



Раздел 3: Статистическая физика и термодинамика

Тема 10. Молекулярно-кинетическая теория газов

Тема 11. Феноменологическая термодинамика

Тема 12. Элементы физической кинетики

Тема 12. Элементы физической кинетики



1. Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул.
2. Явления переноса в газах.

1 учебный вопрос: Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул.



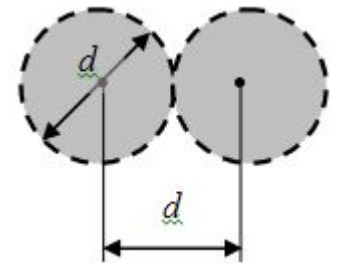
Статистическая физика имеет дело с равновесными состояниями и обратимыми процессами. Раздел, изучающий процессы, возникающие при нарушении равновесия, называется *физическая кинетика*. Она имеет дело с необратимыми процессами. Мы будем рассматривать небольшие отклонения от равновесия, при которых возникают потоки тепла, массы и импульса - *явления переноса*: внутреннее трение (вязкость), теплопроводность и диффузия.

Средней длиной свободного пробега молекул $\langle l \rangle$

называется путь, который проходит молекула между двумя последовательными столкновениями с другими молекулами.

Эффективным диаметром молекулы d называют то наименьшее расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул.

Эффективное сечение молекулы $\sigma = \pi d^2$



Средняя скорость движения молекулы $\langle v \rangle$ равна среднему пути, проходимому молекулой за единицу времени.

Среднее число столкновений молекул в единицу времени $\langle z \rangle$

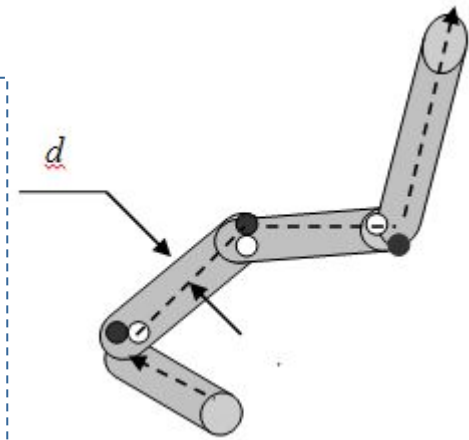
$$\langle z \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle l \rangle} \quad (1)$$

Подсчитаем $\langle z \rangle$:

- a) молекулы – упругие шарики диаметром d ;*
- b) все молекулы, кроме рассматриваемой, неподвижны.*

За единицу времени молекула столкнется со всеми молекулами, лежащими внутри коленчатого цилиндра диаметром $2d$ и длиной v :

$$v: \quad \langle z \rangle = \pi d^2 n v$$



Движение остальных молекул учитывается коэффициентом $\sqrt{2}$:

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n v \quad (2)$$

Средняя длина свободного пробега молекул:

$$(1) \Rightarrow \quad \langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma n} \quad (3)$$

$$n = p/kT \Rightarrow \quad \langle l \rangle = \frac{k T}{\sqrt{2} \pi d^2 p} = \frac{k T}{\sqrt{2} \sigma p} \quad (4)$$

*Состояние газа, при котором больше размеров сосуда или равна им, называется **вакуумом**.*

В состоянии вакуума между молекулами газа практически отсутствуют столкновения, хотя концентрация молекул при этом весьма значительна (при $p = 10^{-3}$ мм рт. ст. $n \cong 10^{19} \text{ м}^{-3}$).

2 учебный вопрос: Явления переноса в газах



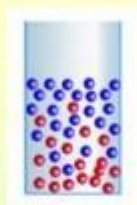
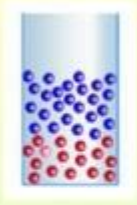
Явлениями переноса называются процессы выравнивания массы, импульса, энергии, электрического заряда и т. д.

К явлениям переноса относятся

- **диффузия** (обусловленная переносом массы);
- **теплопроводность** (обусловленная переносом энергии);
- **внутреннее трение или вязкость** (обусловленная переносом импульса).

Диффузия в газе – это процесс перемешивания молекул, сопровождающийся переносом массы из мест с большей концентрацией (плотностью) данных молекул в места с меньшей концентрацией этих молекул.

Диффузия-явление проникновения частиц одного вещества между частицами другого



В процессе диффузии переносится масса, изменяющейся величиной является плотность газа ρ .

*Явление диффузии для химически однородного газа подчиняется **закону Фика**:*

$$J_{mx} = -D \frac{d\rho}{dx} \quad (5)$$



$$J_m = \frac{d^2m}{dS_{\perp} dt}, \quad \left[\frac{\hat{e} \tilde{a}}{i^2 \tilde{n}} \right] \text{ – плотность потока массы в направлении } x;$$



D – коэффициент диффузии, [м²/с];

dρ/dx – градиент плотности, [кг/м⁴],

изменение плотности на единицу длины x в направлении x

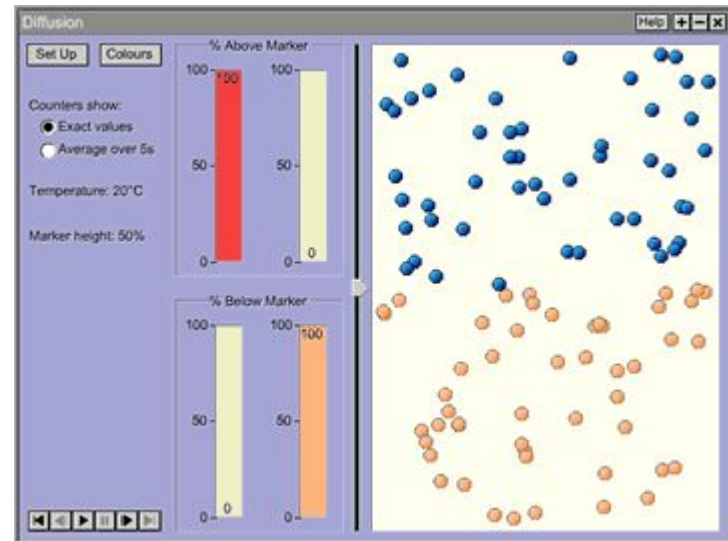
$$J_m = -D \cdot grad(\rho)$$



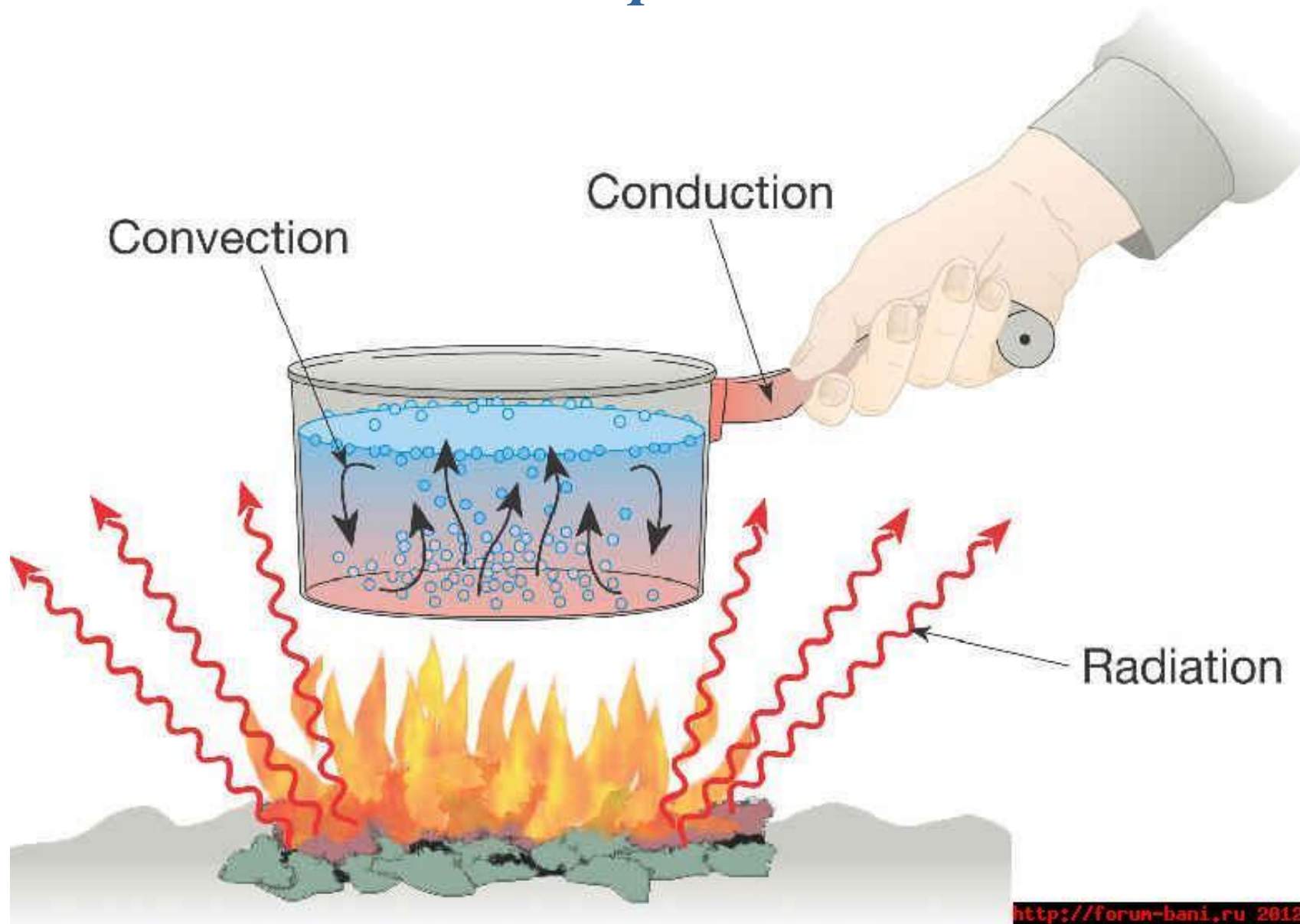
Согласно кинетической теории газов

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

(6)



Теплопередача



Теплопроводность – это процесс выравнивания температуры газа, сопровождающийся направленным переносом тепла из более нагретых мест в менее нагретые.

Перенос энергии в форме теплоты подчиняется **закону Фурье:**

$$J_{Ex} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

$$J_E = \frac{d^2 E}{dS_{\perp} dt} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{с}} \rightarrow \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right] \text{ – плотность теплового потока}$$

λ – коэффициент теплопроводности [Вт/м · К]

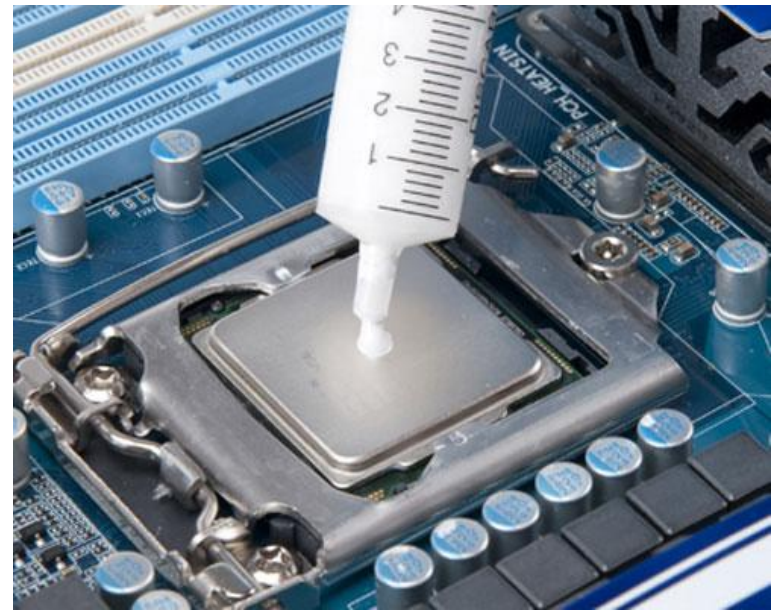
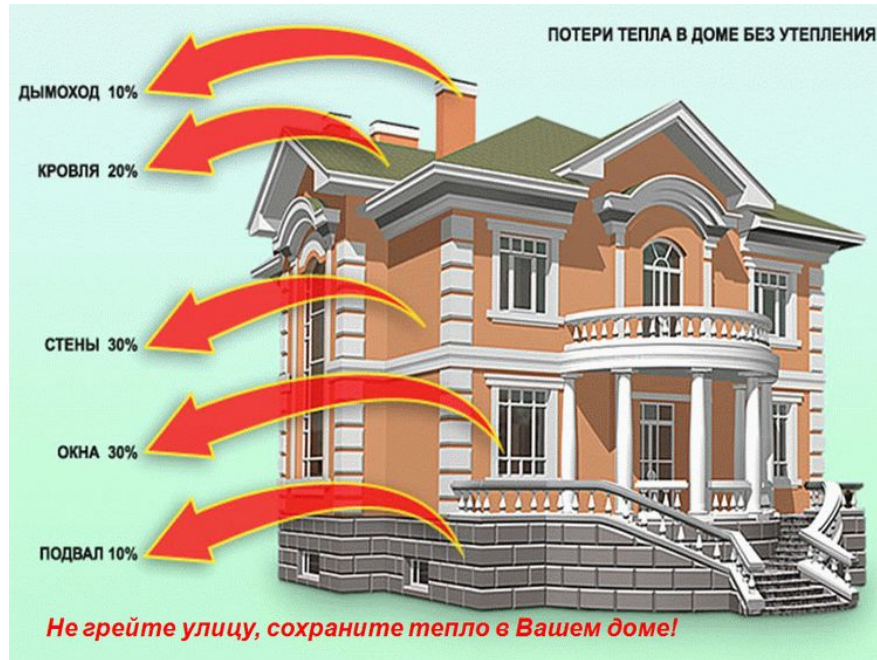
dT/dx – градиент температуры [К/м]

$$J_E = -\lambda \cdot \text{grad}(T)$$

Согласно кинетической теории газов

$$\lambda = \frac{1}{3} c_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle \quad (8)$$

где c_V , Дж/(кг · К) – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме;



Внутреннее трение (вязкость) – это возникновение сил трения между слоями газа или жидкости, перемещающимися параллельно друг другу с различными скоростями.



Перенос импульса из более быстрых слоев в более медленные в направлении, перпендикулярном направлению движения слоев газа.

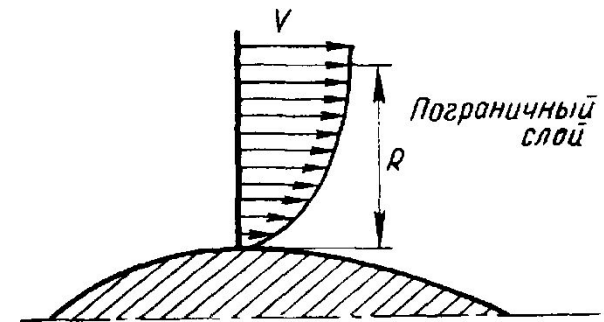
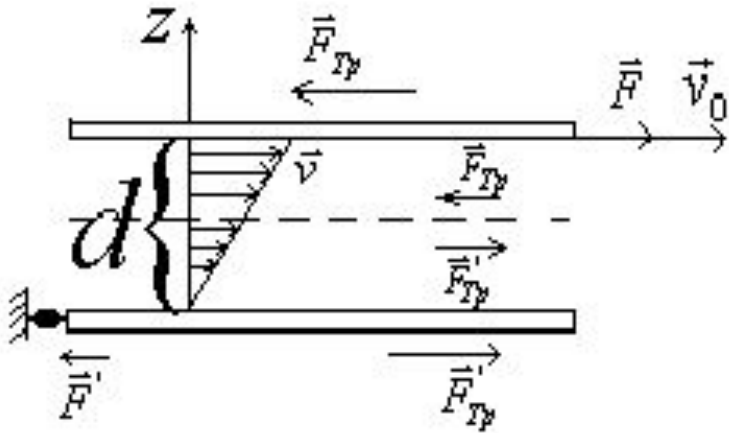
Сила внутреннего трения описывается **законом Ньютона**:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S \quad (9)$$

где η – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

dv/dz – градиент скорости в направлении перпендикулярном направлению движения слоев

S – площадь, на которую действует сила F .



Закон Ньютона можно представить в виде

$$J_p = -\eta \frac{dv}{dz} \quad (10)$$

$$J_p = \frac{mv}{dS_{\perp} dt} \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}} \rightarrow \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \rightarrow \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{с}^2} \rightarrow \text{Па} \right]$$

плотность потока импульса – величина, определяемая полным импульсом, переносимым в единицу времени в положительном направлении оси x через единичную площадку, перпендикулярную этой оси;

Динамическая вязкость η численно равна плотности потока импульса при единичном градиенте скорости. Она вычисляется по формуле

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \rho \langle l \rangle \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{1}{3} c_v \rho \langle v \rangle \langle l \rangle$$

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

$$\eta = \rho D$$

$$\lambda = \eta c_v$$

(12)

По D, η, λ можно вычислить длину свободного пробега и диаметр молекул.