

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

**Явление переноса в газах**

## **ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ**

**Благодаря тепловому движению молекулы переносятся из одного места в другое.**

**К явлениям переноса относятся :**

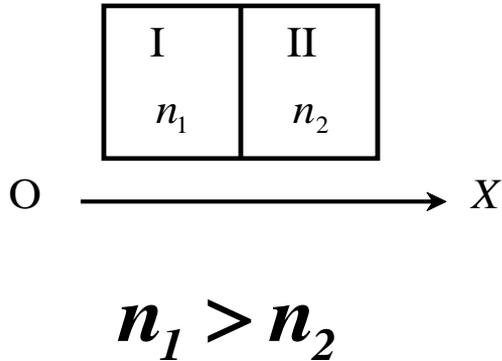
**диффузия**

**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  $n_2$

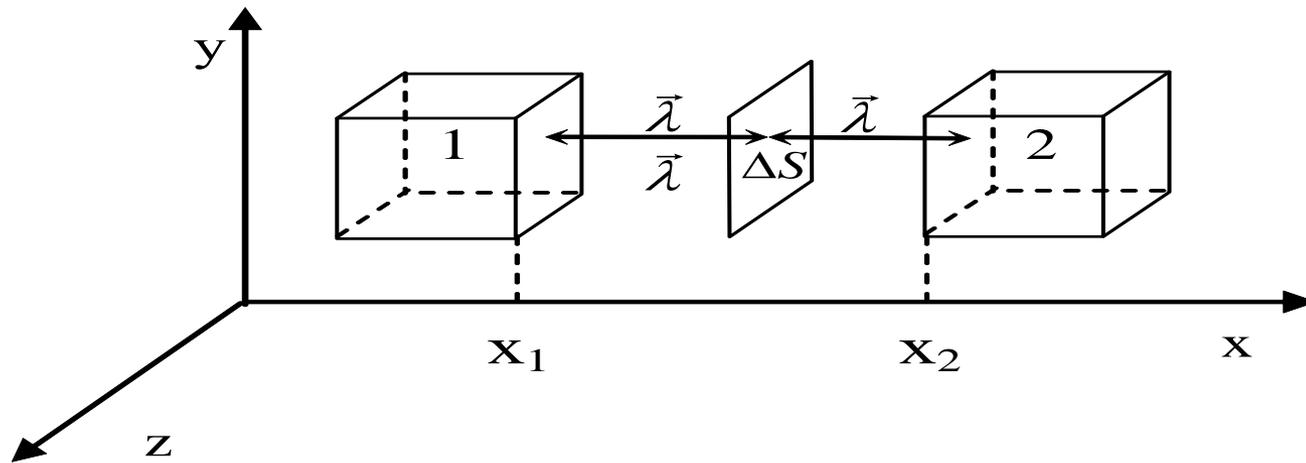
Уберём перегородку.

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  $\Delta S$
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

$\Delta N_1$  - число молекул, пролетающих за единицу времени через площадку  $\Delta S$  слева направо, т.е. в направлении положительной оси  $ox$

$\Delta N_2$  - число молекул, пролетающих за единицу времени через площадку  $\Delta S$  справа налево, т.е. в направлении отрицательной оси  $ox$

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

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

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

$\tau_1$  момент времени, в который первая молекула из куба 1 достигла площадки  $\Delta S$

$\tau_2$  момент времени, в который последняя молекула из куба 1 достигла площадки  $\Delta S$

## 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

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

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

$\Delta M$  - это масса газа, переносимая через площадку  $\Delta S$  за время  $\Delta t$  в результате диффузии.

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

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

$\rho_1$

- плотности газа в кубе 1 и кубе 2.

$\rho_2$

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

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

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

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

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

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

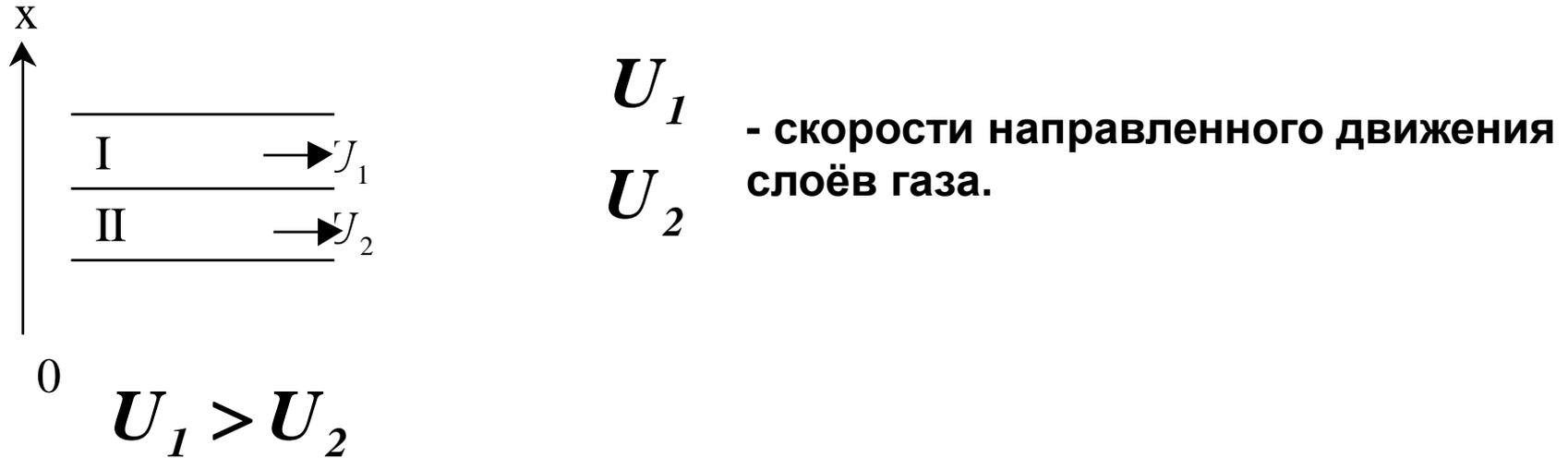
---

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  $mU_1$

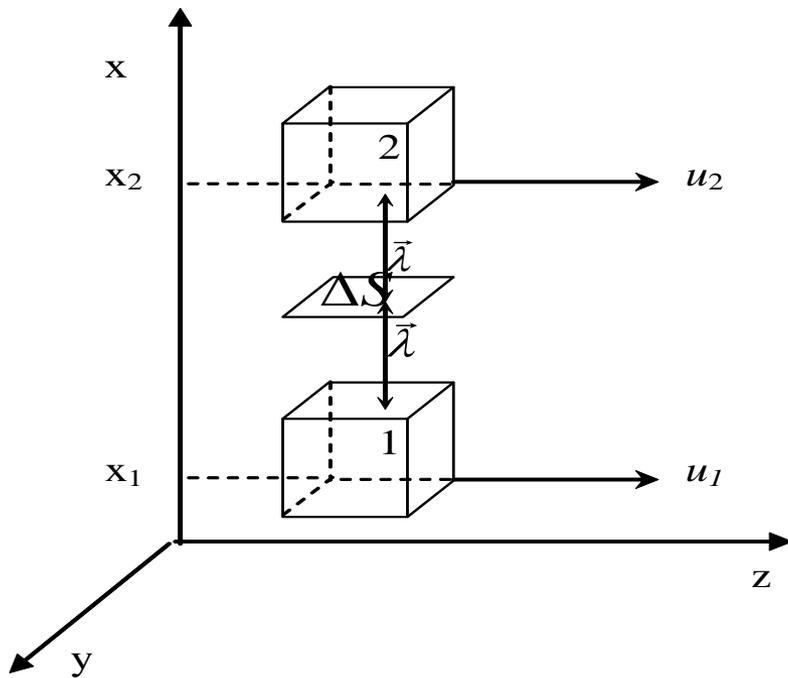
В результате в слое *II* становится больше быстрых молекул и слой *II* начинает двигаться быстрее.

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



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

$\Delta K$  - это импульс, переносимый через площадку  $\Delta S$  за время  $\Delta t$

$\eta$  - коэффициент трения

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

$\Delta n_1$  - число молекул из слоя 1, пролетающих за единицу времени через площадку  $\Delta S$ .

$\Delta n_2$  - число молекул из слоя 2, пролетающих за единицу времени через площадку  $\Delta S$ .

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

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

$$n_1 = n_2$$

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

## ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА В ГАЗАХ

За время  $\Delta t$  число  $\Delta n_1$  молекул газа перенесет с собой из слоя 1 через площадку  $\Delta S$  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

$\alpha$  - 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**

## УЛЬТРАРАЗРЯЖЕННЫЕ 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.