frac{1}{6} n \langle V \rangle dS dt \frac{i}{2} k (T_1 - T_2)$$

$$dT = T_2 - T_1 \qquad dx = 2 \langle l \rangle$$

$$dQ = -\frac{1}{6} n \langle V \rangle \frac{i}{2} k 2 \langle l \rangle \frac{dT}{dx} dS dt$$

# Закон Фурье

$$j_E = \frac{dQ}{dSdt} = -\frac{1}{6} n \langle V \rangle \frac{i}{2} k^2 \langle l \rangle \frac{dT}{dx}$$

Закон Фурье: плотность потока энергии, передающейся посредством теплопроводности, пропорциональна градиенту температуры.

$$j_E = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

Минус показывает, что тепловой поток направлен противоположно градиенту.

$$\lambda = \frac{1}{3} n \langle V \rangle \langle l \rangle \frac{i}{2} k$$

коэффициент теплопроводности



# Закон Фурье

$$\lambda = \frac{1}{3} n \langle V \rangle \langle l \rangle \frac{i}{2} k$$

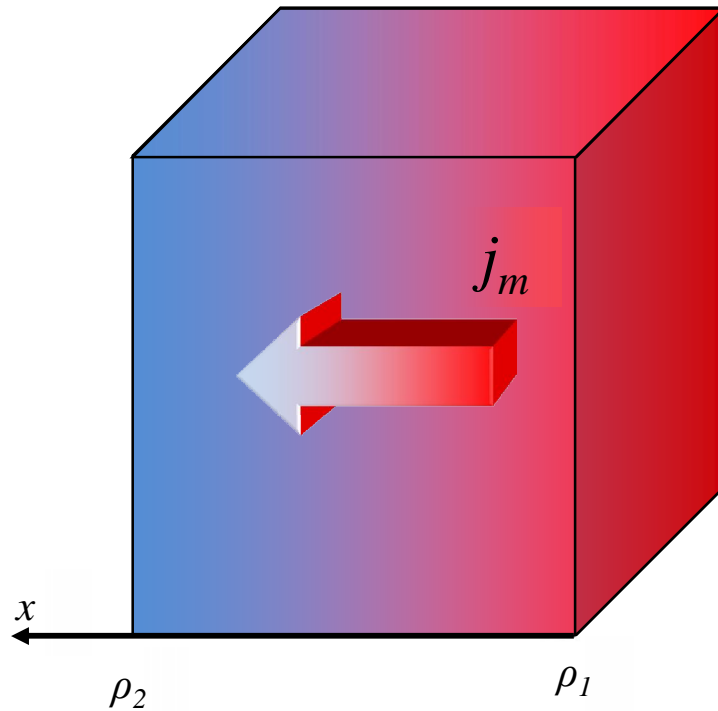
$$C_V^m = \frac{i}{2} \frac{R}{\mu}$$

$$n \frac{i}{2} k = n \frac{\mu C_V^m}{R} k = n \frac{\mu C_V^m}{N_A} = n m_a C_V^m = \rho C_V^m$$

$$\lambda = \frac{1}{3} C_V^m \rho \langle V \rangle \langle l \rangle$$

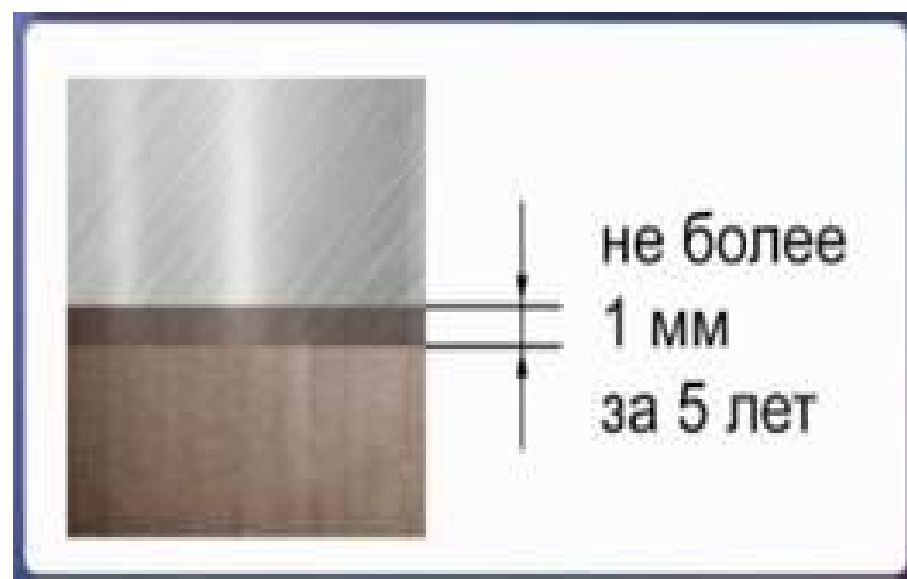
коэффициент теплопроводности

# Диффузия



Диффузия происходит в направлении уменьшения концентрации вещества и приводит к равномерному распределению вещества по занимаемому объему. Диффузия наблюдается в газах, жидкостях и твёрдых телах.

**Диффузия** – взаимное проникновение соприкасающихся веществ вследствие теплового движения молекул вещества.



Плотность потока массы (диффузионный поток) – масса, переносимая в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной градиенту плотности.

$$j_m = \frac{\Delta m}{\Delta t \Delta S}$$

*Закон Фика: плотность потока массы пропорциональна градиенту плотности.*

$$j_m = -D \frac{d\rho}{dx}$$

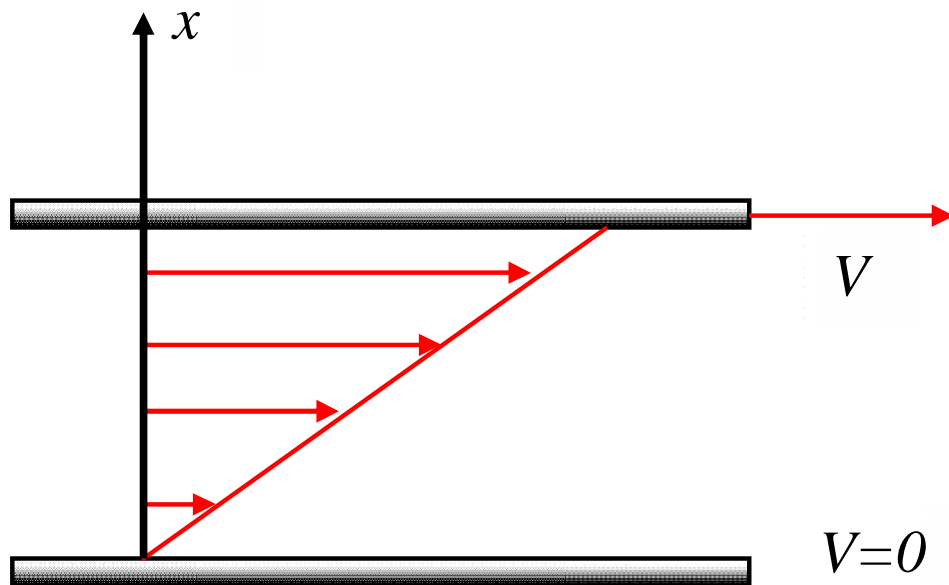
Поток направлен в сторону уменьшения концентрации.

$$D = \frac{1}{3} \langle V \rangle \langle l \rangle$$

коэффициент диффузии

## *Внутреннее трение*

*Внутреннее трение (вязкость)* – свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление перемещению одного слоя относительно другого, осуществляющееся за счет переноса импульса хаотично движущимися молекулами.



Газ расположен между двумя пластинами. Нижняя покоится, верхняя движется. Пластинка увлекает за собой прилегающий слой газа, а тот, в свою очередь, увлекает нижележащий слой. Весь газ можно разделить на тонкие слои, движущиеся с разными скоростями. Слой, прилегающий к нижней пластинке, неподвижен.

Молекулы газа, кроме того, что они движутся направленно и совместно в слое, участвуют также в тепловом хаотичном движении. Переходя из слоя в слой, они переносят импульс, связанный с направленным движением.

Микроскопически изменение импульса слоя проявляется как действие силы вязкого трения. В конечном итоге работа силы трения рассеивается в виде тепла.

Плотность потока импульса – импульс, переносимый в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной градиенту скорости

$$j_p = \frac{\Delta p}{\Delta t \Delta S} = f$$

Иначе - это сила, действующая на единицу площади поверхности, разделяющей два соседних слоя газа

*Закон Ньютона: сила трения между двумя слоями газа пропорциональна градиенту скорости.*

$$f = -\eta \frac{dV}{dx}$$

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle V \rangle \langle l \rangle$$

коэффициент динамической вязкости

Единый физический механизм рассмотренных явлений переноса приводит к единой форме уравнений, описывающих эти явления. Более того, коэффициенты в этих уравнениях взаимосвязаны.

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{3} C_V^m \rho \langle V \rangle \langle l \rangle \\ D &= \frac{1}{3} \langle V \rangle \langle l \rangle \\ \eta &= \frac{1}{3} \rho \langle V \rangle \langle l \rangle \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \lambda &= \eta C_V^m \\ \eta &= \rho D \end{aligned}$$

Явления переноса позволяют опытным путем проверить справедливость молекулярно-кинетической теории.