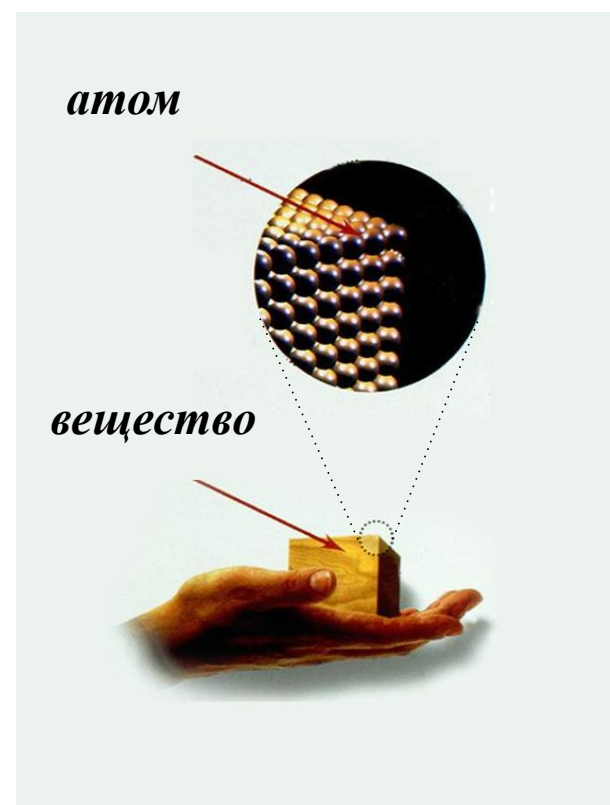


**Молекулярная физика и термодинамика** – разделы физики, в которых изучаются макроскопические процессы в телах, связанные с огромным числом содержащихся в них атомов и молекул.

Объект исследования:  
**макроскопические системы** - объекты, состоящие из очень большого числа частиц (молекул, атомов).





# ЭЛЕМЕНТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Основы классической статистики заложены Д.К. Максвеллом (Англия), Л.Больцманом (Германия), В.У. Гиббсом (США) во второй половине XIX столетия.

## Задачи статистики

1. Нахождение средних и наиболее вероятных значений физических характеристик частиц, образующих макроскопическую систему.
2. Выяснение связи между характеристиками отдельных частиц системы и параметрами всей системы.

В середине XIX века была сформулирована молекулярно-кинетическая теория, но тогда не было никаких доказательств существования самих молекул. Вся теория базировалась на предположении о движении молекул, но как измерить скорость их движения, если они невидимы.

$$\frac{m_0 v_{\text{KB}}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad \rightarrow \quad v_{\text{KB}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kN_A T}{m_0 N_A}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad P = \frac{m}{V\mu} RT \quad P = RT \frac{\rho}{\mu} \quad \frac{P}{\rho} = \frac{RT}{\mu}$$

$$v_{\text{KB}} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$$

**Пр:** При плотности азота, равной 1.25 кг/м<sup>3</sup>, при  $t=0^\circ\text{C}$  и  $P=1$  атм.,  $v=500$  м/с.  
 Для водорода:  $v=2000$  м/с.

Закономерности, обусловленные большим числом сталкивающихся атомов и молекул, и не свойственные отдельным атомам и молекулам, называются **вероятностными** или **статистическими**.

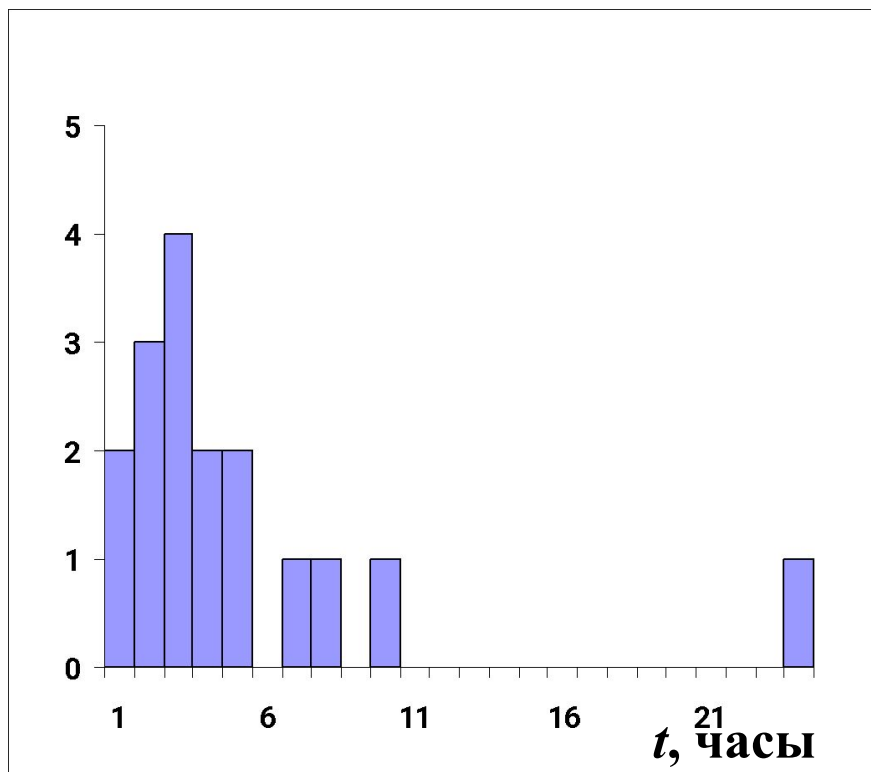
По определению: **Вероятность  $P$**  можно представить как **отношение числа благоприятных случаев к числу возможных случаев**.

Отсюда следует, что  $P$  может принимать значения от нуля до единицы.

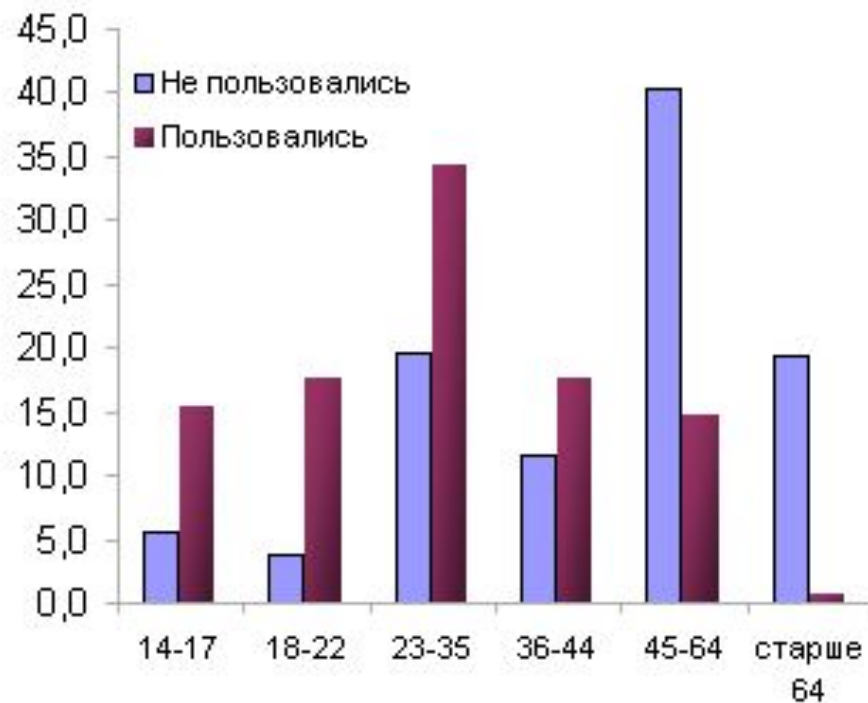
**Распределение вероятностей** – это закон, описывающий область значений переменной и вероятность появления переменной в конкретных областях значений.

Статистический анализ, для построения рядов распределения, проводится во многих областях науки с целью выделения характерных свойств и закономерностей изучаемой совокупности.

## Сколько времени вы проводите за компьютером?



## Распределение пользователей интернета по возрасту, в %



Для корректного построения распределения нужно большое количество людей в выборке исследования.



# 1. Распределение Максвелла

(для описания распределения молекул по скоростям)

## Обозначим:

$dN$  – число молекул со скоростями от  $v$  до  $v + dv$ .

$N$  – общее число молекул газа в данном объеме.

$\frac{dN}{N}$  – относительное число молекул, скорости которых лежат в интервале от  $v$  до  $v + dv$  (вероятность того, что скорость данной молекулы лежит в данном интервале).

$\frac{dN}{Ndv}$  – относительное число молекул в единичном интервале скоростей.

$f(v) = \frac{dN}{Ndv}$  – плотность вероятности того, что молекула обладает скоростью  $v$  (функция распределения Максвелла).



$$f(v) = \frac{dN}{N \cdot dv} \quad \frac{dN}{N} = f(v) \cdot dv$$

$$\int_0^{\infty} f(v) \cdot dv = \int_0^N \frac{dN}{N} = \frac{1}{N} \int_0^N dN = \frac{N}{N} = 1$$

$$\int_0^{\infty} f(v) dv = 1 \quad \text{— условие нормировки функции распределения}$$

Интеграл определяет вероятность того, что скорость молекулы попадает в интервал скоростей от 0 до  $\infty$ .

Явный вид функции  $f(v)$  был получен теоретически Максвеллом в 1859 г.

$$f(V) = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} \cdot v^2$$

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – постоянная Больцмана;

$m_0$  – масса молекулы,

$T$  – абсолютная температура газа,

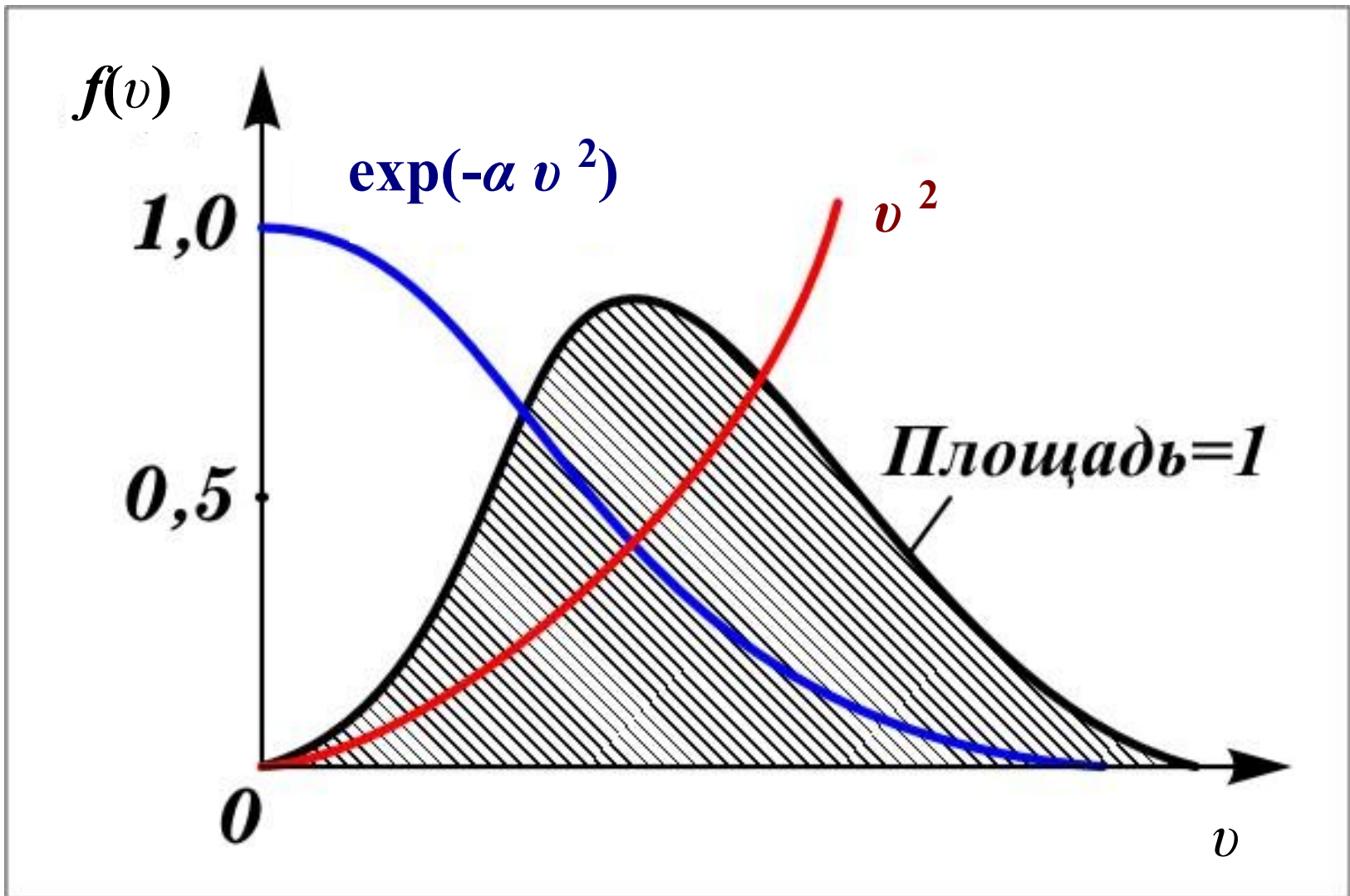
$v$  – заданная скорость (аргумент функции).

***Распределение Максвелла справедливо для газов и жидкостей.***



**Джеймс Клерк  
Максвелл  
(1831- 1879)**

$$f(v) = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} \cdot v^2$$



$$f(v) = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} \cdot v^2$$

## Основные свойства функции распределения

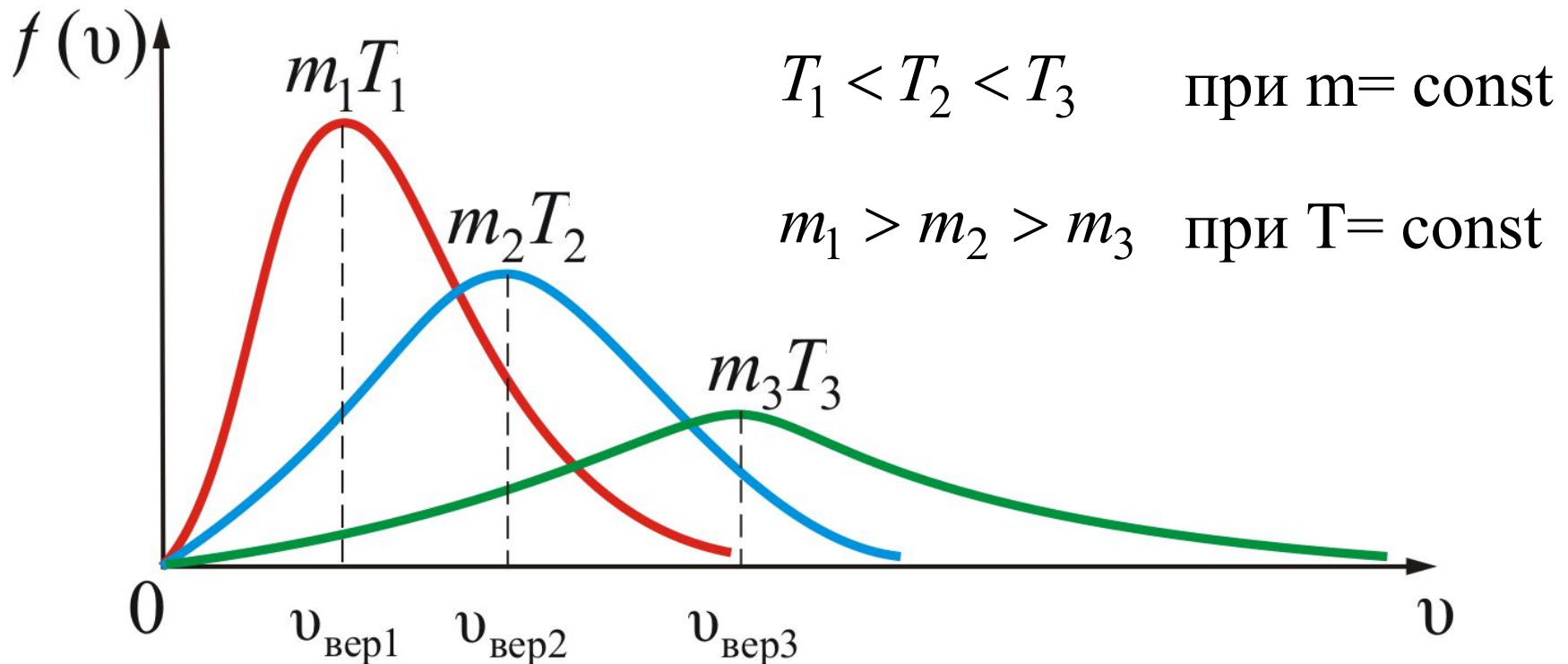
1. При  $v=0$  и  $v=\infty$   $f(v)=0$  – очень большие и маленькие скорости маловероятны

2. Существует  $v_{вер}$  – наиболее вероятная скорость, с которой движется большинство молекул. Ей соответствует максимум функции распределения Максвелла.

$$\frac{df(v)}{dv} = 0 \quad \rightarrow \quad v_{вер} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

3. При увеличении температуры  $v_{\text{вер}}$  – увеличивается
4. При увеличении массы молекул  $v_{\text{вер}}$  – уменьшается



# ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

## 1. Нахождение относительного числа молекул со скоростями от $v_1$ до $v_2$

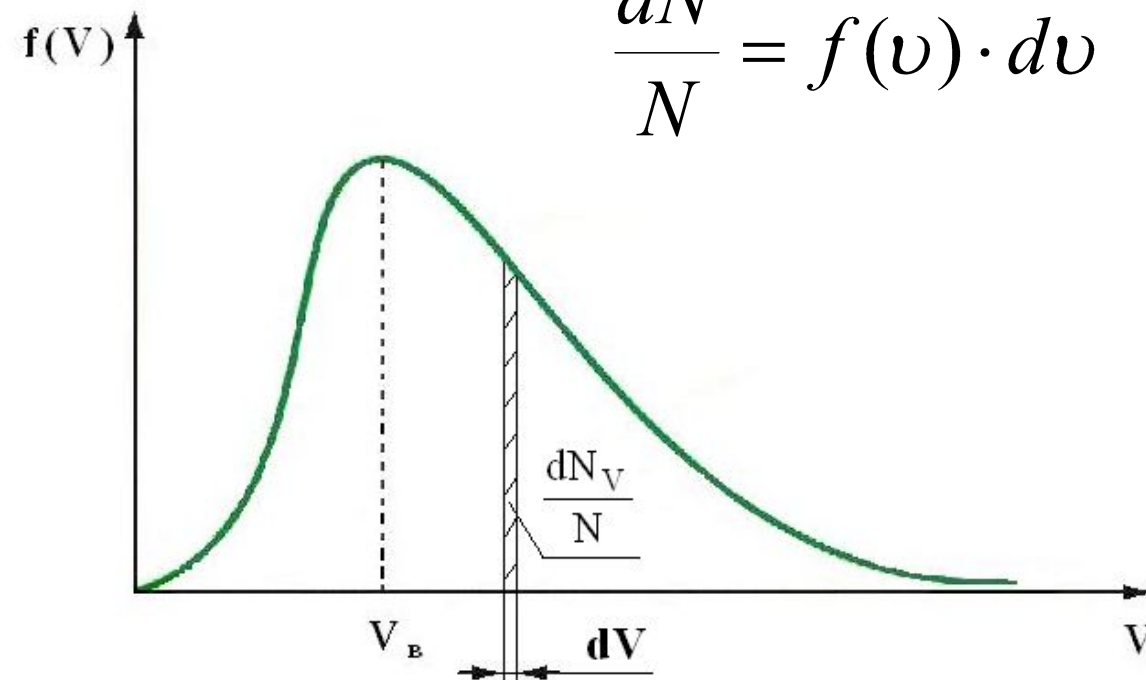
**Обозначим:**

$dN$  – число молекул со скоростями от  $v$  до  $v + dv$

$N$  – общее число молекул газа в данном объеме

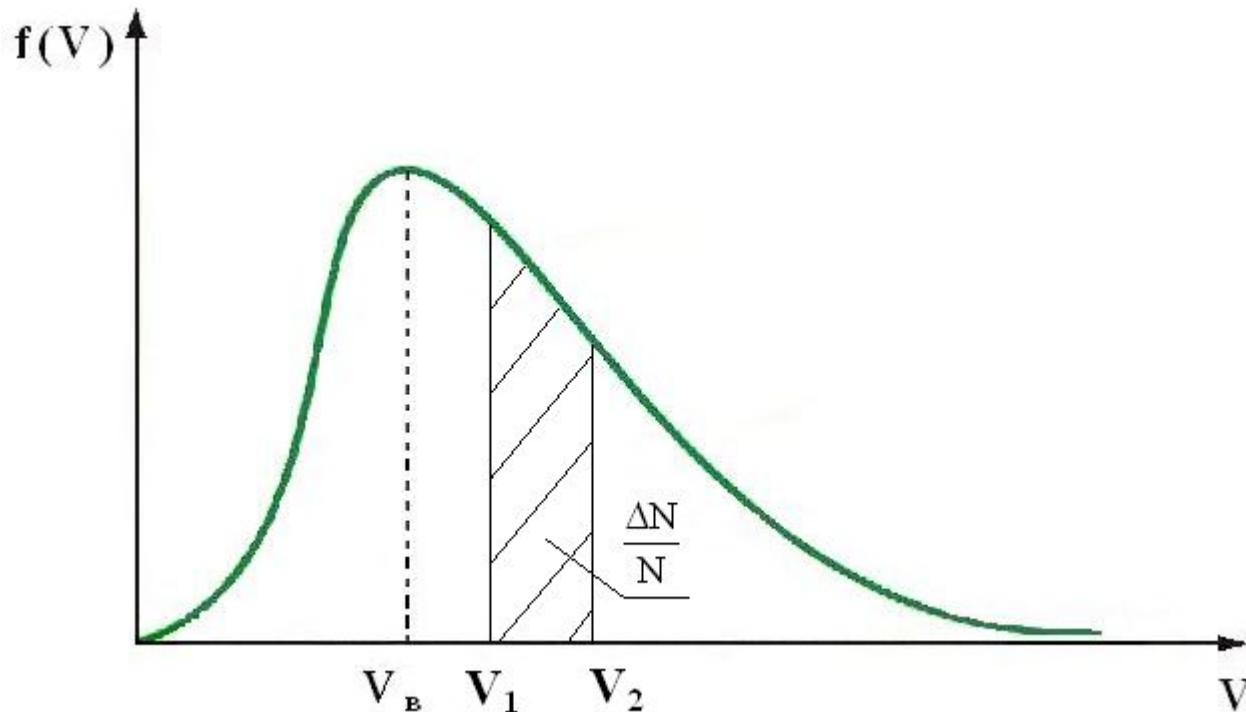
$$\frac{dN}{N} = f(v) \cdot dv$$

- вероятность того, что скорость данной молекулы лежит в интервале скоростей от  $v$  до  $v + dv$ .



$$\frac{\Delta N}{N} = \int_{v_1}^{v_2} f(v) \cdot dv \quad \text{— относительное число молекул со скоростями от } v_1 \text{ до } v_2.$$

На графике  $f(v)$  ему соответствует площадь заштрихованной фигуры.



## 2. Нахождение средней скорости молекул $v_{\text{ср}}$

По определению: 
$$\langle v \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N}$$

Разобьем весь интервал возможных скоростей (от нуля до бесконечности) на элементарные интервалы  $dv$ .

$dN$  – число молекул, скорости которых лежат в пределах одного из таких интервалов.

Так как  $dv$  - элементарный интервал, то можно считать, что все скорости, принадлежащие этому интервалу, одинаковы и равны  $v$ .

$$f(v) = \frac{dN}{N \cdot dv} \quad \rightarrow \quad dN = Nf(v)dv$$



$$dN = N \cdot f(v) \cdot dv$$

$v dN$  - сумма скоростей молекул, скорости которых лежат в интервале от  $v$  до  $v + \Delta v$ .

Тогда сумма скоростей всех молекул:

$$\sum_{i=1}^N v_i = \int_0^N v \cdot dN = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) \cdot N \cdot dv$$

$$\langle v \rangle = \frac{\int_0^{\infty} v \cdot f(v) N dv}{N} = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot \int_0^{\infty} v^3 \exp\left( -\frac{1}{2} \frac{m_0 v^2}{kT} \right) dv$$

$$\langle v \rangle = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \left( \frac{3k^2 T^2}{m_0^2} \right) \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$$

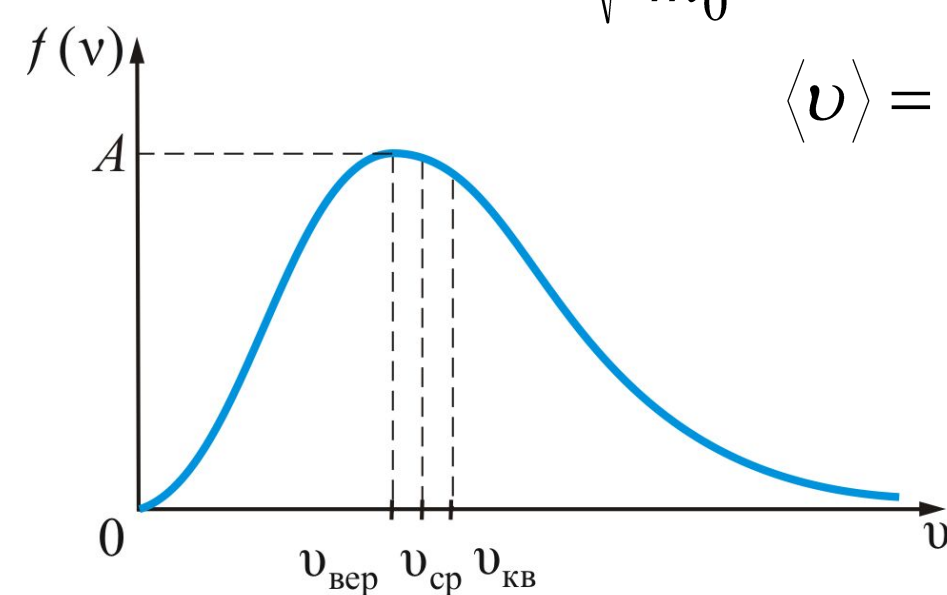
### 3. Нахождение средней кинетической энергии молекул

$$\langle E_k \rangle = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} E \cdot dN = \int_0^{\infty} E \cdot f(v) dv = \frac{3}{2} kT \quad \langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$$

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} \text{ — наиболее вероятная скорость}$$

$$v_{\text{КВ}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} \text{ — средняя квадратичная скорость}$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} \text{ — средняя арифметическая скорость}$$



$$\frac{v_{\text{КВ}}}{v_{\text{вер}}} = 1.22 \quad \frac{v_{\text{сп}}}{v_{\text{вер}}} = 1.13$$

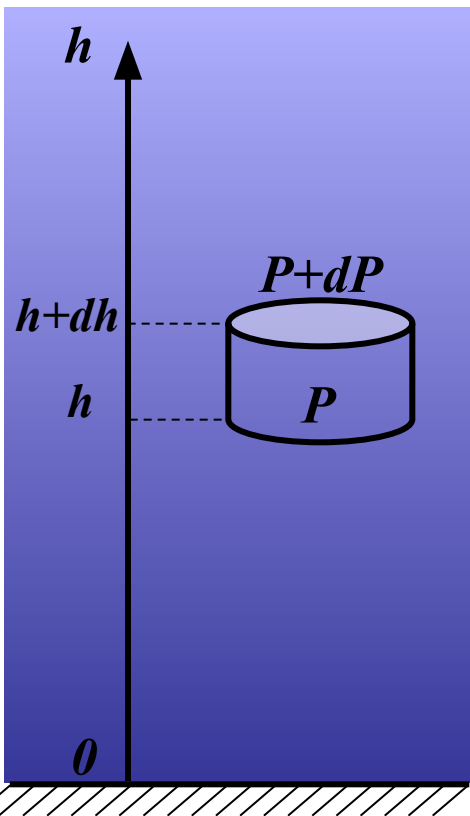


## **2. Распределение Больцмана**

(для описания распределения молекул по высоте в гравитационном поле Земли)

# ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ В ОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ БАРОМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА

Барометрическая формула выражает зависимость атмосферного давления от высоты над уровнем моря.



Атмосферное давление на высоте  $h$  обусловлено весом вышележащих слоев газа.

$P$  - давление на высоте  $h$

$(P + dP)$  - давление на высоте  $(h + dh)$

$$dh > 0 \quad dP < 0$$

*(на большей высоте давление меньше)*

$dP = -\rho g dh$  – изменение давления с увеличением высоты

$\rho$  – плотность газа

$g$  – ускорение свободного падения

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \rightarrow \begin{cases} \rho = \frac{m}{V} = \frac{P\mu}{RT} \\ dP = -\rho g dh \end{cases} \rightarrow \frac{dP}{P} = -\frac{\mu g dh}{RT}$$

$T, g, \mu, R$  – *const* (не меняются с высотой)

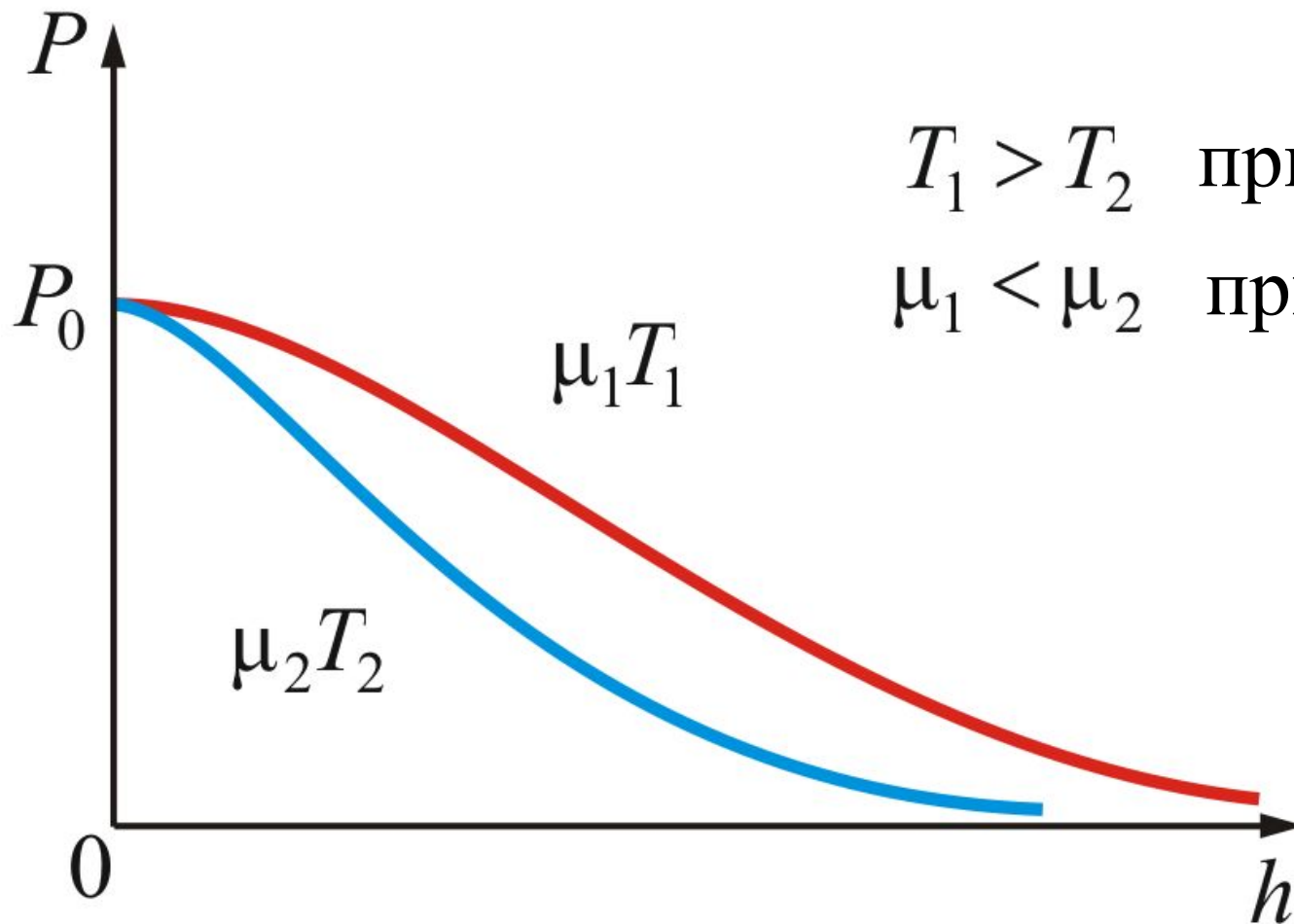
$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = -\frac{\mu g}{RT} \int_0^h dh \rightarrow \ln(P) - \ln(P_0) = -\frac{\mu g h}{RT}$$

$$\ln \frac{P}{P_0} = -\frac{\mu g}{RT} h$$

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT}\right) \quad \text{– барометрическая формула}$$

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right)$$

Чем *тяжелее* газ ( $> \mu$ ) и чем *ниже* температура, тем *быстрее убывает давление*



$T_1 > T_2$  при  $\mu = \text{const}$

$\mu_1 < \mu_2$  при  $T = \text{const}$

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БОЛЬЦМАНА

Распределение Больцмана определяет распределение частиц в силовом поле в условиях теплового равновесия.



Людвиг Больцман  
(1844–1906)

$$P = nkT$$

$$P_0 = n_0kT$$

$P_0$  и  $n_0$  – давление и концентрация газа на нулевой высоте,  $P$  и  $n$  – на высоте  $h$

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right) \quad \longrightarrow \quad \cancel{nkT} = \cancel{n_0kT} \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right)$$

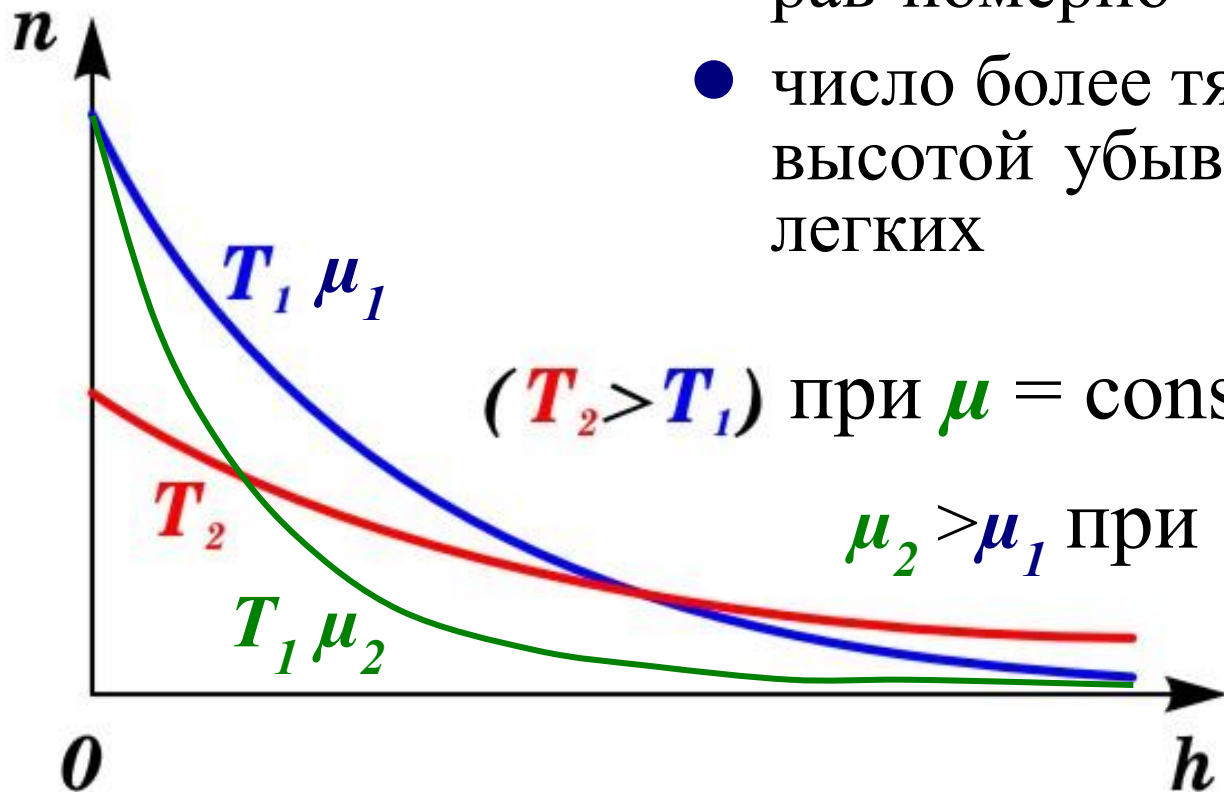
$$\left. \begin{array}{l} \mu = m_0 N_A \\ R = N_A k \end{array} \right\} \quad n = n_0 \exp\left(-\frac{\cancel{m_0 N_A} gh}{\cancel{k N_A} T}\right) \quad n = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 gh}{kT}\right)$$

*распределение Больцмана в поле силы тяжести*

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 g h}{kT}\right)$$

$$n = \frac{P}{kT}$$

- с уменьшением температуры число молекул на высотах, отличных от нуля, убывает
- при высоких температурах молекулы оказываются распределёнными по высоте почти равномерно
- число более тяжелых молекул с высотой убывает быстрее, чем легких





$$n = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 g h}{kT}\right)$$

$E_n = m_0 g h$  – потенциальная энергия одной молекулы в поле тяготения на высоте  $h$  от уровня моря, тогда  $n_0$  – концентрация частиц в том месте, где  $E_n = 0$

$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right)$  – распределение Больцмана характеризует распределение частиц по значениям потенциальной энергии

Распределение справедливо в любом потенциальном поле сил для совокупности любых частиц, находящихся в состоянии хаотического теплового движения.

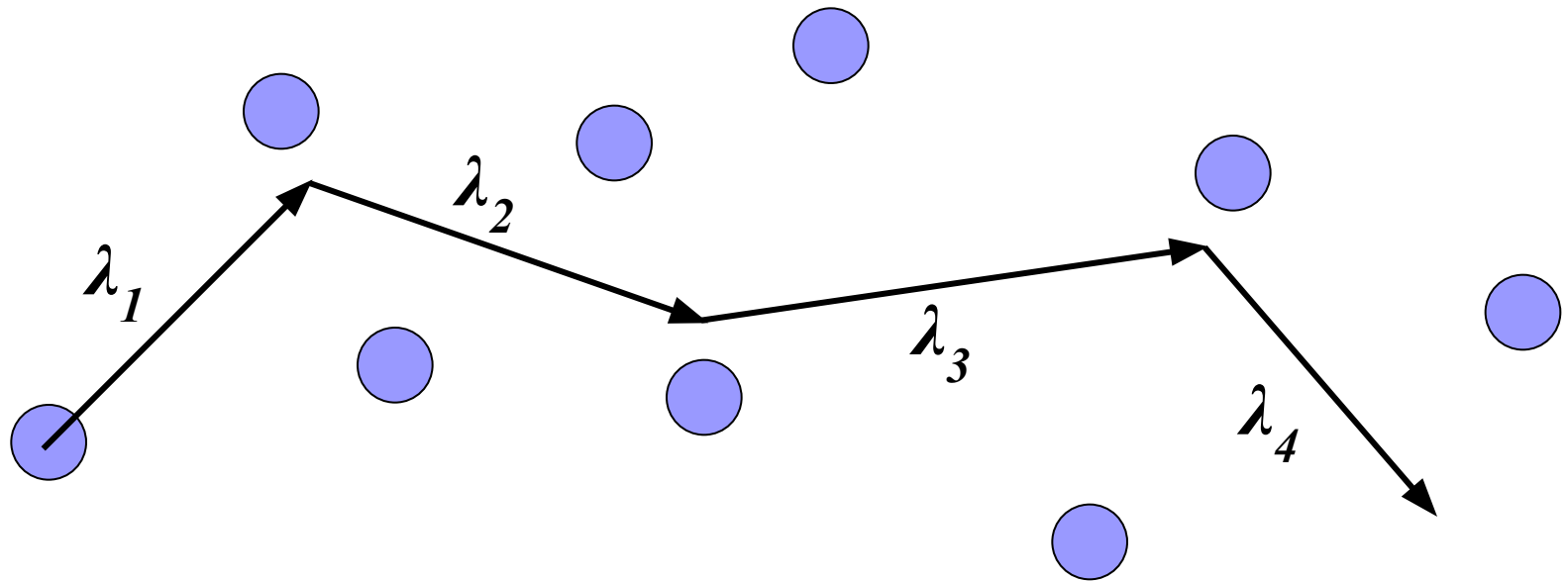
Оно устанавливается в результате совместного действия потенциального поля и теплового движения.



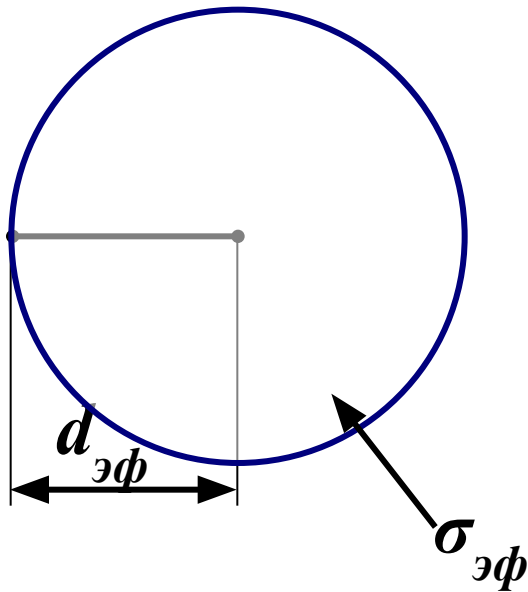
# **ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА в неравновесных системах**

# 1. СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ И СРЕДНЕЕ ЧИСЛО СТОЛКНОВЕНИЙ

Средняя длина свободного пробега молекул  $\langle \lambda \rangle$  – это среднее расстояние, которое молекула проходит между двумя последовательными соударениями.



**Эффективный диаметр молекулы  $d_{эф}$**  – минимальное расстояние, на которое сближаются центры молекул при их соударении.



- определяется природой самого газа (увеличивается при увеличении размеров молекул)
- зависит от скорости сталкивающихся молекул, т.е. от температуры (уменьшается при увеличении температуры)

Эффективное сечение молекул  $\sigma_{эф}$  – площадь круга с радиусом, равным эффективному диаметру (площадь в которую не может проникнуть центр любой другой молекулы).

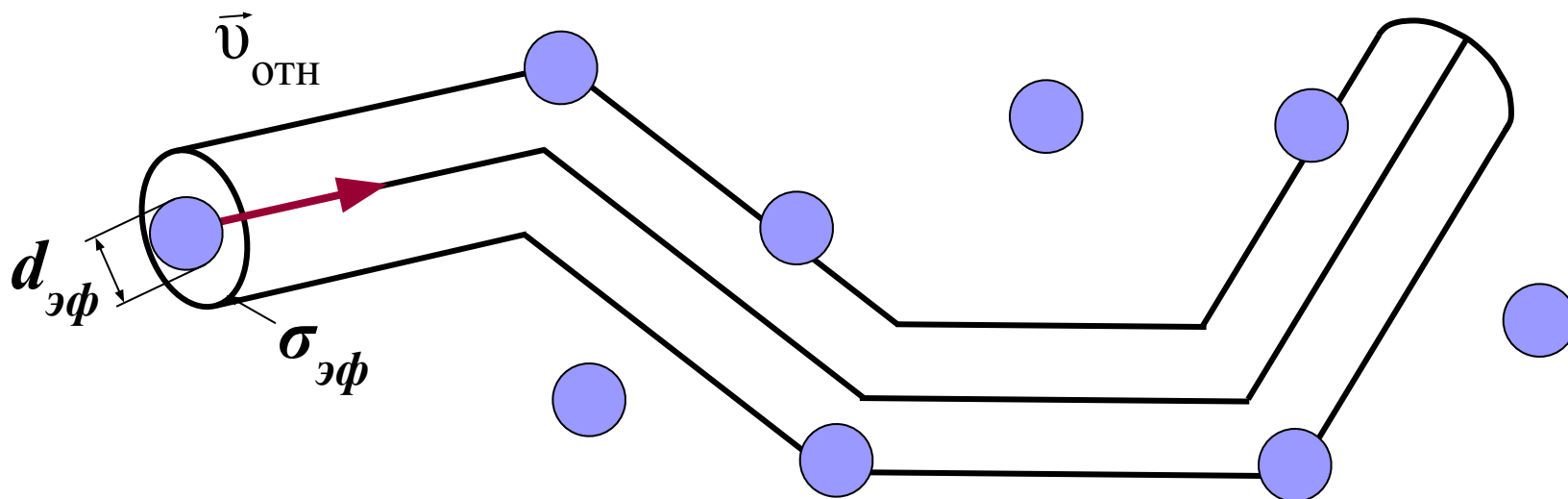
$$\sigma_{эф} = \pi d_{эф}^2$$

Найдем  $\langle Z \rangle$  – среднее число соударений одной молекулы с другими в единицу времени.

Сделаем предположение что

- молекулы – упругие шарики диаметром  $d_{эф}$
- все молекулы неподвижны, а одна движется между ними, обладая средней относительной скоростью  $\langle v_{отн} \rangle$

За 1 секунду летящая молекула столкнется со всеми молекулами, центры которых окажутся в пределах объема ломаного цилиндра длиной образующей  $\langle v_{отн} \rangle$  и площадью сечения  $\sigma_{эф}$ .



$V = \sigma_{эф} \cdot \langle v_{отн} \rangle$  – объем цилиндра

$\langle Z \rangle = n \cdot \sigma_{эф} \cdot \langle v_{отн} \rangle$  – среднее число соударений одной молекулы с другими

$$\left. \begin{aligned} \langle v_{отн} \rangle &= \sqrt{2} \langle v \rangle \\ \sigma_{эф} &= \pi \cdot d_{эф}^2 \end{aligned} \right\} \rightarrow \langle Z \rangle = n \sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_{эф}^2 \cdot \langle v \rangle$$

$\langle v \rangle$  – средняя скорость молекулы, или путь, пройденный ею за 1 с.

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle Z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \cdot d_{эф}^2 \cdot n} \quad \text{– средняя длина свободного пробега молекулы:}$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle Z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot d_{\text{эф}}^2 \cdot n}$$

$$n = \frac{P}{kT}$$



$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2\pi} \cdot d_{\text{эф}}^2 \cdot P}$$

При нормальных условиях ( $T = 300 \text{ K}$  и  $P = 10^5 \text{ Па}$ )  
для газа с  $d_{\text{эф}} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  (азот):

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 10^5} = 10^{-7} \text{ м}$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2\pi} \cdot d_{\text{эф}}^2 \cdot P}$$

1.  $V = \text{const} \Rightarrow P/T = \text{const}$ , но диаметр слабо уменьшается с ростом температуры и  $\langle \lambda \rangle$  увеличивается.
2.  $P = \text{const}$ . С ростом температуры  $\langle \lambda \rangle$  увеличивается практически пропорционально температуре.
3.  $T = \text{const}$ . С увеличением давления  $\langle \lambda \rangle$  уменьшается.

Если  $\langle \lambda \rangle$  сравнима или больше размеров сосуда  $L$  в котором находится газ, то такое состояние газа называется **вакуумом**.





## 2. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА

**Явления переноса** – круг явлений в термодинамически неравновесных системах, в процессе которых происходит выравнивание параметров макроскопической системы, при этом система стремится к состоянию равновесия.

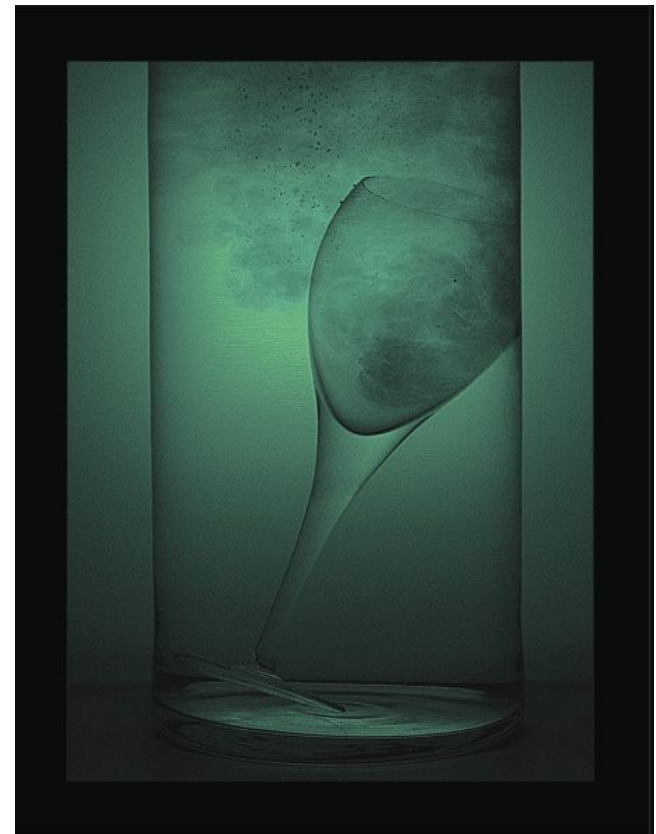
Процессы выравнивания сопровождаются направленным переносом ряда физических величин (массы, энергии, импульса и т.д.) и поэтому называются явлениями переноса.

К явлениям переноса в газах относятся

- А) диффузия,**
- Б) внутреннее трение (*вязкость*),**
- В) теплопроводность.**

**А) Диффузия** – процесс переноса массы вещества молекулами за счет их хаотического движения при наличии градиента плотности (или концентрации молекул).

**Диффузия имеет место в газах, жидкостях и твердых телах**



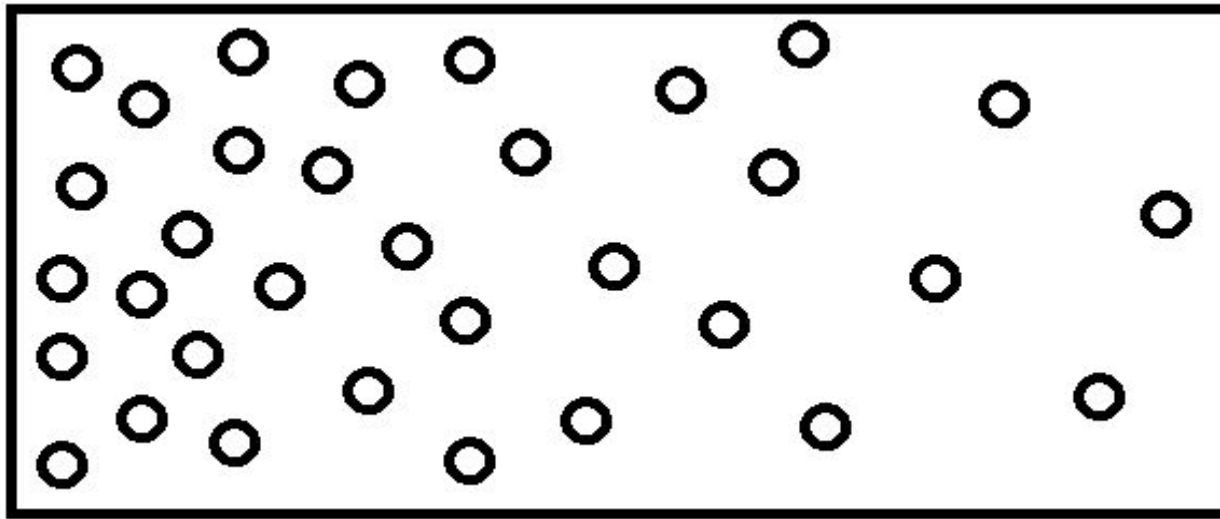
При диффузии масса переносится из мест с большей концентрацией в места с меньшей концентрацией, что приводит к ее равномерному распределению по занимаемому объему.

Математически диффузия описывается **законом Фика**

$$dm = -D \frac{d\rho}{dr} dS_{\perp} \cdot dt$$

Масса вещества  $dm$ , переносимая молекулами за время  $dt$  через площадку  $dS_{\perp}$ , расположенную перпендикулярно направлению переноса (оси  $r$ ), прямо пропорциональна проекции градиента плотности  $\frac{d\rho}{dr}$  на направление быстрого возрастания плотности.

# Молекулы газа в сосуде



$grad(\rho)$

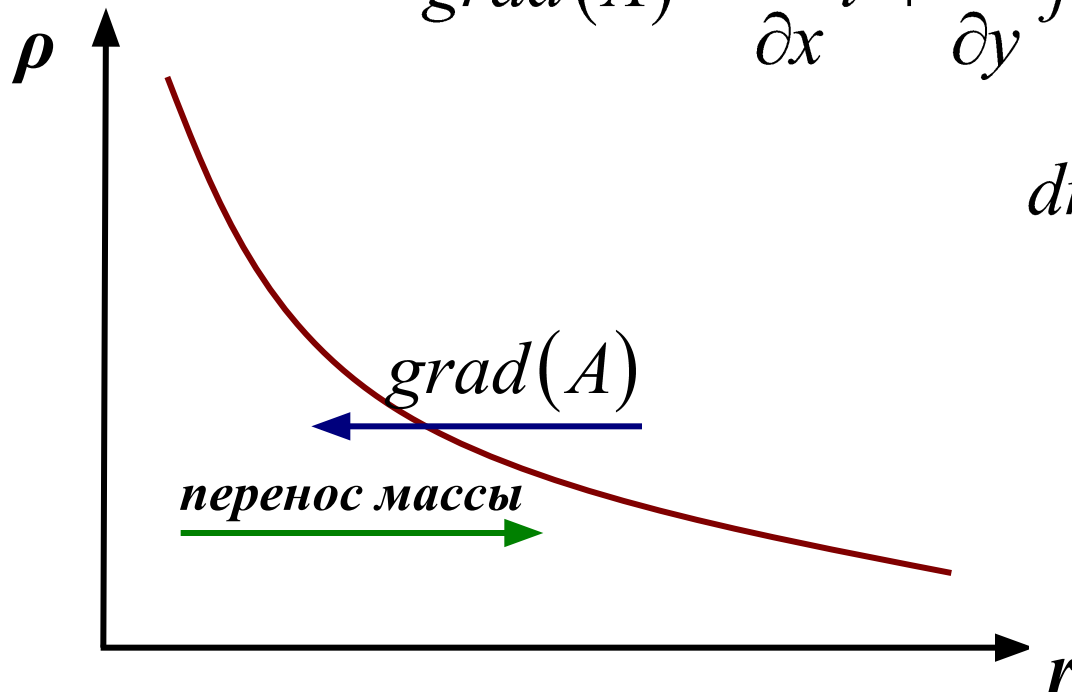


перенос массы

**Градиент** (от лат. *gradiens*, род. падеж *gradientis* — шагающий) — вектор который указывает направление наискорейшего роста этой функции, и чей модуль равен скорости ее изменения в этом направлении.

$A(x,y,z)$  — скалярная функция

$$\mathit{grad}(A) = \frac{\partial A}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial A}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial A}{\partial z} \mathbf{k}$$



$$dm = -D \frac{d\rho}{dr} dS_{\perp} \cdot dt$$

$$A \rightarrow \rho$$

$$\rho(r)$$

$$dm = -D \frac{d\rho}{dr} dS_{\perp} \cdot dt$$

Знак « $-$ » показывает, что перенос массы происходит в направлении убывания плотности (обратно направлению градиента плотности).

$J = \frac{dm}{dS_{\perp} dt}$  – диффузионный поток через единицу площади в единицу времени (плотность потока массы)

$$J = -D \frac{d\rho}{dr} \quad \mathbf{D} \text{ – коэффициент диффузии}$$

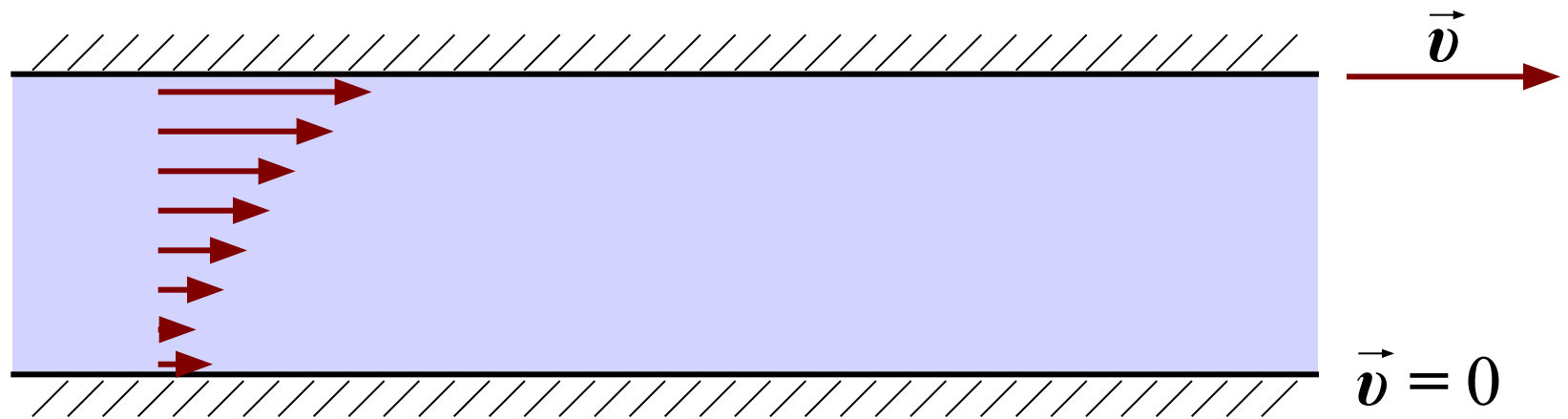
Согласно кинетической теории газов:  $D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle$

$\langle v \rangle$  – средняя скорость молекул

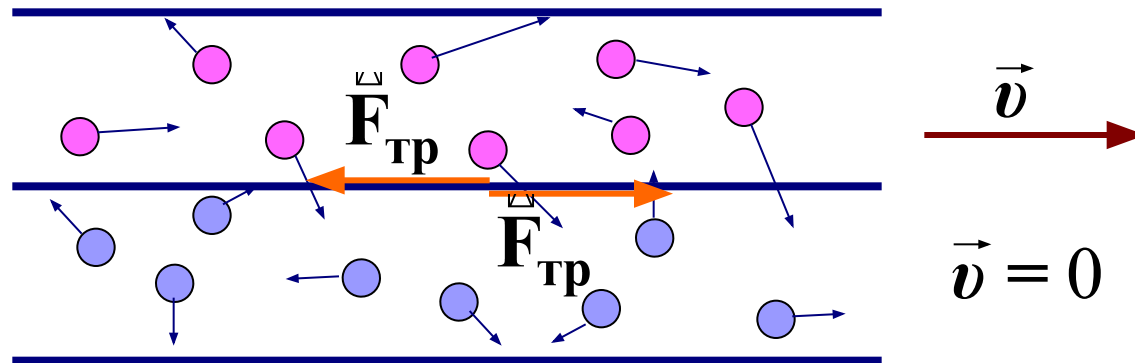
$\langle \lambda \rangle$  – средняя длина свободного пробега молекул

$$[D] = \frac{m^2}{c}$$

**Б) Внутреннее трение (вязкость)** – возникновение силы внутреннего трения при взаимодействии между слоями газа (жидкости), движущимися с различными скоростями.



# Механизм возникновения внутреннего трения



1. При течении слоёв газа или жидкости с различными скоростями из-за хаотического теплового движения происходит обмен молекулами между слоями.
2. Быстрый слой стремится ускорить более медленный и наоборот.
3. В результате возникают силы внутреннего трения, тормозящие движение быстрых слоев и ускоряющие движение медленных.



Вязкое трение в газе (жидкости) – это результат переноса импульса направленного движения слоев газа за счет хаотического движения при наличии в газе (жидкости) градиента скорости направленного движения.

Внутреннее трение подчиняется **закону Ньютона**:

$$dp = -\eta \frac{dv}{dr} dS_{\perp} dt$$

Импульс направленного движения слоев газа  $dp$ , перенесенный молекулами за время  $dt$  через площадку  $dS_{\perp}$ , расположенную перпендикулярно направлению переноса (оси  $r$ ), прямо пропорционален проекции градиента скорости направленного движения  $\frac{dv}{dr}$  на направление быстрого возрастания скорости.

$$dp = -\eta \frac{dv}{dr} dS_{\perp} dt$$

Знак « $\rightarrow$ » означает, что направление переноса импульса и направление возрастания скорости противоположны.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \rightarrow F_{mp} = -\eta \frac{dv}{dr} dS_{\perp} \quad \text{— сила терния действующая на площадку } dS_{\perp} \text{ на границе раздела параллельно движущихся слоев}$$

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho \quad \text{— динамическая вязкость (коэффициент вязкости)}$$

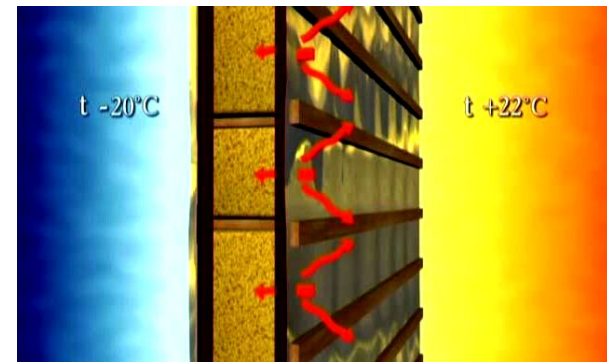
$\rho$  — плотность газа

$$[\eta] = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = \text{Па} \cdot \text{с}$$

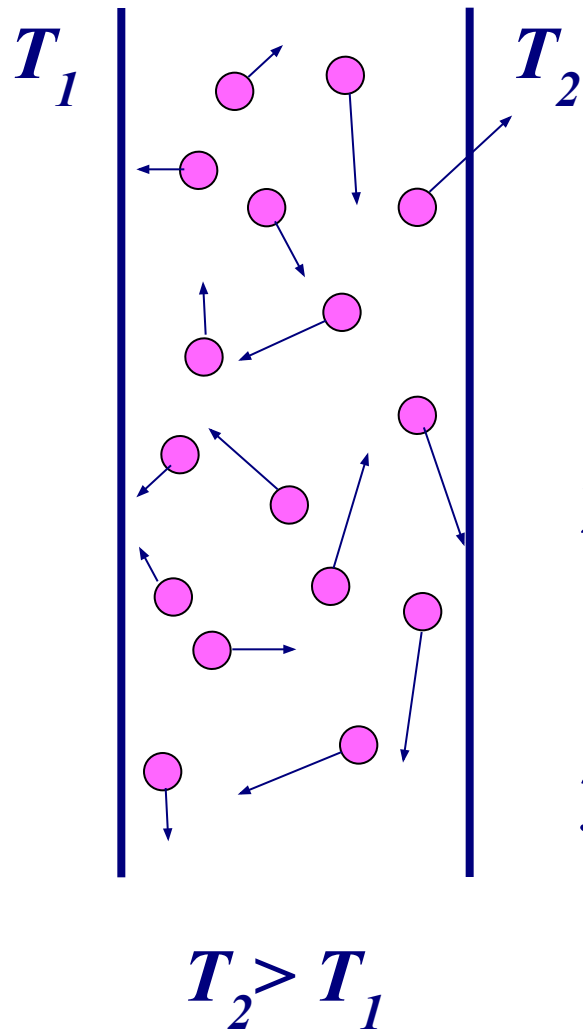
**В) Теплопроводность** – процесс выравнивания температуры, сопровождающийся направленным переносом тепловой энергии из более нагретых слоев в менее нагретые за счет хаотического движения молекул.



Рис. 1. Потери тепла через кладочные швы, выполненные на традиционном растворе



# Механизм возникновения теплопроводности



1. Хаотично двигаясь, молекулы будут переходить из одного слоя газа (жидкости) в другой, перенося с собой энергию.
2. Это движение молекул приводит к перемешиванию молекул, имеющих различную кинетическую энергию.
3. В результате кинетическая энергия быстрых слоев уменьшается, а медленных – увеличивается.

При теплопроводности энергия в виде тепла переносится из мест с большей температурой в места с меньшей температурой, что приводит к ее выравниванию.

Процесс теплопроводности описывается **законом Фурье**:

$$\delta Q = -\chi \frac{dT}{dr} dS_{\perp} \cdot dt$$

Элементарное количество тепла  $\delta Q$ , переносимое в стационарном процессе теплопроводности за время  $dt$  через площадку  $dS_{\perp}$ , перпендикулярную направлению переноса, прямо пропорционально проекции градиента температуры  $\frac{d\dot{O}}{dr}$  на направление быстрого возрастания температуры.

$$\delta Q = -\chi \frac{dT}{dr} dS_{\perp} \cdot dt$$

Знак « $-$ » показывает, что при теплопроводности энергия переносится в сторону убывания температуры.

$q = \frac{\delta Q}{dS_{\perp} dt}$  – тепло переносимое через единицу площади в единицу времени (тепловой поток)

$$q = -\chi \frac{dT}{dr} \quad \chi - \text{коэффициент теплопроводности}$$

Согласно кинетической теории газов:  $\chi = \frac{1}{3} c_V \rho \langle V \rangle \langle \lambda \rangle$

$c_V$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме

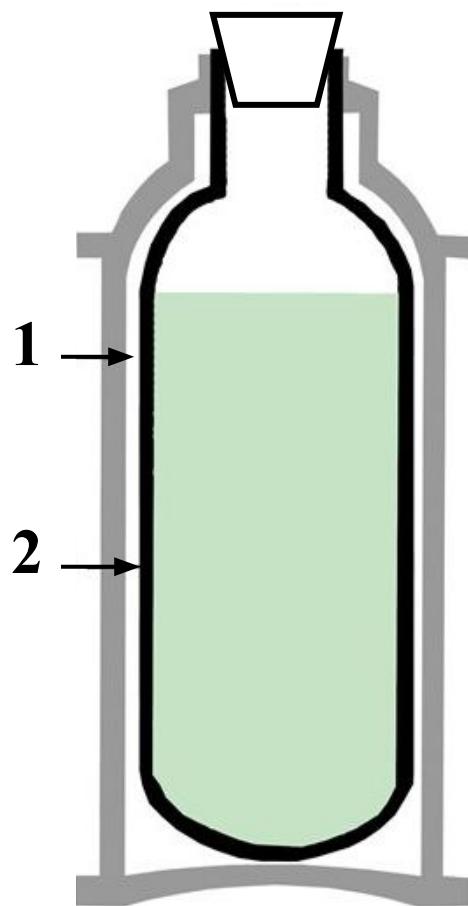
$$[\chi] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^3 \cdot \text{К}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$q = -\chi \frac{dT}{dr}$$

$$\chi = \frac{1}{3} c_V \rho \langle V \rangle \langle \lambda \rangle$$

В состоянии высокого вакуума:

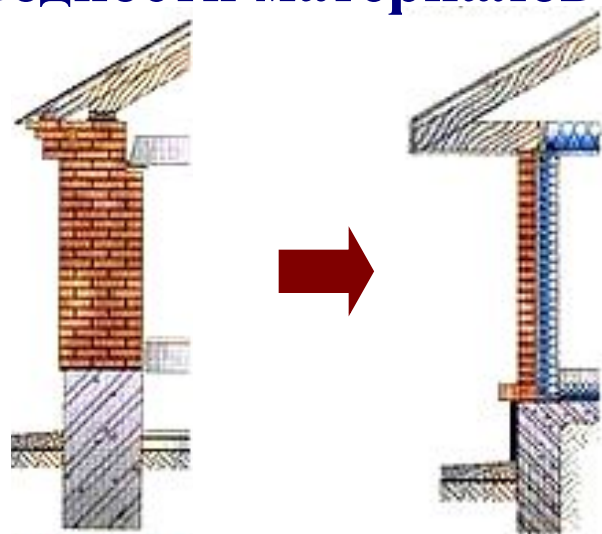
$$\chi \sim \rho$$



- 1 – вакуум
- 2 – стеклянная или металлическая колба

## Коэффициенты теплопроводности материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Золото	320
Алюминий	202-236
Железо	92
Сталь	47
Стекло	1
Кирпич строительный	0.2-0.7
Газобетон	0.1-0.3
Дерево	0.15
Шерсть	0.05
Минеральная вата	0.045
Пенополистирол	0.04
Воздух (300 К, 100 кПа)	0.026
Аргон	0.0177
Вакуум (абсолютный)	0 (строго)



Панель толщиной в 12 см заменяет стену из кирпича в 2.1 м





## Связь коэффициентов переноса с величинами, характеризующими движение молекул газа

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \quad \eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho \quad \chi = \frac{1}{3} c_V \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle$$

$$\eta = D \cdot \rho$$

$$\chi = D \cdot c_V \rho$$

$$\chi = c_V \cdot \eta$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} \quad \langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d_{\text{эф}}^2 P} \quad \rho = \frac{P \mu}{RT} \quad c_V = \frac{iR}{2\mu}$$

$$D \sim \frac{T \sqrt{T}}{P}$$

$$\chi \sim \sqrt{T}$$

$$\eta \sim \sqrt{T}$$