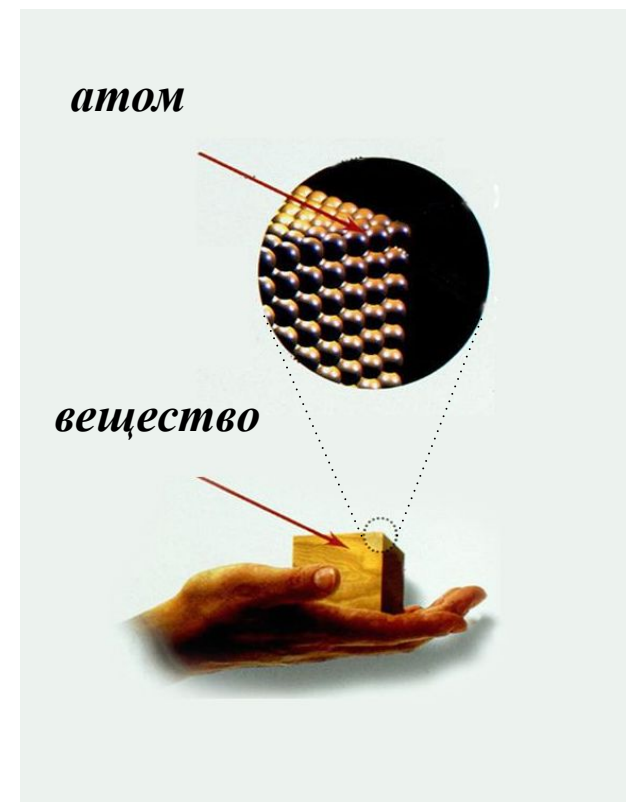
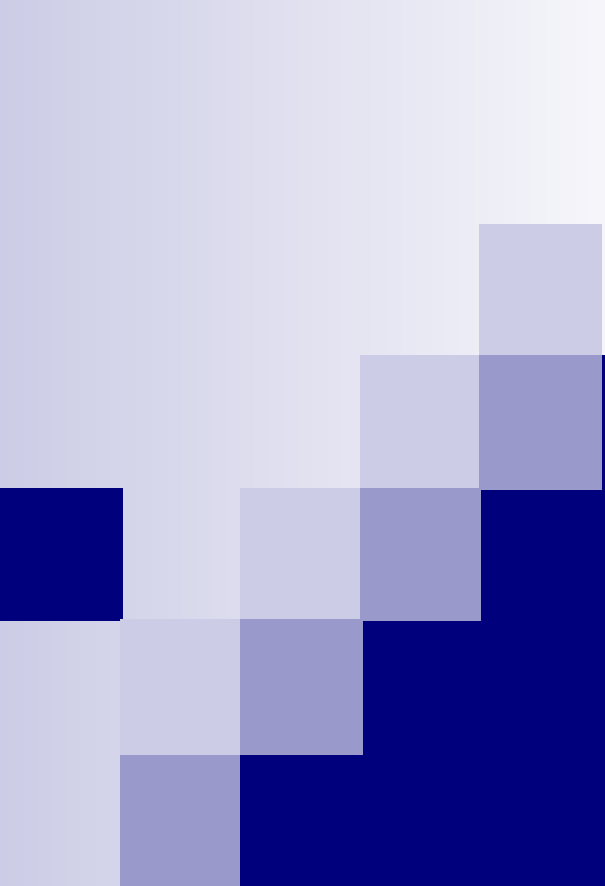


Молекулярная физика и термодинамика — разделы физики, в которых изучаются макроскопические процессы в телах, связанные с огромным числом содержащихся в них атомов и молекул.

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/м³,
 при $t=0^\circ\text{C}$ и $P=1$ атм., $v=500\text{м/с}$.
 Для водорода: $v=2000\text{м/с}$.

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

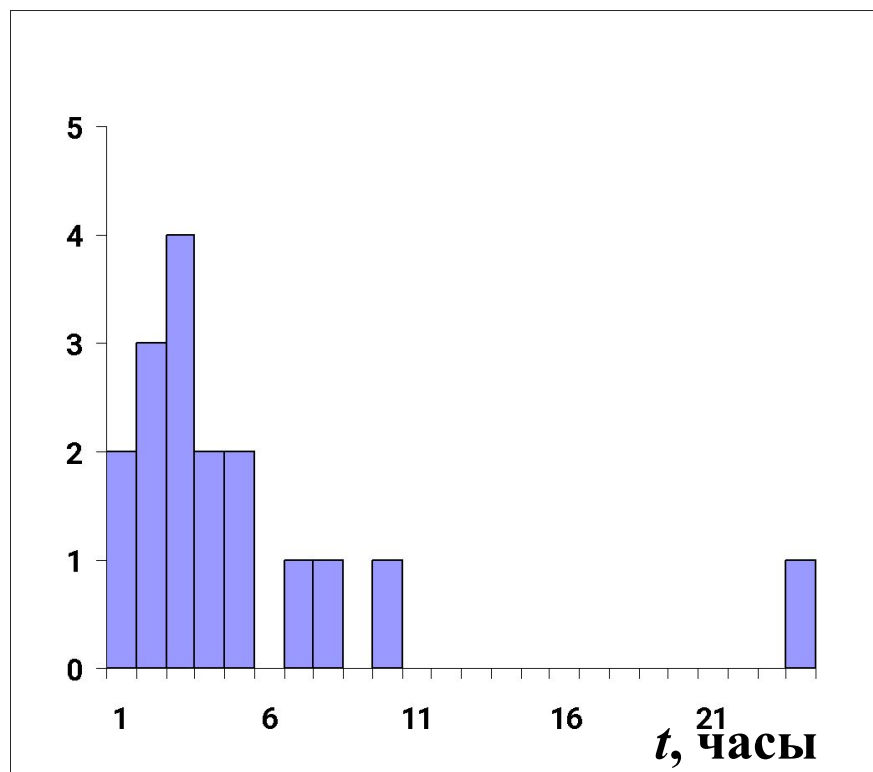
По определению: **Вероятность P** можно представить как **отношение числа благоприятных случаев к числу возможных случаев**.

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

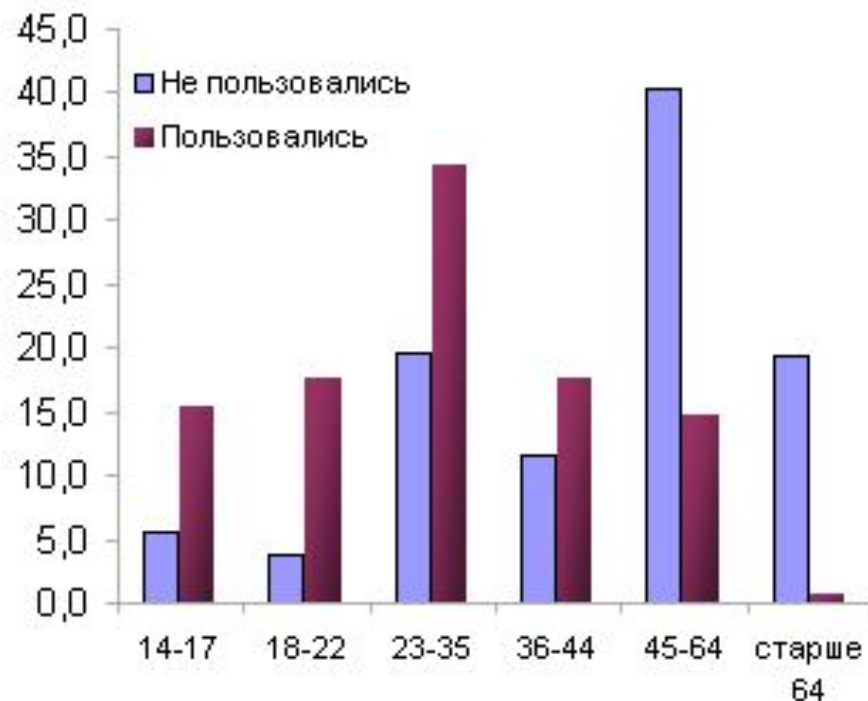
Распределение вероятностей — это закон, описывающий область значений переменной и вероятность появления переменной в конкретных областях значений.

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).


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

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

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

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

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

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



Джеймс Клерк
Максвелл
(1831- 1879)

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

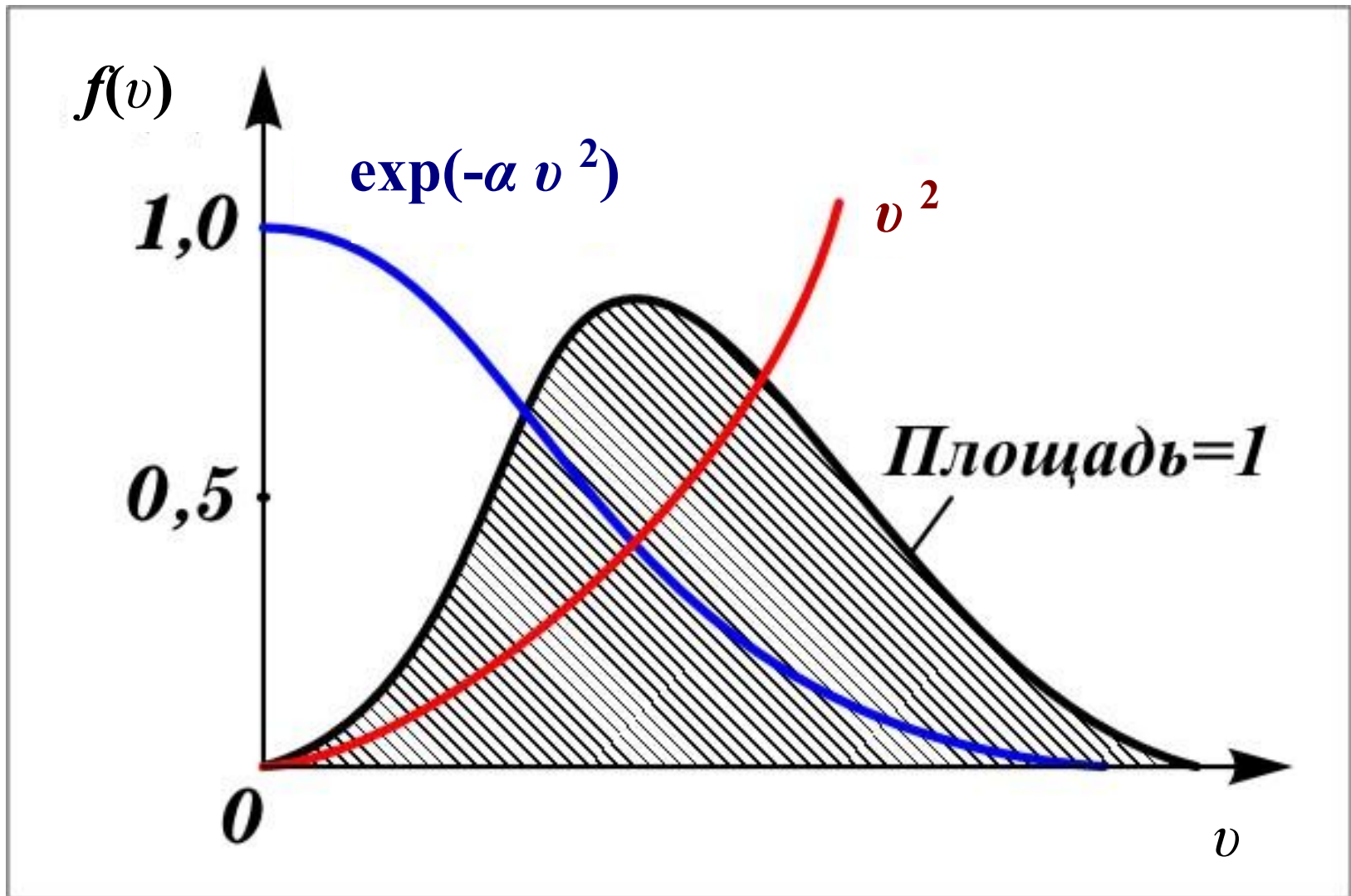
m_0 — масса молекулы,

T — абсолютная температура газа,

v — заданная скорость (аргумент функции).

Распределение Максвелла справедливо для газов и жидкостей.

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



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

Основные свойства функции распределения

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

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

$$\frac{df(v)}{dv} = 0$$

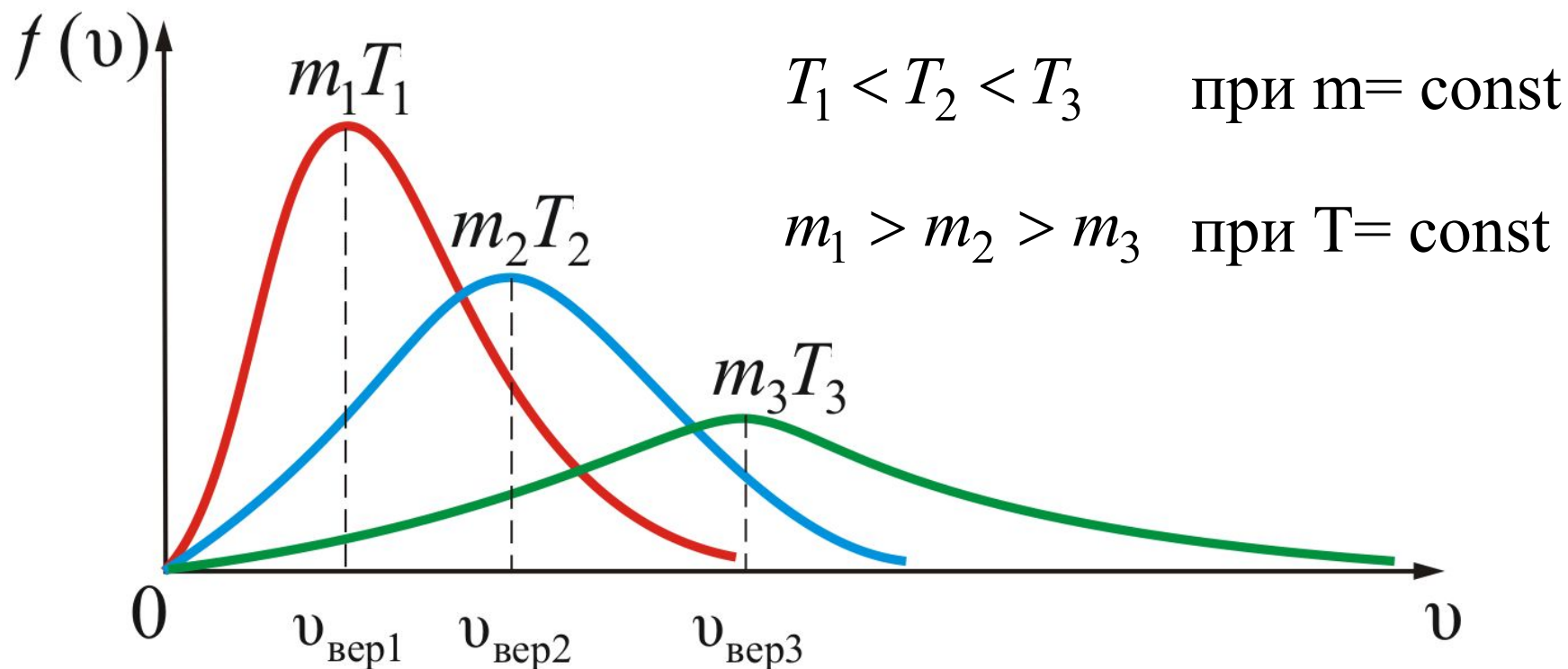


$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

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

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

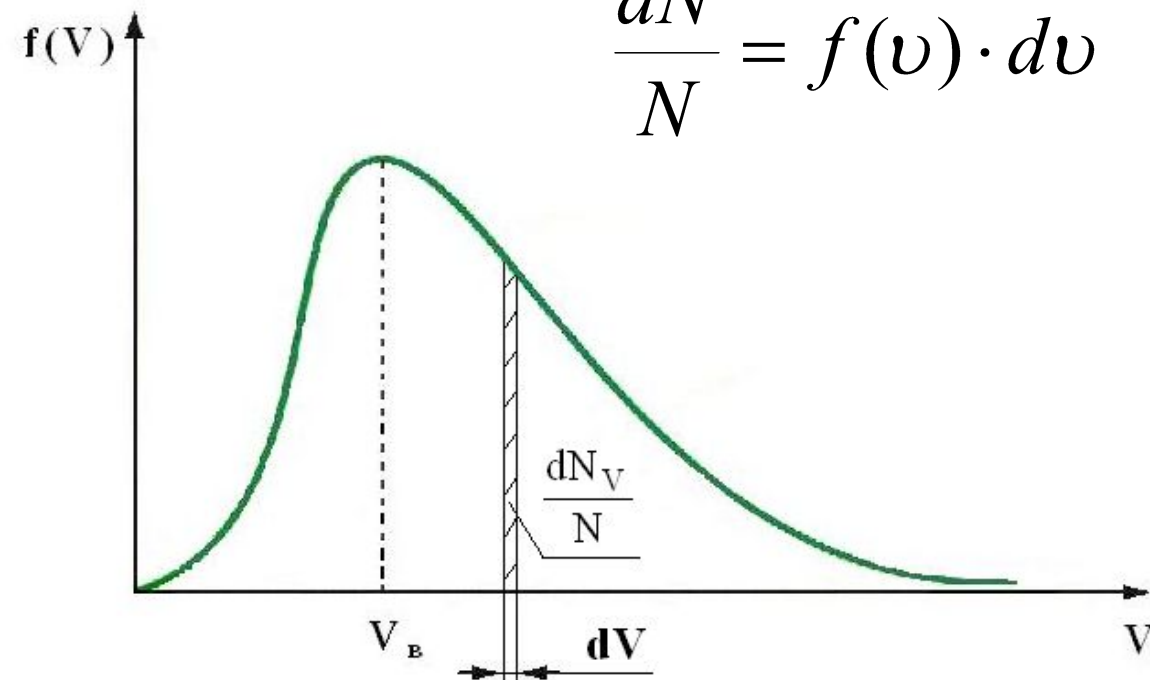
Обозначим:

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

N – общее число молекул газа в данном объеме

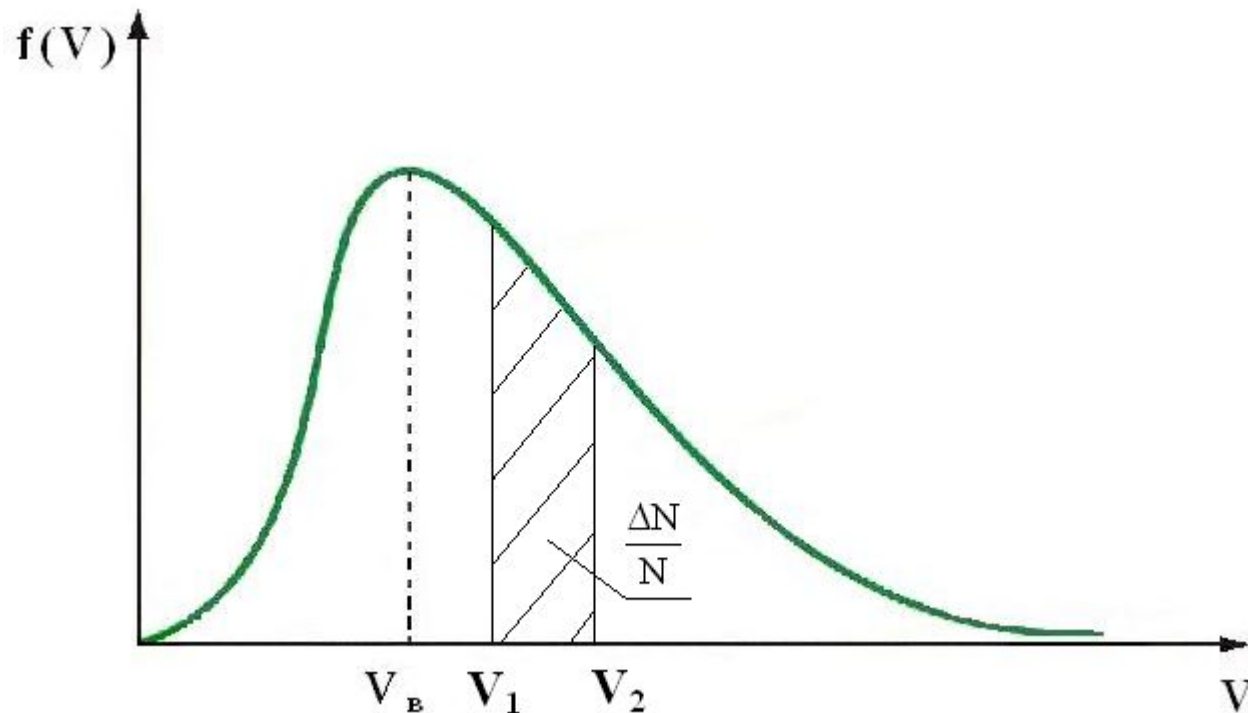
$$\frac{dN}{N} = f(v) \cdot dv$$

- 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:

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

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

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

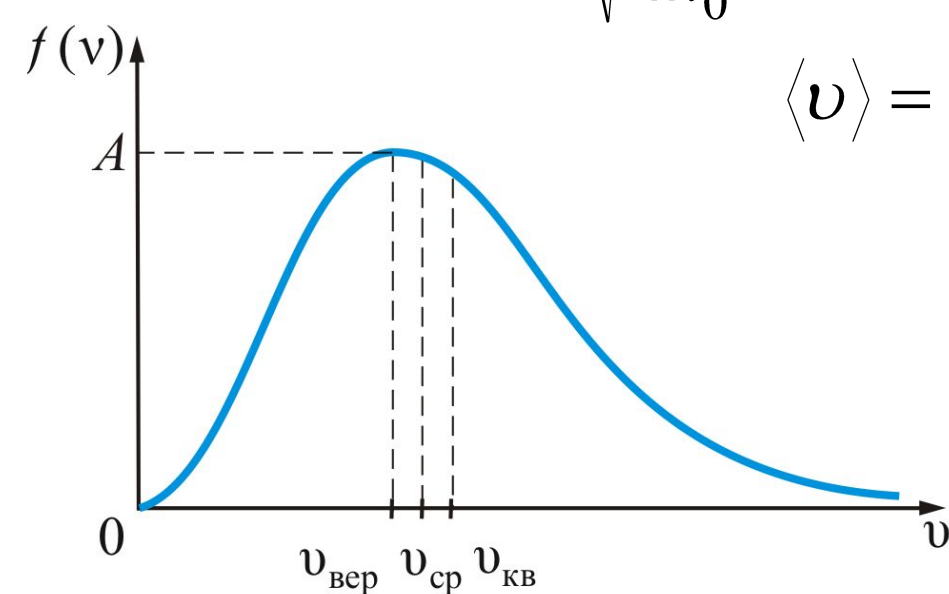
3. Нахождение средней кинетической энергии молекул

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

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

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

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



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



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 $(h + dh)$

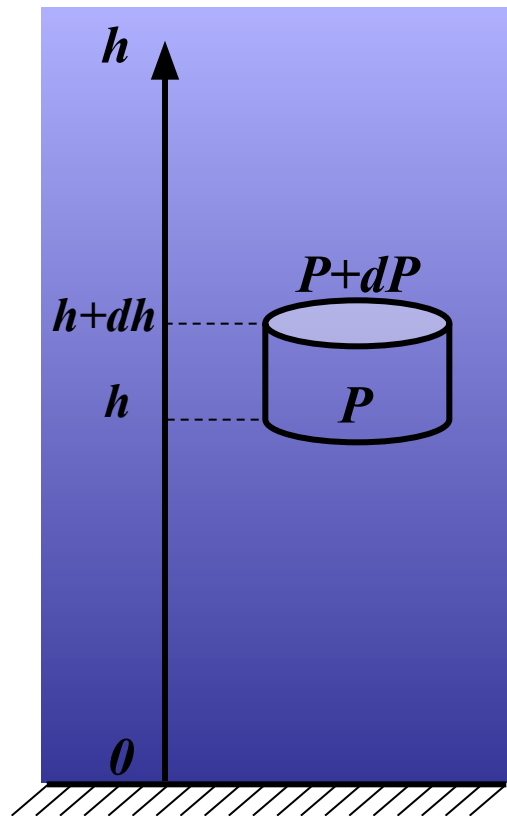
$$dh > 0 \quad dP < 0$$

(на большей высоте давление меньше)

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

ρ — плотность газа

g — ускорение свободного падения



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

$T, g, \mu, R - \text{const}$ (не меняются с высотой)

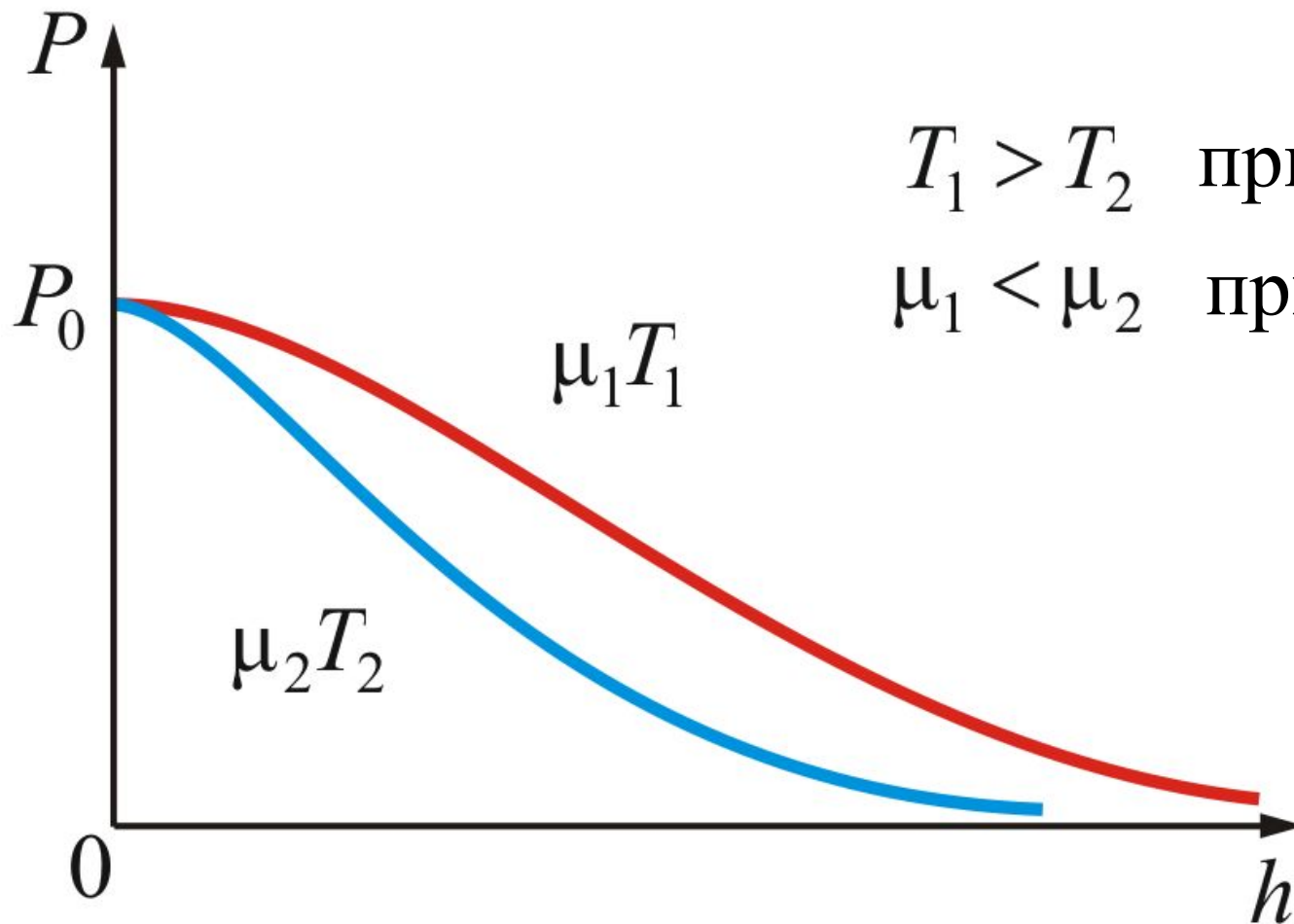
$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = -\frac{\mu g}{RT} \int_0^h dh \rightarrow \ln(P) - \ln(P_0) = -\frac{\mu g h}{RT}$$

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

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

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

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)

$$P = nkT$$

$$P_0 = n_0 kT$$

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

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right) \quad \longrightarrow \quad \cancel{nkT} = \cancel{n_0 kT} \exp\left(-\frac{\mu gh}{RT}\right)$$

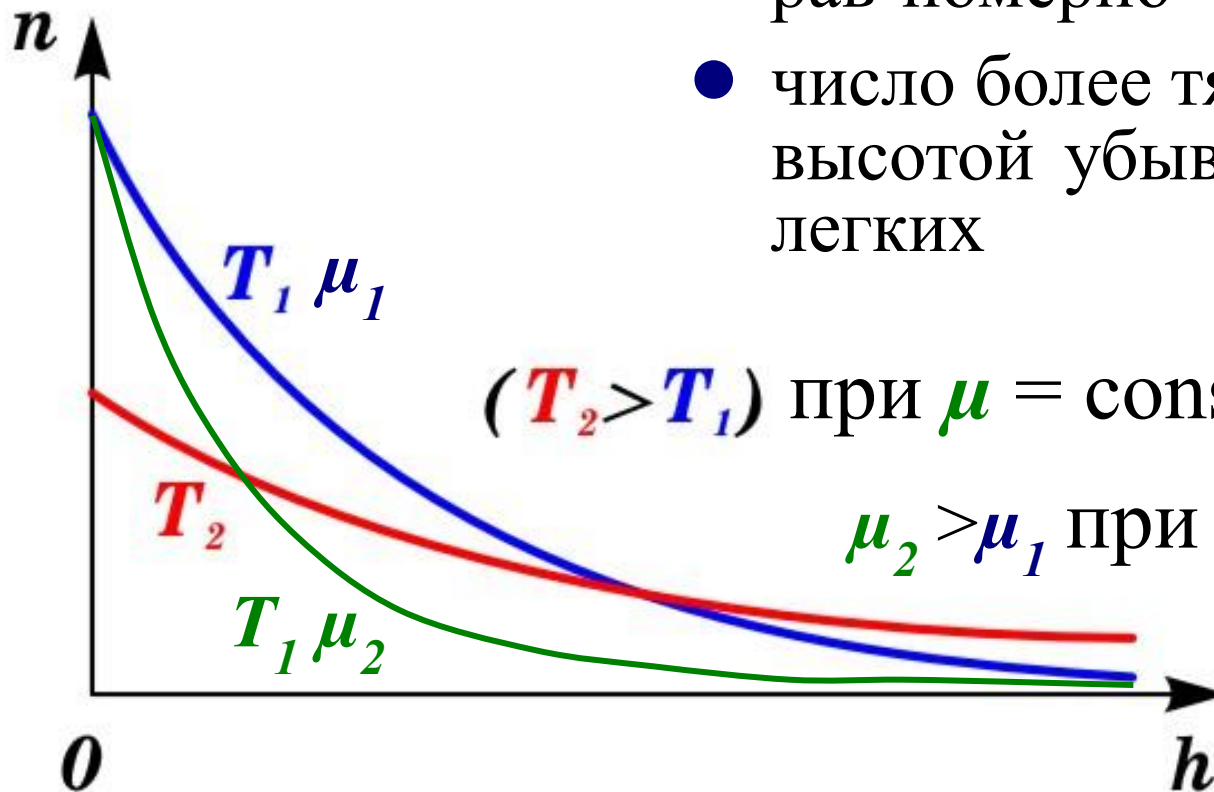
$$\left. \begin{array}{l} \mu = m_0 N_A \\ R = N_A k \end{array} \right\} \quad n = n_0 \exp\left(-\frac{\cancel{m_0 N_A} gh}{\cancel{k N_A} T}\right) \quad n = n_0 \exp\left(-\frac{m_0 gh}{kT}\right)$$

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



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

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

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

$E_n = m_0 g h$ – 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.

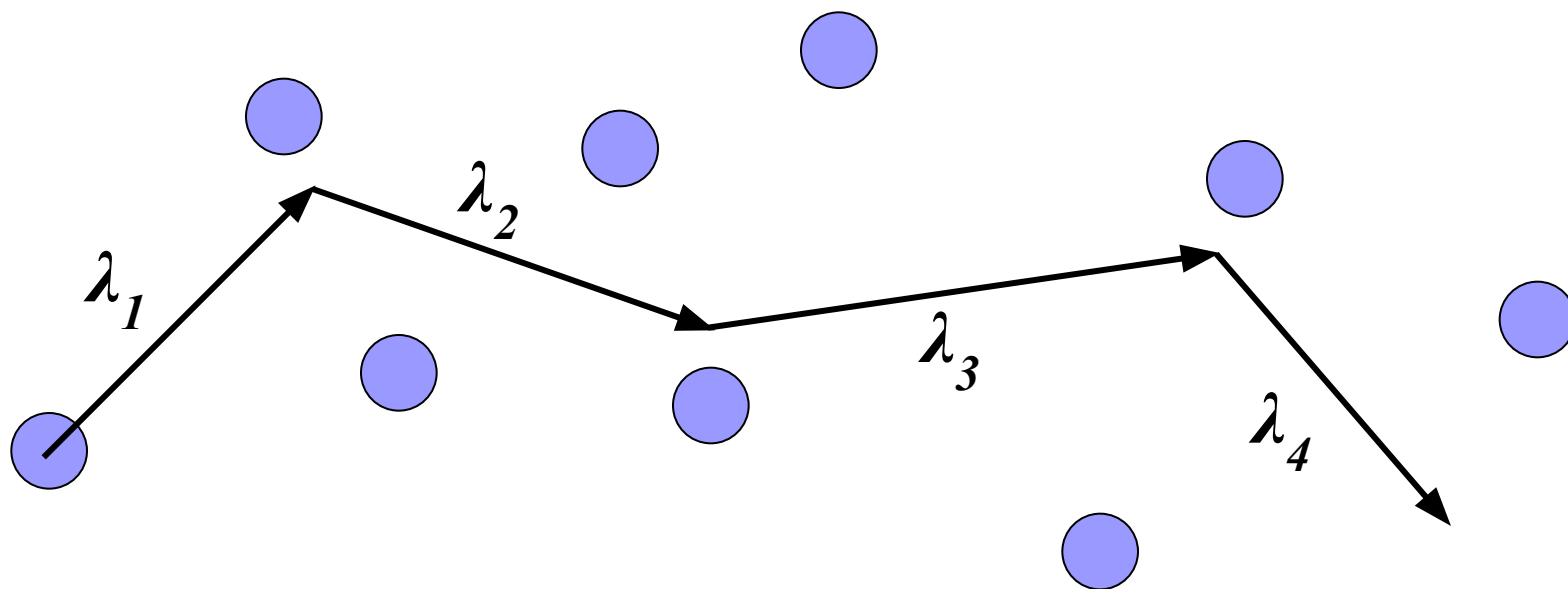
Оно устанавливается в результате совместного действия потенциального поля и теплового движения.



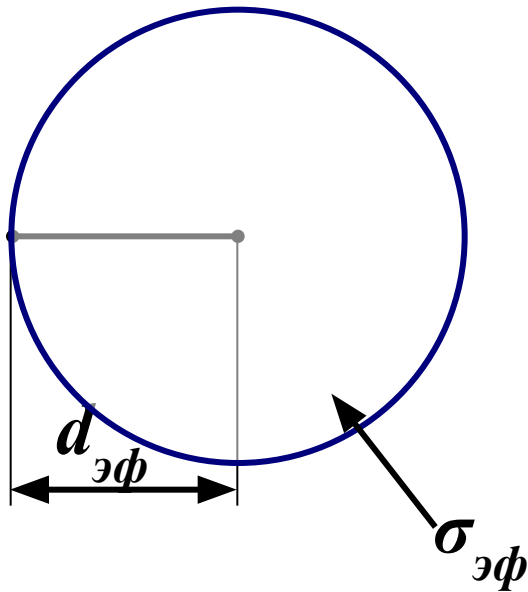
ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА в неравновесных системах

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).

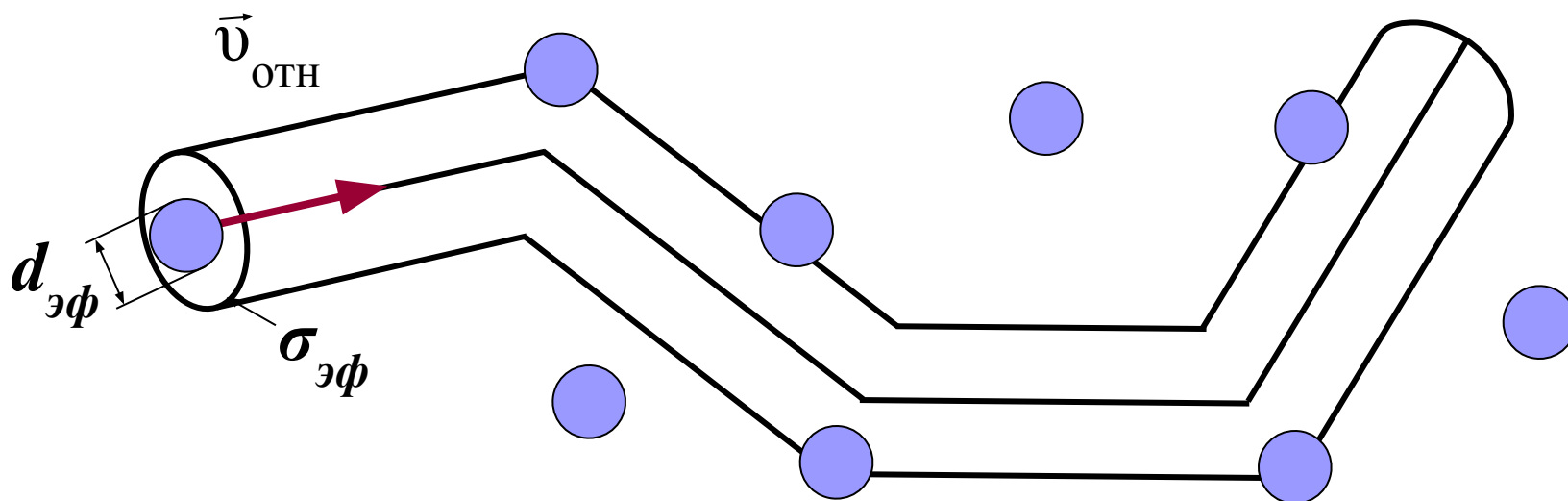
$$\sigma_{эф} = \pi d_{эф}^2$$

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 $\sigma_{эф}$.



$$V = \sigma_{эф} \cdot \langle v_{отн} \rangle \quad - \text{объем цилиндра}$$

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

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

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

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

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

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

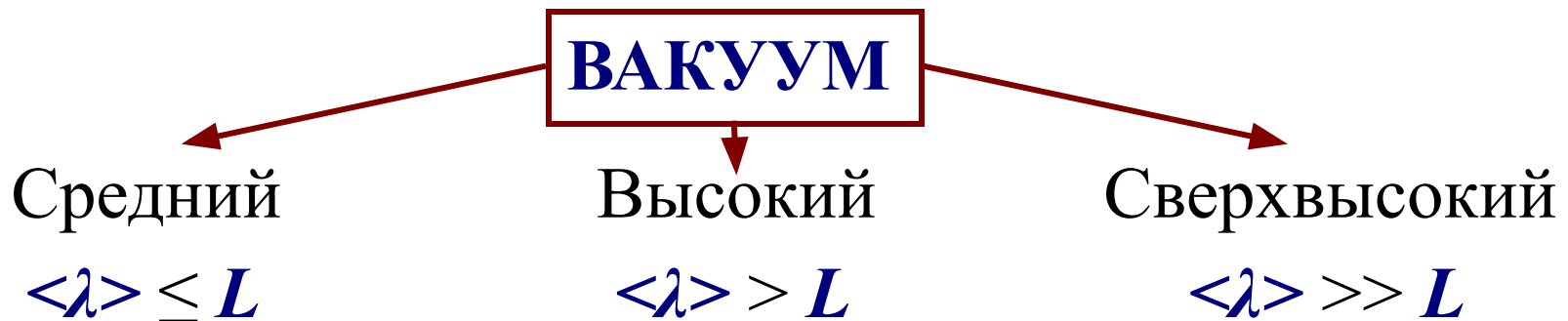
При нормальных условиях ($T = 300 \text{ K}$ и $P = 10^5 \text{ Па}$)
для газа с $d_{\text{эф}} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ (азот):

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

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

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.

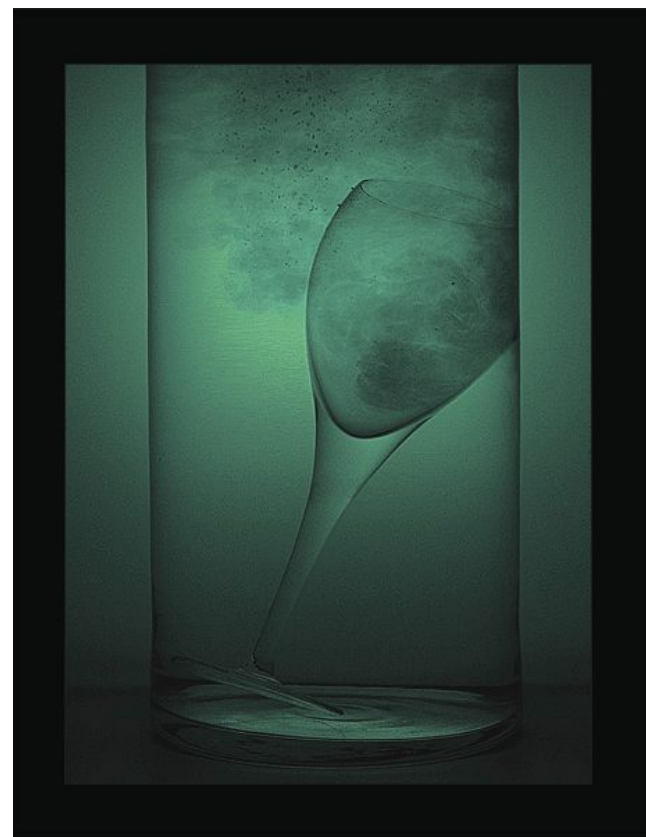
Процессы выравнивания сопровождаются направленным переносом ряда физических величин (массы, энергии, импульса и т.д.) и поэтому называются явлениями переноса.

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



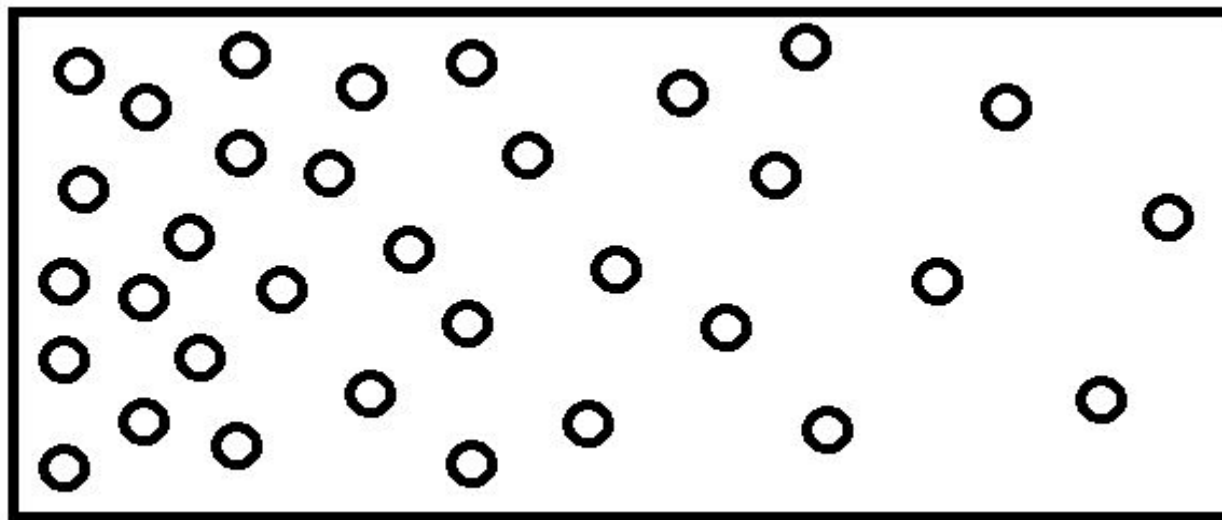
При диффузии масса переносится из мест с большей концентрацией в места с меньшей концентрацией, что приводит к ее равномерному распределению по занимаемому объему.

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



$grad(\rho)$

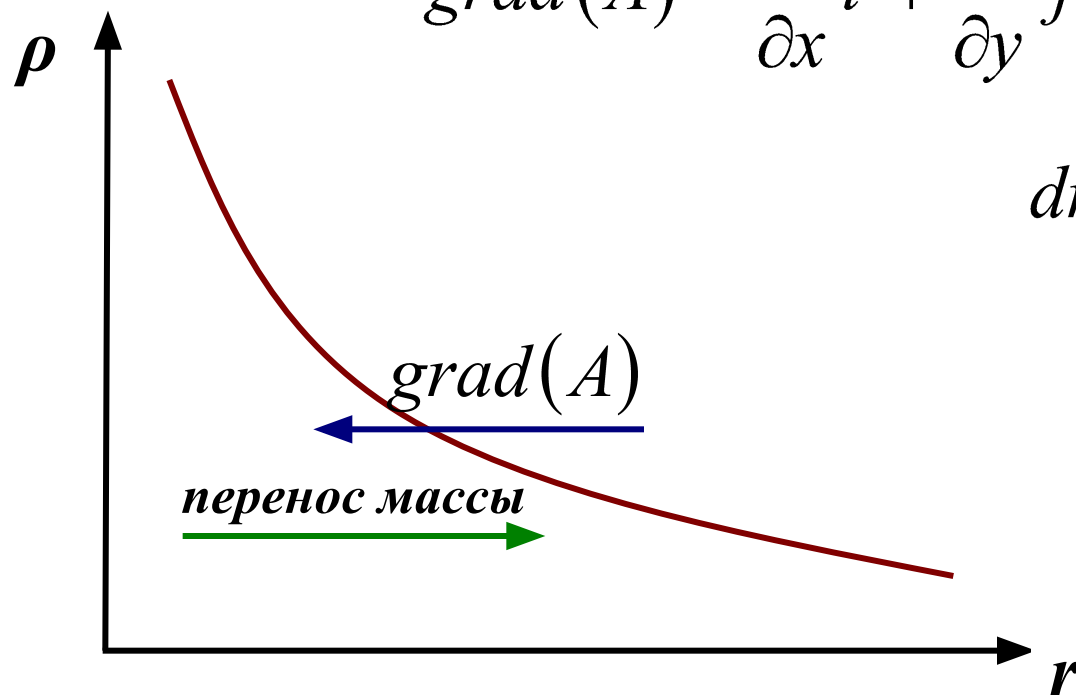


перенос массы

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

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



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

$$A \rightarrow \rho$$

$$\rho(r)$$

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

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)

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

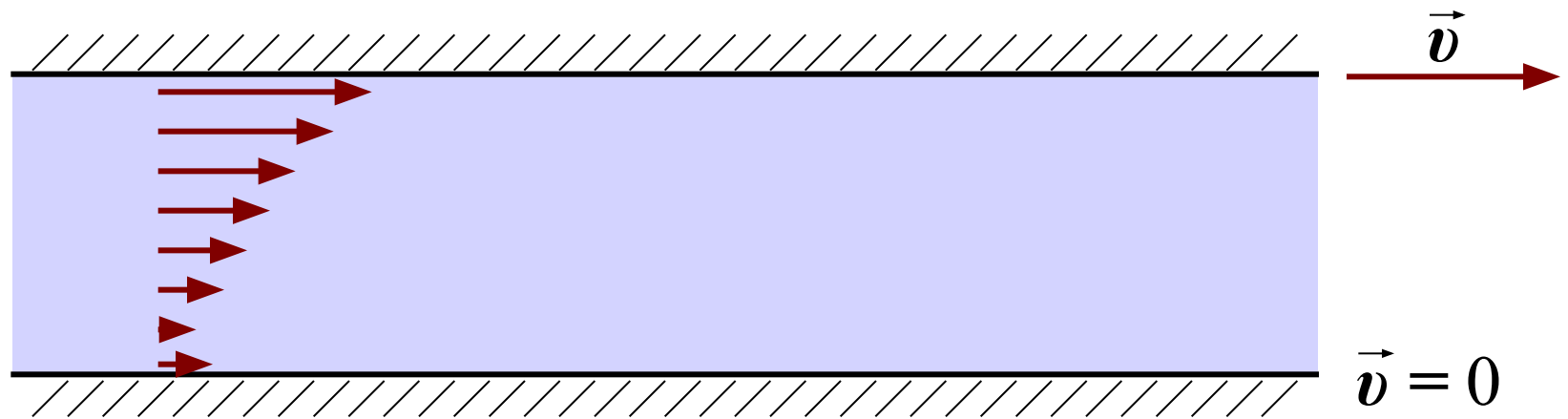
Согласно кинетической теории газов: $D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle$

$\langle v \rangle$ – средняя скорость молекул

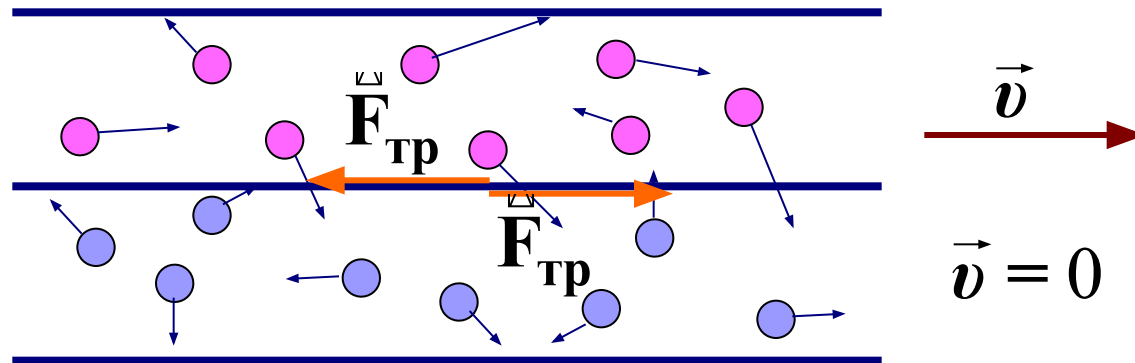
$\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул

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

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 «—» означает, что направление переноса импульса и направление возрастания скорости противоположны.

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

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

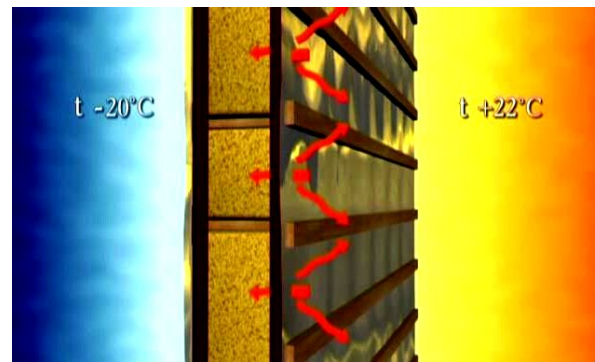
ρ — плотность газа

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

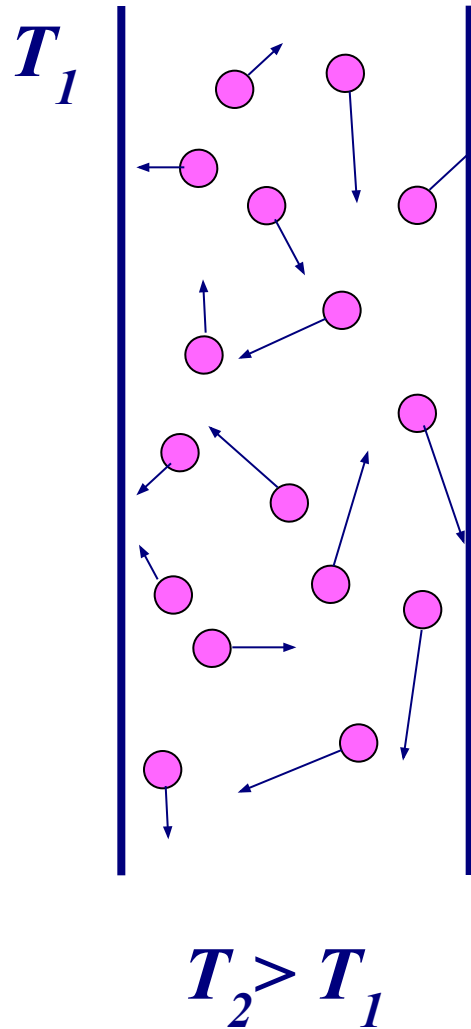
В) Теплопроводность – процесс выравнивания температуры, сопровождающийся направленным переносом тепловой энергии из более нагретых слоев в менее нагретые за счет хаотического движения молекул.



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, переноса 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 δQ , переносимое в стационарном процессе теплопроводности за время dt через площадку $dS_{\perp}$, перпендикулярную направлению переноса, прямо пропорционально проекции градиента температуры $\frac{dT}{dr}$ 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

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

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

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

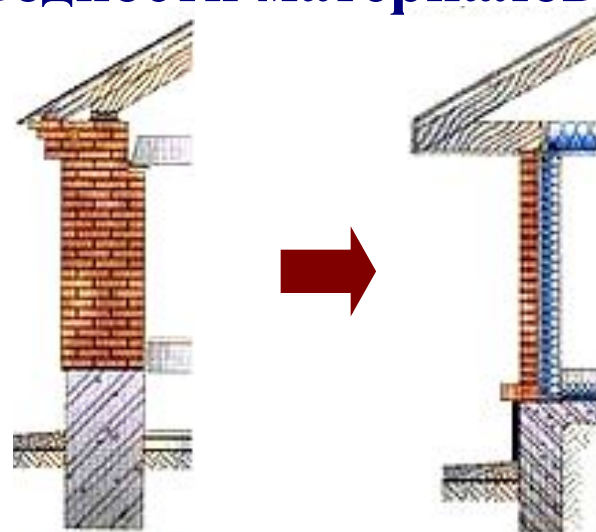
В состоянии высокого вакуума: $\chi \sim \rho$



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

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

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

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

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

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

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

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

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