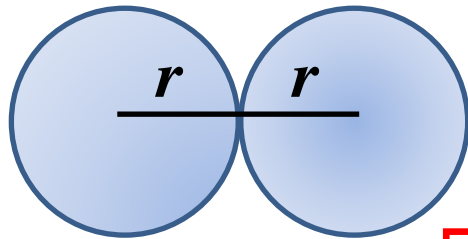


МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Средняя длина свободного пробега молекул газа

СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ГАЗА

Длина свободного пробега – это расстояние, которое проходит молекула от одного столкновения до другого.



r называется эффективным радиусом молекулы.

$$\sigma = 2r$$

эффективный диаметр молекулы

$$S = \pi r^2$$

эффективное сечение молекулы

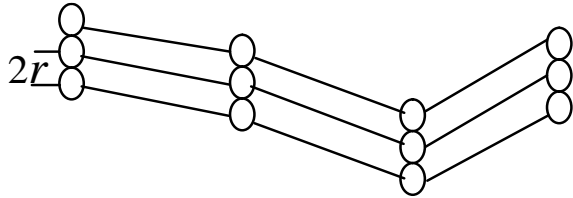
Длины свободного пробега могут быть самыми разными, но так как молекул очень много, то можно говорить о средней длине свободного пробега

$\bar{\lambda}$

средняя длина свободного пробега.

СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ГАЗА

!!!сделаем заведомо неверное предположение



Пусть движется только одна молекула, все же остальные молекулы неподвижны.

Траектория молекулы – ломаная линия из-за столкновений с другими молекулами.

$$\bar{\lambda} = \frac{l}{z}$$

l - это длина ломаного цилиндра, т.е. длина пути, пройденного молекулой за время t

z - число столкновений за время t

$$V = \pi(2r)^2 l = 4\pi r^2 l$$

$$z = 4\pi r^2 n_0 l$$

n_0 - концентрация молекул в объеме V

СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ГАЗА

Если скорости молекул распределены по закону Максвелла, то, как можно показать, средняя относительная скорость двух молекул однородного газа в $\sqrt{2}$ раз превышает среднеарифметическую скорость.

При учёте движения всех молекул расчёты дают формулу:

$$z = 4\sqrt{2}\pi r^2 n_0 l$$

$$\bar{\lambda} = \frac{l}{4\sqrt{2}\pi r^2 n_0}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{l}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n_0}$$

$$\bar{\lambda} \sim \frac{1}{n_0}$$

$$P \sim n_0$$

$$\bar{\lambda} \sim \frac{1}{P}$$

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Явление переноса в газах

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

Благодаря тепловому движению молекулы переносятся из одного места в другое.

К явлениям переноса относятся :

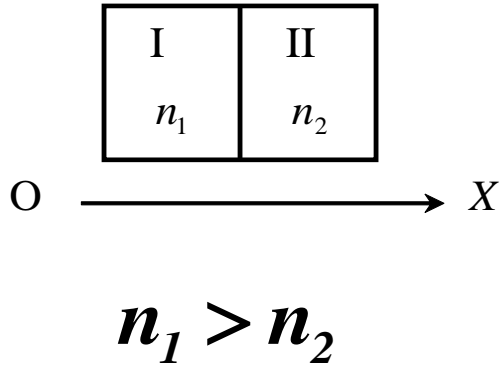
диффузия

**вязкость газа
(внутреннее трение)**

теплопроводность.

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

диффузия



В одной части сосуда находится газ с концентрацией молекул n_1

В другой части сосуда находится газ с концентрацией молекул n_2

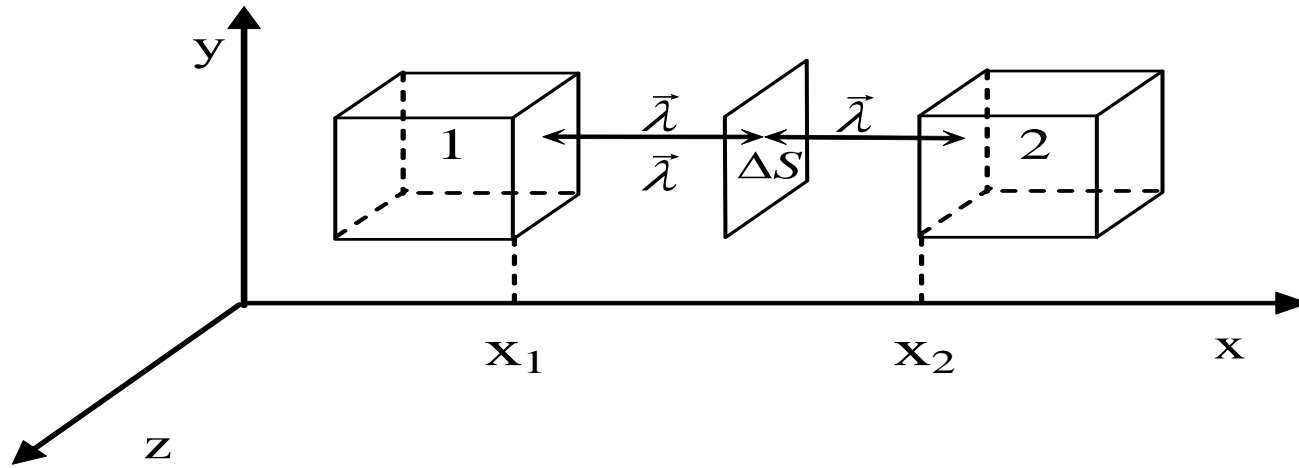
Уберём перегородку.

Произойдёт выравнивание концентраций молекул по всему объёму, или другими словами, выравнивание плотности газа во всём сосуде.

Это явление называется диффузией.

Переносимой величиной является масса газа.

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ



1. Площадь грани куба должны равняться выделенной площадке ΔS
2. Расстояние от выделенной площадки до ближайших граней кубов слева и справа должно равняться длине свободного пробега молекул данного газа.

l – длина ребра куба

N_1 - общее число молекул, находящихся в кубе 1

N_2 - общее число молекул, находящихся в кубе 2

n_{01} - концентрация молекул газа в кубе 1,

n_{02} - концентрация молекул газа в кубе 2.

$$n_{01} = \frac{N_1}{l^3}$$

$$n_{02} = \frac{N_2}{l^3}$$

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

ΔN_1 - число молекул, пролетающих за единицу времени через площадку ΔS слева направо, т.е. в направлении положительной оси ox

ΔN_2 - число молекул, пролетающих за единицу времени через площадку ΔS справа налево, т.е. в направлении отрицательной оси ox

$\frac{l}{6} N_1$ летит по направлению к площадке ΔS

$$\tau_2 - \tau_1 = \frac{l}{\bar{v}}$$

\bar{v} - средняя арифметическая скорость теплового движения молекул газа.

τ_1 момент времени, в который первая молекула из куба 1 достигла площадки ΔS

τ_2 момент времени, в который последняя молекула из куба 1 достигла площадки ΔS

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

$$\Delta N_1 = \frac{\frac{1}{6} N_1}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{1}{6} N_1 \frac{\bar{v}}{l}$$

$$N_1 = n_{01} l^3 \quad l^2 = \Delta S$$

$$\Delta N_1 = \frac{1}{6} n_{01} l^3 \frac{\bar{v}}{l} = \frac{1}{6} n_{01} \bar{v} \Delta S$$

$$\Delta N_2 = \frac{1}{6} n_{02} \bar{v} \Delta S$$

$$\Delta N = \Delta N_1 - \Delta N_2 = \frac{1}{6} (n_{01} - n_{02}) \bar{v} \Delta S$$

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

$$m \Delta N \Delta t = \frac{1}{6} (n_{01} - n_{02}) \bar{v} \Delta S m \Delta t$$

$$m \Delta N \Delta t = \Delta M$$

ΔM - это масса газа, переносимая через площадку ΔS за время Δt в результате диффузии.

$$m n_{01} = \rho_1$$

$$m n_{02} = \rho_2$$

ρ_1

- плотности газа в кубе 1 и кубе 2.

ρ_2

$$\Delta M = \frac{1}{6} (\rho_1 - \rho_2) \bar{v} \Delta S \Delta t$$

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta x} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{x_2 - x_1} = -\frac{\rho_1 - \rho_2}{2\bar{\lambda}}$$

$$\Delta M = -\frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda} \frac{\Delta \rho}{\Delta x} \Delta x \Delta t$$

$$\rho_1 - \rho_2 = -2\bar{\lambda} \frac{\Delta \rho}{\Delta x}$$

$$D = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda}$$

Коэффициент диффузии

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

ВЫВОДЫ:

$$D = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda}$$

1. $\bar{\lambda} \sim \frac{1}{p} \longrightarrow D \sim \frac{1}{p}$

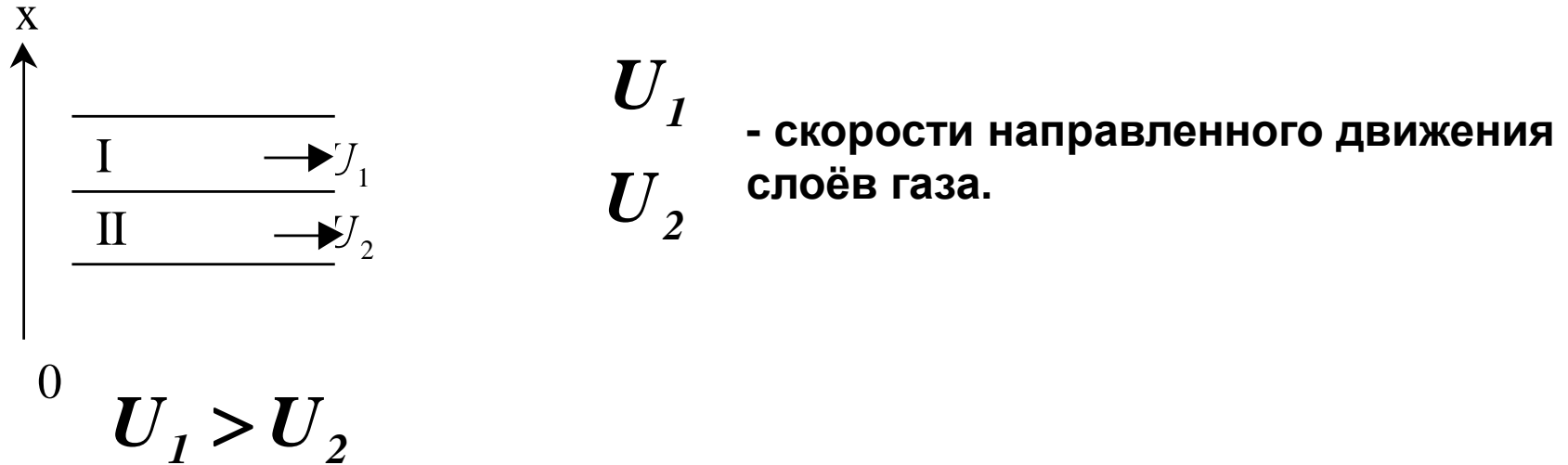
2. $\bar{v} \sim \sqrt{\frac{T}{\mu}} \longrightarrow D \sim \sqrt{T} \qquad D \sim \sqrt{\frac{1}{\mu}}$

Диффузия, происходящая в газе, состоящем из молекул одного сорта, - это **самодиффузия**.

Диффузия в смеси газов – **взаимная диффузия**.

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

Вязкость (внутреннее трение)



В результате теплового движения молекулы из слоя *I* попадают в слой *II*, и каждая молекула приносит с собой в слой *II* импульс mU_1

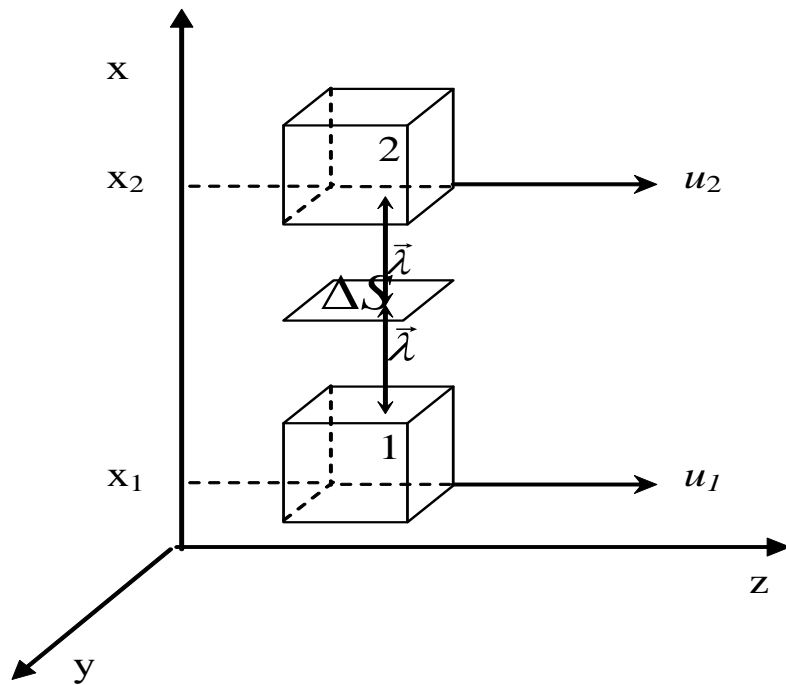
В результате в слое *II* становится больше быстрых молекул и слой *II* начинает двигаться быстрее.

И наоборот, молекулы, попадающие из слоя *II* в слой *I* и приносящие с собой импульс mU_2 , замедляют движение слоя *I*.

Скорости слоёв выравниваются друг относительно друга. **Это явление вязкости.**

Переносимой величиной является импульс.

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ



$$\Delta K = -\eta \frac{\Delta u}{\Delta x} \Delta S \Delta t$$

ΔK - это импульс, переносимый через площадку ΔS за время Δt

η - коэффициент трения

$\frac{\Delta u}{\Delta x}$ - градиент скорости направленного движения молекул.

Δn_1 - число молекул из слоя 1, пролетающих за единицу времени через площадку ΔS .

Δn_2 - число молекул из слоя 2, пролетающих за единицу времени через площадку ΔS .

$$\Delta n_1 = \frac{\frac{1}{6} n_1}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{1}{6} n_0 \bar{v} \Delta S$$

$$\Delta n_2 = \frac{\frac{1}{6} n_2}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{1}{6} n_0 \bar{v} \Delta S$$

$$n_1 = n_2$$

\bar{v} - средняя скорость теплового движения молекул газа.

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

За время Δt число Δn_1 молекул газа перенесет с собой из слоя 1 через площадку ΔS импульс:

$$\Delta K_1 = \Delta n_1 m u_1 \Delta t = \frac{1}{6} n_0 \bar{v} \Delta S m u_1 \Delta t$$

где m - масса одной молекулы газа.

$$\Delta K_2 = \Delta n_2 m u_2 \Delta t = \frac{1}{6} n_0 \bar{v} \Delta S m u_2 \Delta t$$

$$\rho = n_0 m$$

$$\Delta K = \frac{1}{6} \rho \bar{v} (u_1 - u_2) \Delta S \Delta t$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{u_2 - u_1}{x_2 - x_1} = -\frac{u_1 - u_2}{2\bar{\lambda}}$$

$$u_1 - u_2 = -2\bar{\lambda} \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

$$\Delta K = -\frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda} \rho \frac{\Delta u}{\Delta x} \Delta S \Delta t$$

$$\eta = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda} \rho$$

Коэффициент внутреннего трения
(или коэффициент вязкости)

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

ВЫВОДЫ:

$$\eta = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda} \rho$$

$$1. \quad \bar{v} \sim \sqrt{T} \quad \longrightarrow \quad \eta \sim \sqrt{T}$$

$$2. \quad \begin{array}{l} \bar{\lambda} \sim \frac{1}{p} \\ \rho \sim p \end{array} \quad \longrightarrow \quad \bar{\lambda} \times \rho \quad \text{не зависит от давления газа}$$

Внутреннее трение (или вязкость) газа не зависит от давления газа.

3. Найдем силу F внутреннего трения.

F – это сила, с которой один слой газа действует на другой. F действует по касательной к слою.

Согласно второму закону Ньютона: $\Delta K = F \Delta t$

$$-\eta \frac{\Delta u}{\Delta x} \Delta S \Delta t = F \Delta t$$

$$F = -\eta \frac{\Delta u}{\Delta x} \Delta S$$

сила внутреннего трения

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

Теплопроводность.

Это процесс выравнивания температур, связанный с переносом тепла из более горячей области в более холодную.

$$E_k \sim T$$

Переносимой величиной в этом явлении является энергия.

Количество теплоты перенесённое в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к оси, выражается формулой :

$$\Delta Q = - \alpha \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$ - градиент температуры

α - коэффициент теплопроводности

C_v - удельная теплопроводность газа при постоянном объёме.

$$\alpha = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda} \rho c_v \quad \eta$$

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

Перечисленные три явления переноса имеют много общего:

1. причина всех трёх явлений одинакова, а именно хаотическое движение молекул газа;
2. механизм всех трёх явлений одинаков и заключается в переносе той или иной величины;
3. все три процесса необратимы. Например, в результате теплового движения молекул не может восстановиться неравенство температур различных частей газа.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Ультраразреженные газы

УЛЬТРАРАЗРЕЖЕННЫЕ ГАЗЫ

Газ считается ультраразреженным, если длина свободного пробега его молекул больше линейных размеров сосуда, в котором находится этот газ.

Иными словами, в сосуде будет вакуум.

Явления переноса **неприменимы** к газам, находящимся в состоянии ультраразрежения.

Нельзя говорить о вязкости (внутреннем трении) газа, так как в таком газе не могут возникнуть слои из молекул, обменивающихся скоростями.

Нельзя говорить о теплопроводности между частями газа; если молекулы не сталкиваются друг с другом, значит, они не обмениваются кинетическими энергиями, значит и теплообмена нет.