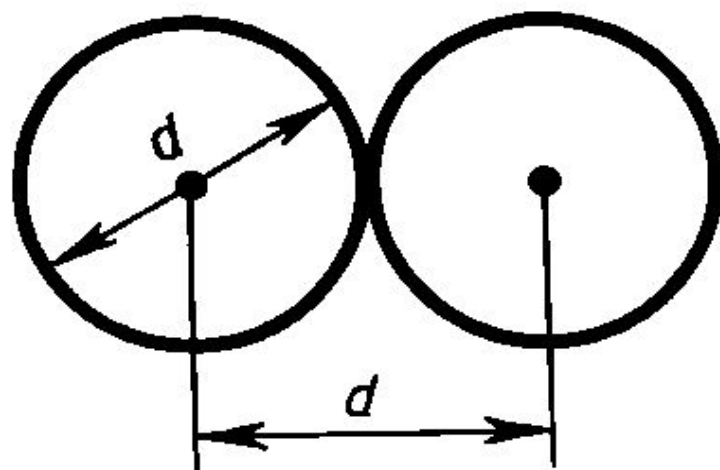


# Явления переноса

## **Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул**

Молекулы газа, находясь в состоянии хаотического движения, непрерывно сталкиваются друг с другом. Между двумя последовательными столкновениями молекулы проходят некоторый путь  $l$ , который называется **длиной свободного пробега**.

$$\langle l \rangle = \langle v \rangle / \langle z \rangle.$$



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

Расчеты показывают, что при учете движения других молекул

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle.$$

Тогда средняя длина свободного пробега

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

# Эффективный диаметр молекул

<i>Газ</i>	азот	водород	воздух	кислород
<i>d</i>	0,38 нм	0,28 нм	0,27 нм	0,36 нм

**Явления переноса  
в термодинамически  
неравновесных системах**

$$\frac{\langle l_1 \rangle}{\langle l_2 \rangle} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

**1. Теплопроводность.** Если в одной области газа средняя кинетическая энергия молекул больше, чем в другой, то с течением времени вследствие постоянных столкновений молекул происходит процесс выравнивания средних кинетических энергий молекул, т. е., иными словами, выравнивание температур.

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



Фурье, Жан Батист Жозеф (1768—1830) — французский математик и физик.

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

где  $j_E$  — плотность теплового потока — величина, определяемая энергией, переносимой в форме теплоты *в единицу времени через единичную площадку*, перпендикулярную оси  $x$ ,  $\lambda$  — теплопроводность,  $\frac{dT}{dx}$  — градиент температуры, равный скорости изменения температуры на единицу длины  $x$  в направлении нормали к этой площадке. Знак минус показывает, что

Можно показать, что

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

где  $c_v$  — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме (количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг газа на 1 К при постоянном объеме),  $\rho$  — плотность газа,  $\langle v \rangle$  — средняя скорость теплового движения молекул,  $\langle l \rangle$  — средняя длина свободного пробега.



**2. Диффузия.** Явление диффузии заключается в том, что происходит самопроизвольное проникновение и перемешивание частиц двух соприкасающихся газов,

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

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

**ДИФФУЗИЯ** (от лат. diffusio - распространение, растекание, рассеивание) -



Дата рождения:

3 сентября 1829

Место рождения:

Кассель, Германия

Дата смерти:

21 августа 1901 (71 год)

Место смерти:

Бланкенберге, Бельгия

Страна:

Германия

где  $j_m$  — плотность потока массы — величина, определяемая массой вещества, диффундирующего в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси  $x$ ,  $D$  — диффузия (коэффициент диффузии),  $\frac{d\rho}{dx}$  — градиент плотности,

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

**3. Внутреннее трение (вязкость).** Механизм возникновения внутреннего трения между параллельными слоями газа (жидкости), движущимися с различными скоростями, заключается в том, что из-за хаотического теплового движения происходит обмен молекулами между слоями,

### **Закон Ньютона**

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S,$$

где  $j_p$  — плотность потока импульса — величина, определяемая полным импульсом, переносимым в единицу времени в положительном направлении оси  $x$  через единичную площадку, перпендикулярную оси  $x$ ,  $\frac{dv}{dx}$  — градиент скорости. Знак минус указывает, что импульс переносится в направлении убывания скорости (поэтому знаки  $j_p$  и  $\frac{dv}{dx}$  противоположны).

Динамическая вязкость  $\eta$  численно равна плотности потока импульса при градиенте скорости, равном единице; она вычисляется по формуле

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

$$\begin{cases} \eta = \rho D, \\ \lambda / (\eta c_V) = 1. \end{cases}$$

<i>Явление переноса</i>	<i>Переносимая физическая величина</i>	<i>Закон, описывающий явление переноса</i>	<i>Коэффициенты <math>\lambda</math>, <math>D</math> и <math>\eta</math></i>
Теплопроводность	Энергия	Закон Фурье $j_E = -\lambda \frac{dT}{dx}$	$\lambda = \frac{1}{3} c_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle$
Диффузия	Масса	Закон Фика $j_m = -D \frac{d\rho}{dx}$	$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle$
Внутреннее трение (вязкость)	Импульс	Закон Ньютона $j_p = -\eta \frac{dv}{dx}$	$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle$