

Молекулярная физика и термодинамика

Молекулярная физика и термодинамика — разделы физики, в которых изучаются зависимости свойств тел от их строения, взаимодействия между частицами, из которых состоят тела, и характера движения частиц.

Методы

Молекулярно-кинетический

Метод исследования систем из большого числа частиц, оперирующий статистическими закономерностями и средними (усредненными) значениями физических величин, характеризующих всю систему.

Термодинамический

Метод исследования систем из большого числа частиц, оперирующий величинами, характеризующими систему в целом (например, давление, объем, температура) при различных превращениях энергии, происходящих в системе, не учитывая при этом внутреннего строения изучаемых тел и характера движения отдельных частиц.

Термодинамическая система

Термодинамическая система — это совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой).

Термодинамические системы, не обменивающиеся с внешней средой ни энергией, ни веществом, называются **замкнутыми**.

Состояние системы задается термодинамическими параметрами (параметрами состояния) — совокупностью физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы. Обычно в качестве параметров состояния выбирают **температуру T , давление P и объем V** .

Если для данной системы внешние условия не изменяются и состояние системы с течением времени не меняется, то эта система находится в **термодинамическом равновесии**.

Идеальный газ.

**Идеальный
газ**

модель

**Реальный
газ**

1. Межмолекулярные силы притяжения отсутствуют (можно пренебречь потенциальной энергией).
2. Взаимодействия молекул газа происходят только при их соударениях и являются упругими.
3. Молекулы газа не имеют объема и рассматриваются как материальные точки.

Температура

Температура T – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия системы и определяющая направление теплообмена между телами.

**ТЕМПЕРАТУРА – МЕРА
КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ**

Средняя кинетическая энергия движения молекул пропорциональна абсолютной температуре

$$E = \frac{3}{2} kT$$

k – постоянная Больцмана:

$$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Количество вещества

Количество вещества ν – физическая величина, определяемая числом специфических структурных элементов (молекул, атомов или ионов) из которых состоит вещество.

Единица количества вещества — моль — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится в 0,012 кг изотопа углерода ^{12}C .

В одном моле различных веществ содержится одно и то же число молекул N_A , называемое числом Авогадро.

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{МОЛЬ}}$$

Закон Авогадро: моли любых газов при одинаковой температуре и давлении занимают одинаковые объемы.

При нормальных условиях ($T = T_0, p = p_0$) этот объем V_μ (**молярный объем**) равен:

$$V_\mu = 22,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{М}^3}{\text{МОЛЬ}}$$

Молярная масса $\mu = \frac{m}{\nu}$ — это масса одного моля вещества. Отсюда: $\nu = \frac{m}{\mu}$

Единица молярной массы — килограмм на моль (кг/моль).

Формулы количества вещества ν

$$\nu = \frac{N}{N_A}$$

$$\nu = \frac{m}{M}$$

N – число частиц вещества

N_A – число Авогадро

ν – количество вещества

m – масса вещества

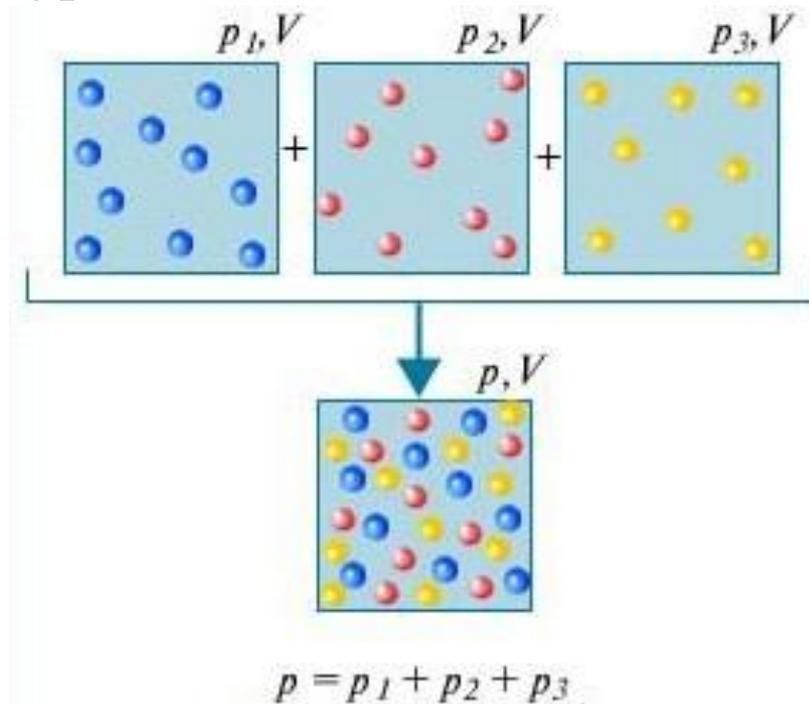
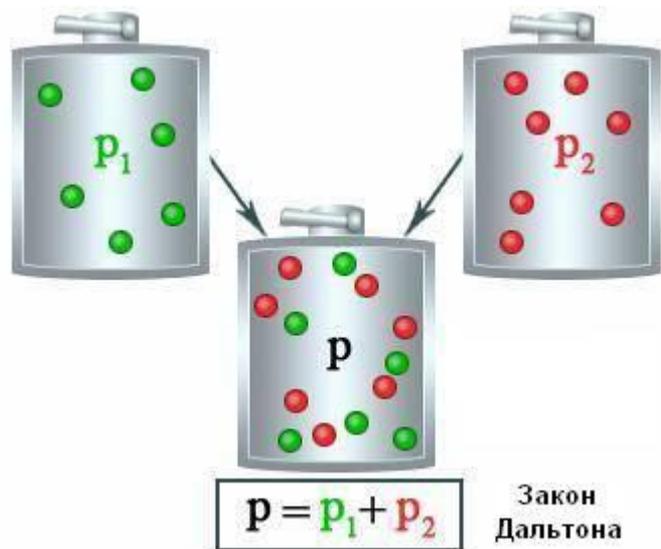
M – молярная масса вещества

Закон Дальтона

Давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений p_1, p_2, \dots, p_n входящих в нее газов:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad \text{или} \quad p = \sum_n p_n$$

Парциальное давление – давление, которое производил бы газ, входящий в состав смеси, если бы он один занимал весь объем, равный объему смеси при той же температуре.



Молекулярно-кинетическая теория

Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) объясняет физические явления и свойства тел с точки зрения их внутреннего микроскопического строения.

Основные положения молекулярно-кинетической теории:

- ❖ Все вещества состоят из атомов или молекул.
- ❖ Все молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении.
- ❖ Все молекулы взаимодействуют друг с другом.

Подтверждения МКТ

Диффузия

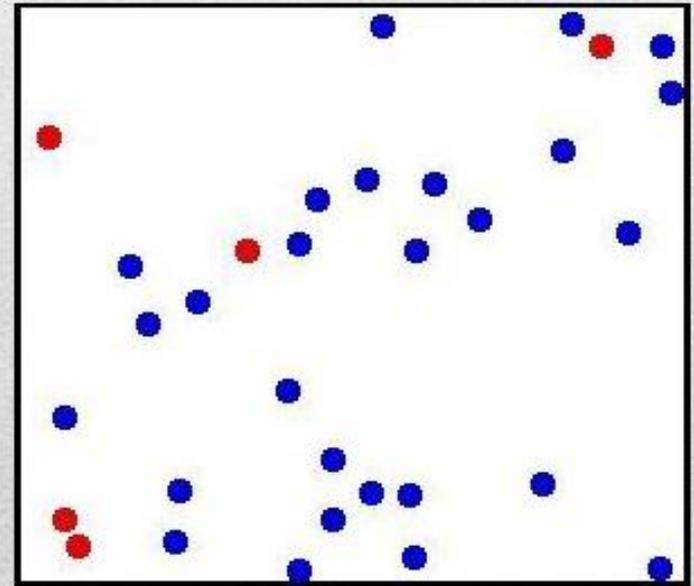
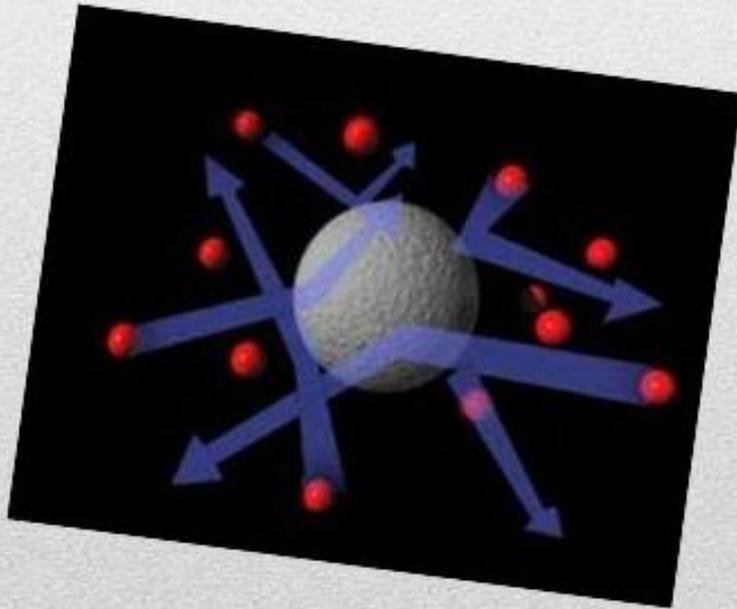
Диффу́зия (лат. diffusio — распространение, растекание, рассеивание, взаимодействие) — процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекулами или атомами другого, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому объёму.



Подтверждения МКТ

Броуновское движение

Броуновское движение — беспорядочное движение микроскопических видимых, взвешенных в жидкости или газе частиц твердого вещества, вызываемое тепловым движением частиц жидкости или газа. Броуновское движение никогда не прекращается.

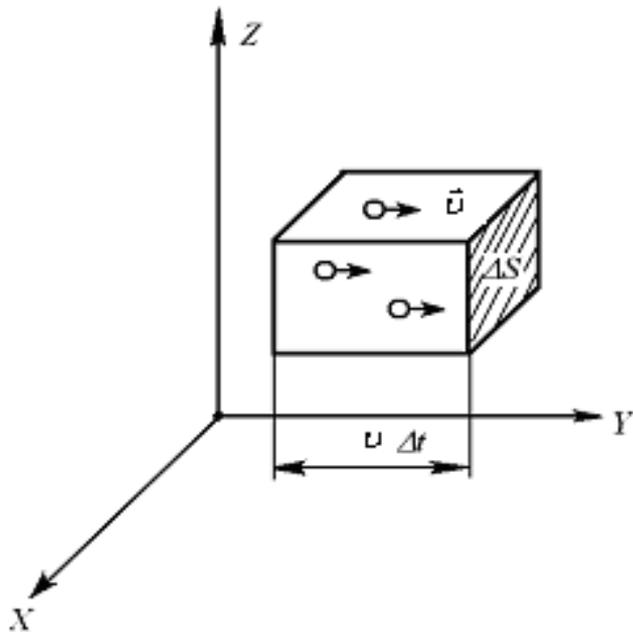


Вывод основного уравнения МКТ

Цель: получить связь между макропараметрами – давлением P , температурой T , и микропараметрами – массой молекулы m , её скоростью V и концентрацией молекул n .

Вывод основного уравнения МКТ:

Пусть имеется некоторый сосуд с газом. Будем считать, что молекулы могут двигаться вдоль осей x , y , z . Выберем на стенке сосуда участок поверхности.



Если в сосуде N молекул, то вследствие равновероятности этих направлений вдоль каждой оси будет двигаться $\frac{N}{3}$ молекул. Половина из них движется вдоль данного направления, т.е. $\frac{N}{6}$ (ось имеет два направления).

Вывод основного уравнения МКТ

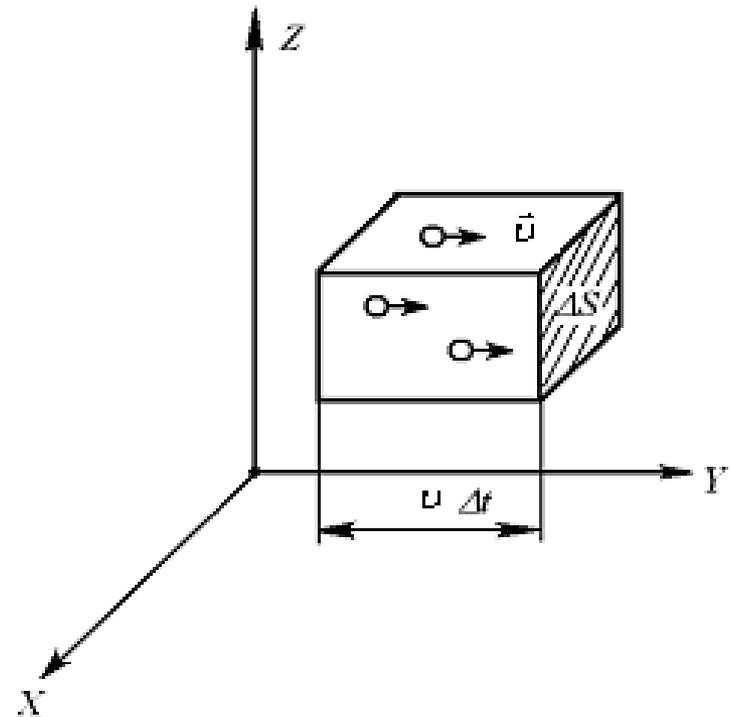
Предположим, что все молекулы движутся с одинаковой скоростью, равной v . Тогда за время Δt до элемента стенки площадью ΔS долетят молекулы, заключённые в объёме параллелепипеда с основанием ΔS и высотой $l = v \Delta t$.

Число этих молекул ΔN равно произведению концентрации молекул $n = \frac{N}{V}$ (где V - объём сосуда) на объём

$$V_l = l \Delta S = v \Delta t \Delta S,$$

т.е. число молекул ΔN , летящих к площади ΔS :

$$\Delta N = \frac{nv \Delta t \Delta S}{6}$$



Вывод основного уравнения МКТ

По закону сохранения импульса каждая молекула при ударе о стенку передаёт ей импульс (удар считается упругим), равный изменению импульса молекулы:

$$\Delta(m_0 v) = m_0 v - (-m_0 v) = 2m_0 v$$

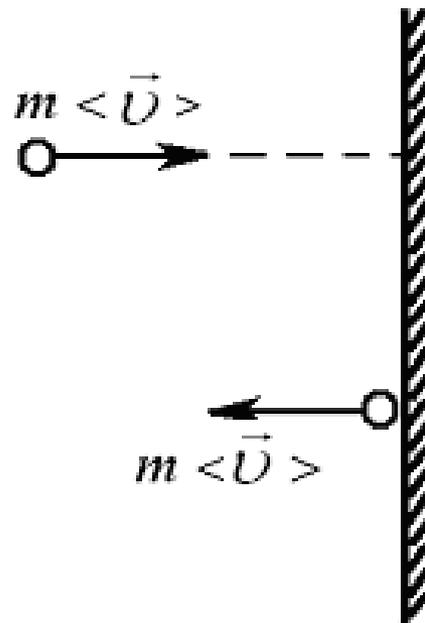
По 2-му закону Ньютона:

$$\Delta(m_0 v) \cdot \Delta N = F_{cp} \Delta t$$

F_{cp} - средняя сила, с которой молекулы действуют на стенку ΔS .

подставляя ΔN и $\Delta(m_0 v)$ в последнее соотношение, получим:

$$2m_0 v \frac{nv \cdot \Delta t \Delta S}{6} = F_{cp} \Delta t$$



Вывод основного уравнения МКТ

$$2m_0 v \frac{nv \cdot \Delta t \Delta S}{6} = F_{cp} \Delta t$$

Поделив правую и левую части на $\Delta t \Delta S$, учитывая, что по определению давления P :

$$P = \frac{F_{cp}}{\Delta S}$$

и производя необходимые сокращения, получим:

$$P = \frac{1}{2} n m_0 v^2$$

или

$$P = \frac{2}{3} n E$$

А так как средняя энергия поступательного движения молекулы:

$$E = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} kT$$



$$P = nkT$$

Уравнение Менделеева-Клапейрона

$$P = nkT$$

Преобразуем полученное уравнение, используя следующие соотношения:

Концентрация n : $n = \frac{N}{V}$, где N – число молекул газа, V – объем.

$$P = \frac{NkT}{V} \quad \Rightarrow \quad PV = NkT$$

Число молекул N выражаем через количество вещества:

$$\nu = \frac{N}{N_A} \quad \Rightarrow \quad N = \nu N_A \quad \Rightarrow \quad PV = \nu N_A kT$$

$$N_A k = R = 8.31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

R – универсальная газовая постоянная

Уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \nu RT$$

Изопроцессы

Процессы, протекающие при неизменном значении одного из термодинамических параметров состояния системы называются **изопроцессами**.

Изобарный
 $P = \text{const}$

Изохорный
 $V = \text{const}$

Изопроцессы

Изотермический
 $T = \text{const}$

Адиабатный
 $S = \text{const}$

Изотермический процесс: $T = \text{const}$

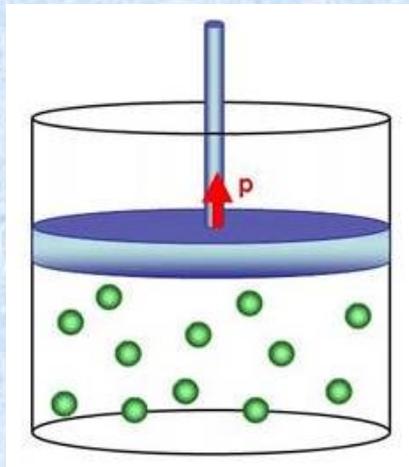
Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре называется **изотермическим**.

Закон Бойля-Мариотта

$$\begin{array}{l} \text{Состояние 1: } P_1 V_1 = \nu R T_1 \\ \text{Состояние 2: } P_2 V_2 = \nu R T_2 \end{array} \Rightarrow T_1 = T_2 \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Уравнение:

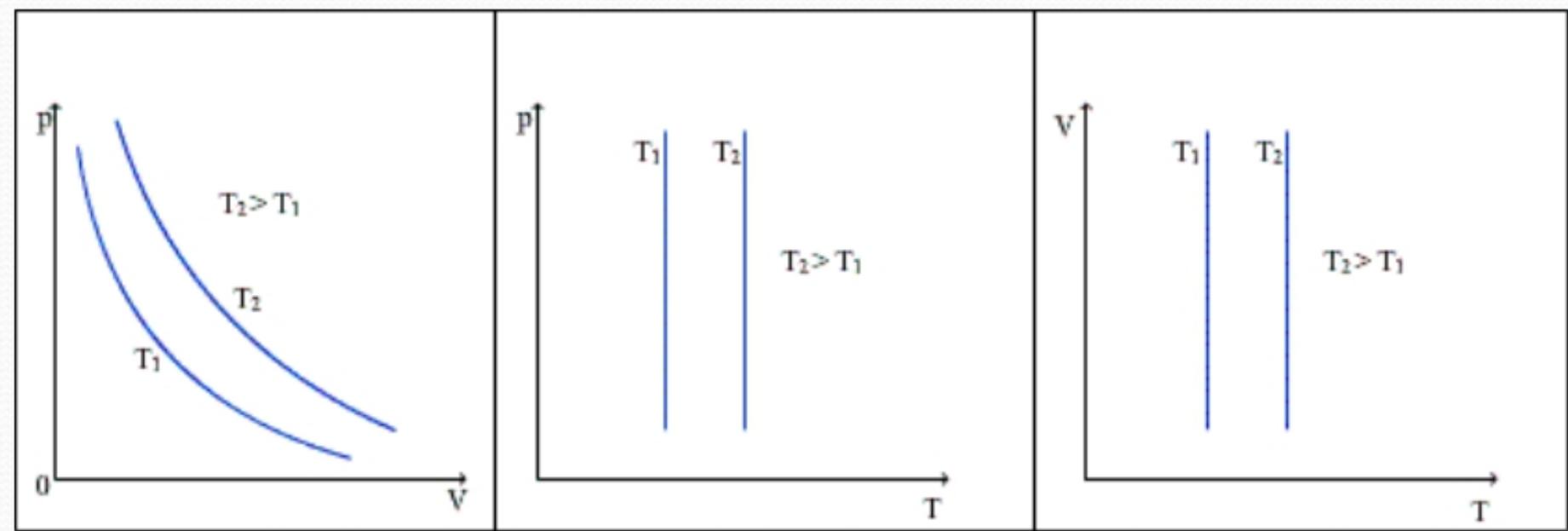
$$P V = \text{const}$$



Если $T = \text{const}$, то
при $V \downarrow$ $p \uparrow$,
и наоборот $V \uparrow$ $p \downarrow$

Изотермический процесс: $T = \text{const}$

Графики



Пример проявления:

А) сжатие воздуха компрессором

Б) расширение газа под поршнем насоса при откачивании газа из сосуда.

Применение закона Бойля-Мариотта

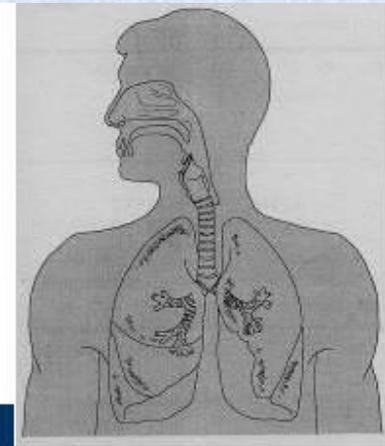


Рис.1

При дыхании межреберные мышцы и диафрагма периодически изменяют объем грудной клетки. Когда грудная клетка расширяется, давление воздуха в легких падает ниже атмосферного, т.е. «срабатывает» изотермический закон ($pV = \text{const}$), и в следствие образовавшегося перепада давлений происходит вдох.

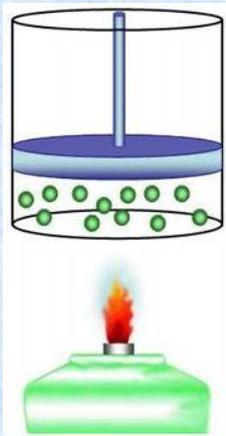
Изобарический процесс: $P = \text{const}$

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называется **изобарическим (изобарным)**.

Закон Гей-Люссака

Состояние 1: $P_1 V_1 = \nu R T_1$ \Rightarrow $P_1 = P_2$ \Rightarrow $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$
Состояние 2: $P_2 V_2 = \nu R T_2$

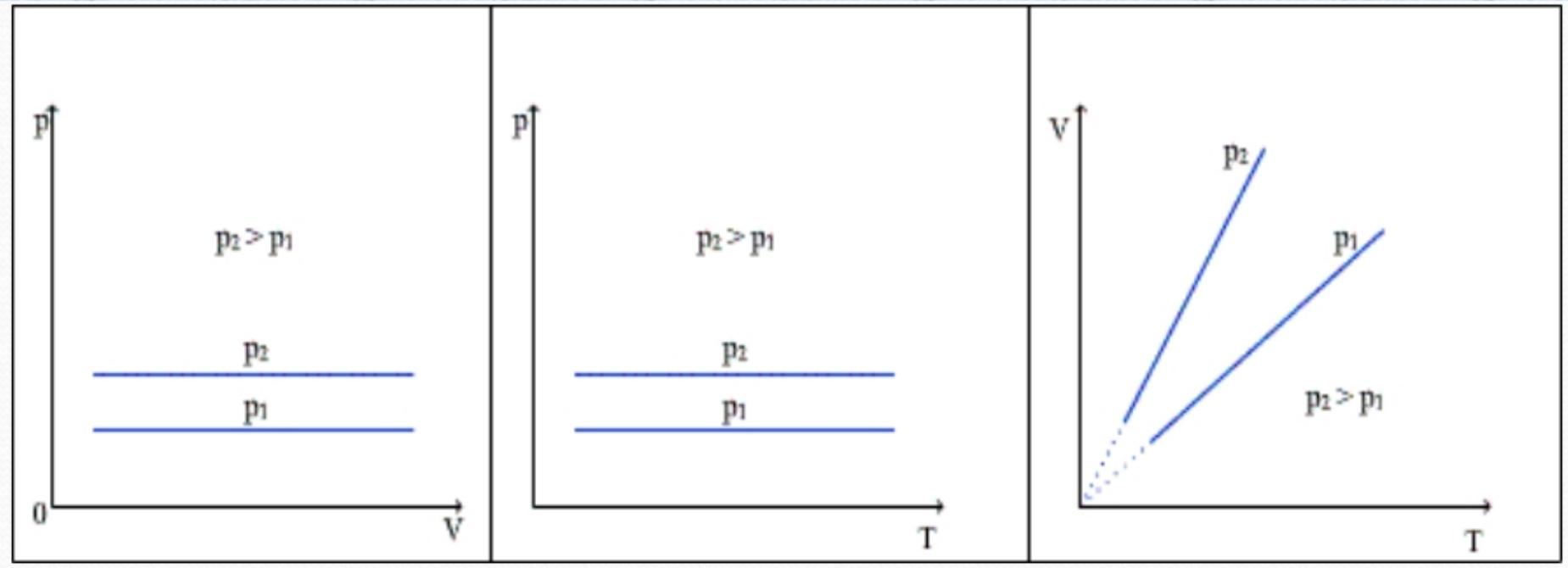
Уравнение: $\frac{V}{T} = \text{const}$



Если $p = \text{const}$, то
при $T \downarrow$ $V \downarrow$,
и наоборот $T \uparrow$ $V \uparrow$

Изобарический процесс: $P = \text{const}$

Графики



Пример проявления:

Расширение газа в цилиндре с подвижным поршнем при нагревании цилиндра

Изохорный процесс: $V = \text{const}$

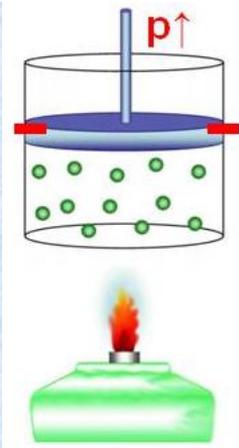
Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме называется **изохорическим (изохорным)**.

Закон Шарля

Состояние 1: $P_1V_1 = \nu RT_1$ \Rightarrow $V_1 = V_2$ \Rightarrow $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$

Состояние 2: $P_2V_2 = \nu RT_2$

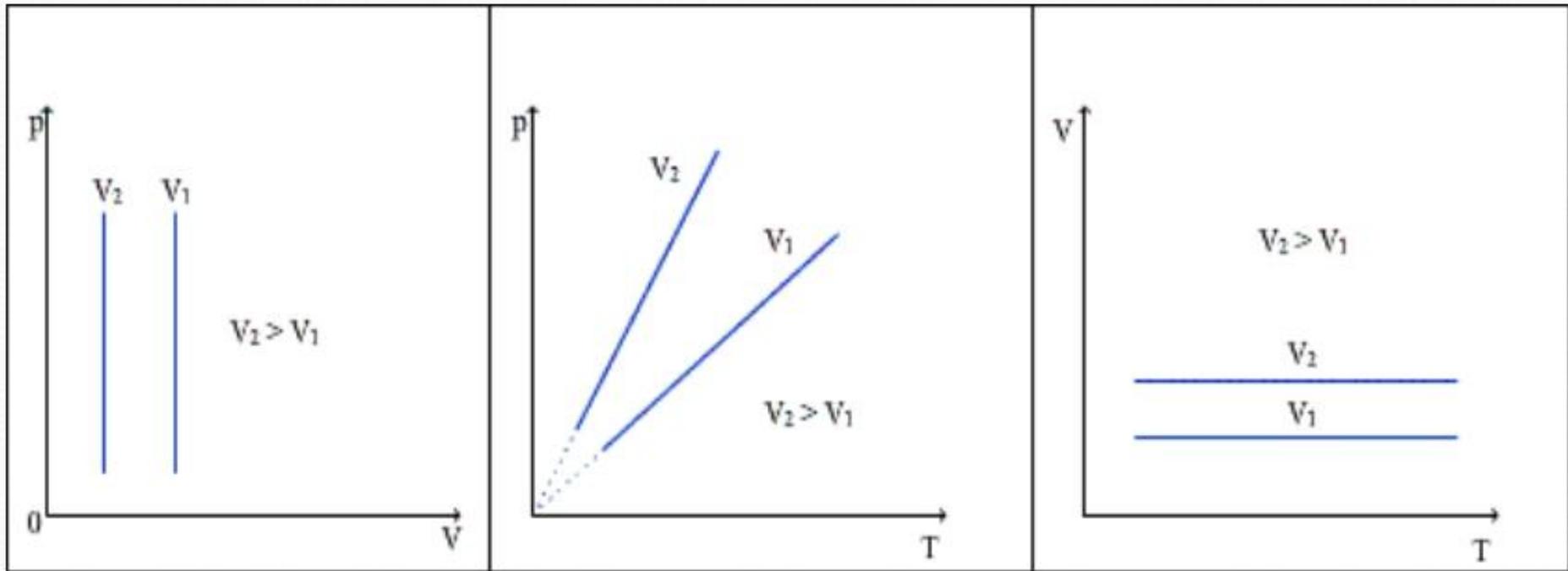
Уравнение: $\frac{P}{T} = \text{const}$



Если $V = \text{const}$, то
при $T \downarrow$ $p \downarrow$,
и наоборот $T \uparrow$ $p \uparrow$

Изохорический процесс: $V = \text{const}$

Графики



Пример проявления:

Нагревание газа любой закрытой емкостью, например в электрической лампочке при ее включении.

Изопроцессы

Название процесса	Постоянный параметр	Формула газового закона	Название газового закона	Графическое представление газового закона
Изотермический	T температура	$p \cdot V = \text{const}$ $p_1 \cdot V_1 =$ $= p_2 \cdot V_2 = \dots$	Бойля – Мариотта	
Изобарный	p давление	$\frac{V}{T} = \text{const}$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \dots$	Гей- Люссака	
Изохорный	V объём	$\frac{p}{T} = \text{const}$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \dots$	Шарля	

Явления переноса

Явлениями переноса называются необратимые процессы в термодинамически неравновесных системах, в которых происходит пространственный перенос энергии (*теплопроводность*), массы (*диффузия*), импульса (*вязкость*).

Явления переноса

Диффузия

Перенос
вещества
(массы)

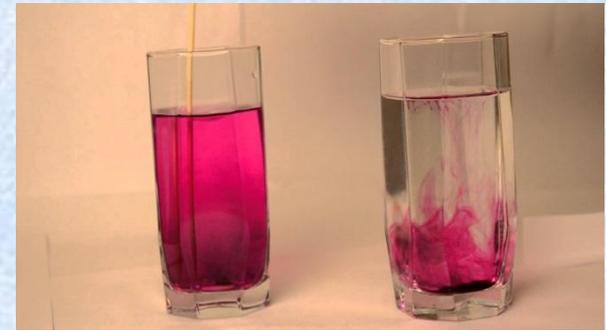
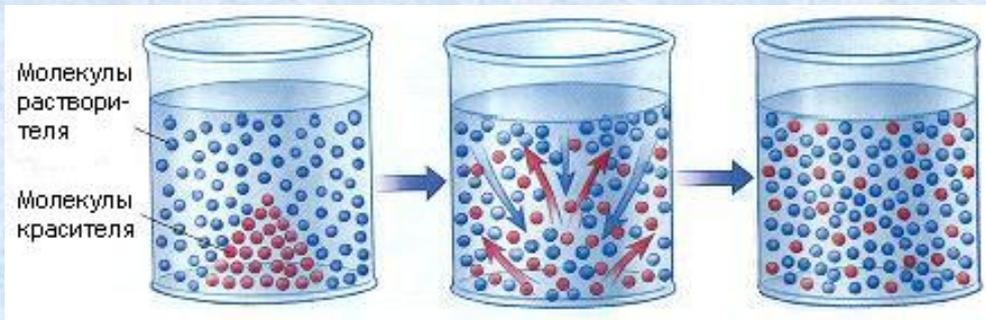
Теплопроводность

Перенос
энергии
(тепла)

Вязкость

Перенос
импульса
(внутреннее
трение)

Диффузия



Явление диффузии заключается в самопроизвольном проникновении и перемешивании частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей или твердых тел.

*Диффузия сводится к обмену частицами (перенос масс) и продолжается пока существует **градиент** (разница) **плотности**.*

Перенос массы (диффузия) для химически однородного газа подчиняется **закону Фика**:

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

Здесь j_m — плотность потока массы — масса вещества, диффундирующего в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси x ,

D — коэффициент диффузии,

$d\rho/dx$ — градиент плотности, равный скорости изменения плотности на единицу длины x в направлении нормали к этой площадке.

ДИФФУЗИЯ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА

Дыхание – перенос кислорода из окружающей среды внутрь организма сквозь его покровы.

БЫСТРЕЕ

чем больше площадь поверхности тела и окружающей среды

МЕДЛЕННЕЕ

чем толще и плотнее покровы тела

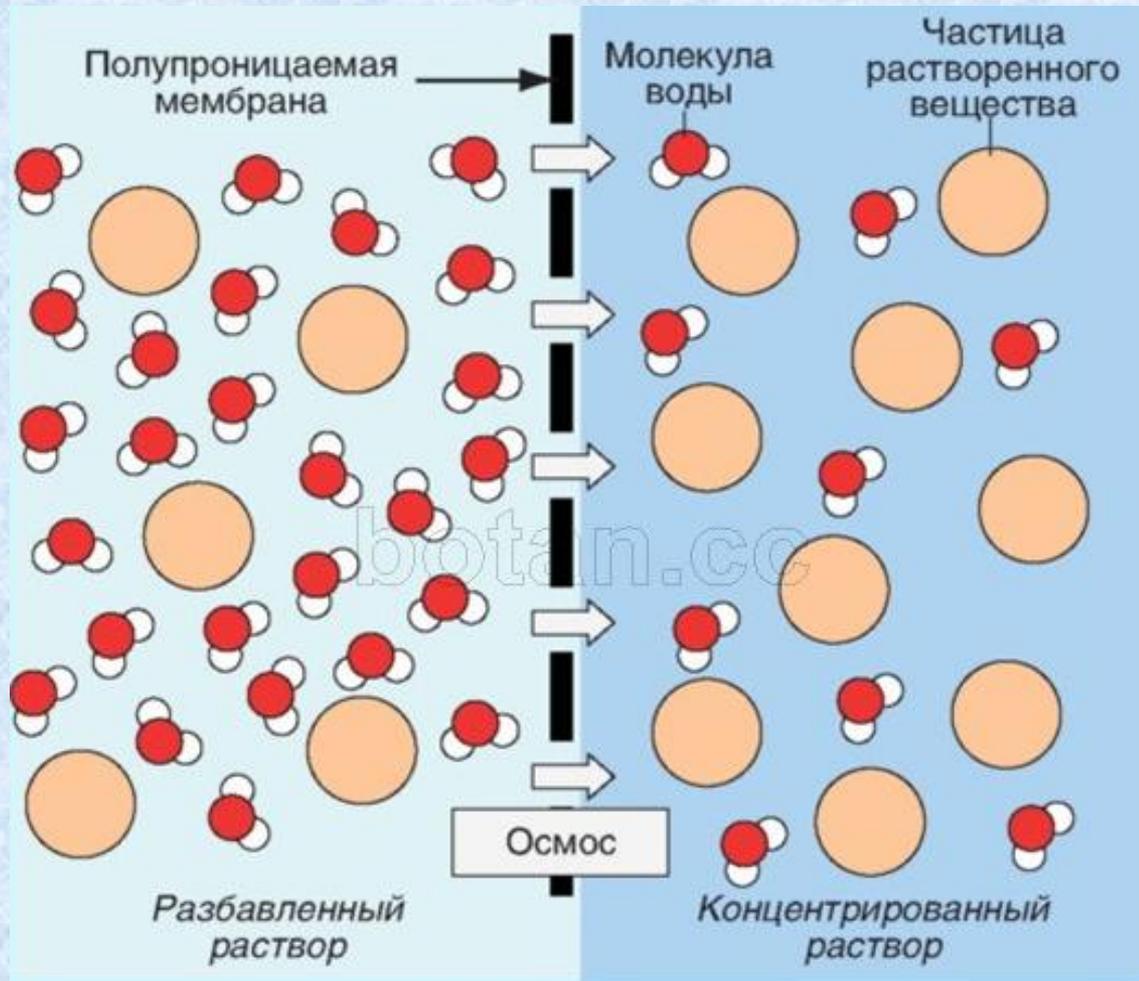
S лёгких – 90-100 кв. м, кожи – 2 кв. м.

Пищеварение: наибольшее всасывание питательных веществ происходит в тонких кишках.

S внутренней поверхности кишечника человека - 0,65 кв.м; за счёт ворсинок достигает 4-5 кв. м.

Осмоз

Осмоз – переход молекул растворителя в раствор с более высокой концентрации растворенного вещества через полупроницаемую перегородку.

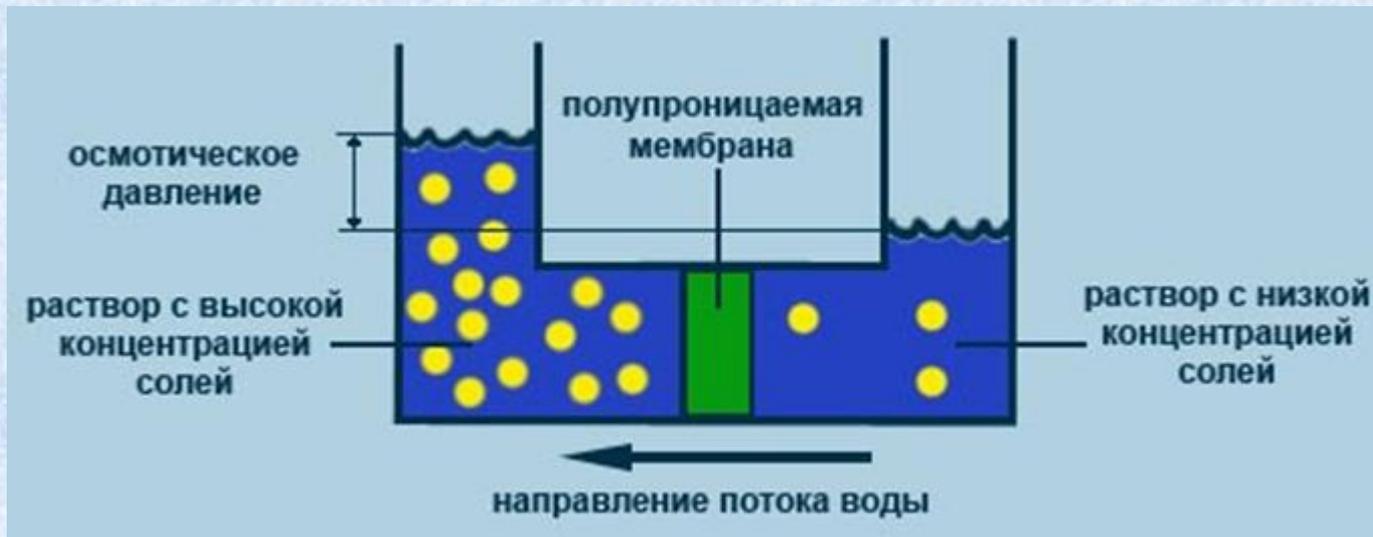


Осмоз

Величина осмотического давления p , создаваемая раствором, зависит от количества, а не от химической природы растворенных в нём веществ:

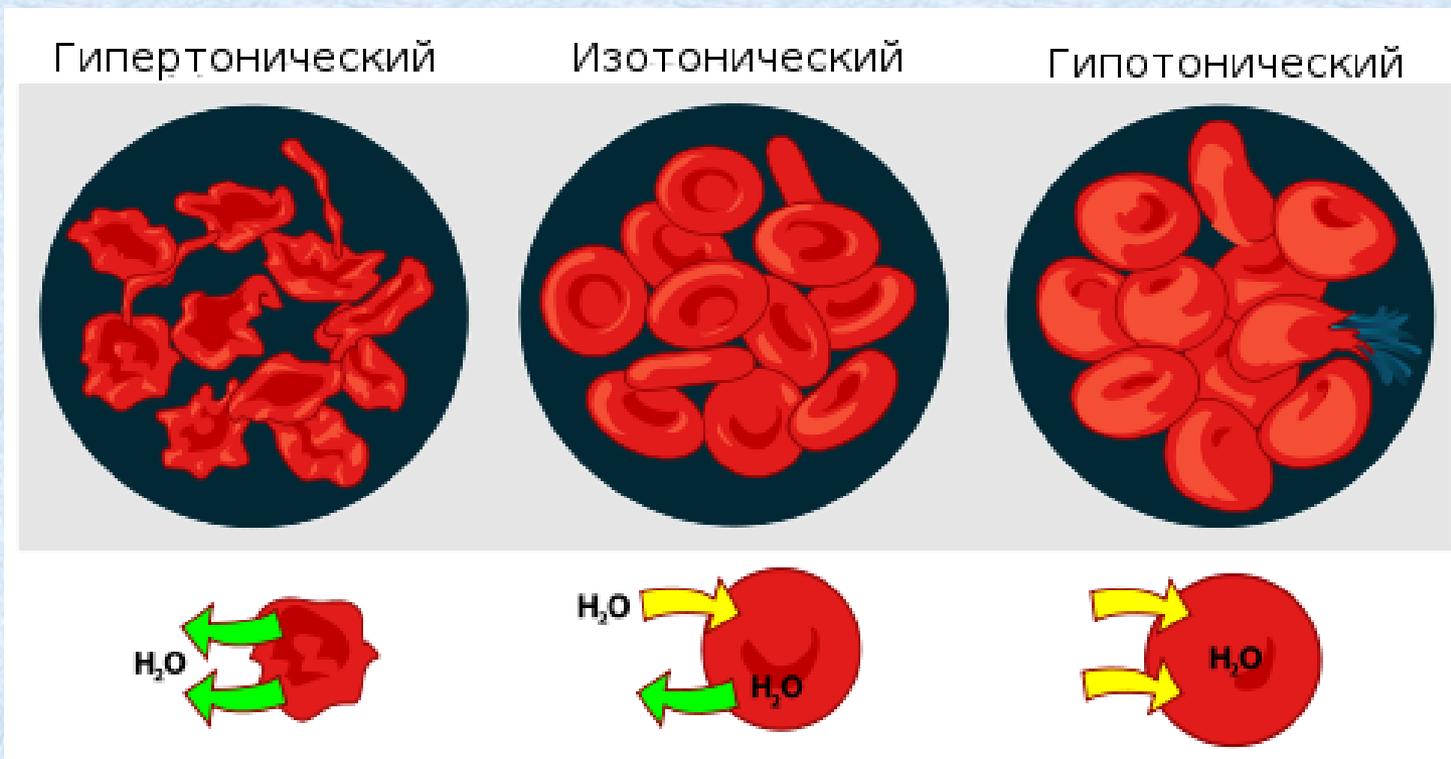
$$p = i \cdot C \cdot R \cdot T$$

где i — изотонический коэффициент раствора; C — молярная концентрация раствора, выраженная через комбинацию основных единиц СИ, то есть, в моль/м³; R — универсальная газовая постоянная; T — термодинамическая температура раствора.



Раствор, имеющий более **высокое осмотическое давление** по сравнению с другим раствором, называется **гипертоническим**, имеющий **более низкое** — **гипотоническим**.

Осмотическое давление в эритроцитах

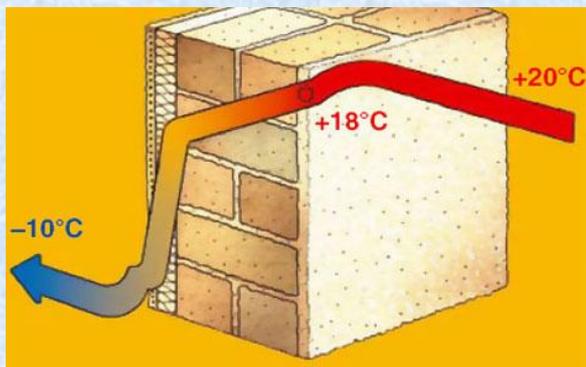


Если находится в замкнутом пространстве, например, в клетке крови, то осмотическое давление может привести к разрыву клеточной мембраны.

Лекарства, предназначенные для введения в кровь, растворяют в изотоническом растворе, содержащем столько хлорида натрия (поваренной соли), сколько нужно, чтобы уравновесить создаваемое клеточной жидкостью осмотическое давление.

Если бы вводимые лекарственные препараты были изготовлены на воде или очень сильно разбавленном (*гипотоническом* по отношению к цитоплазме) растворе, осмотическое давление, заставляя воду проникать в клетки крови, приводило бы к их разрыву.

Теплопроводность



Явление теплопроводности заключается в самопроизвольном переносе кинетической энергии (теплоты) и *продолжается пока существует градиент* (разница) *температур*. Перенос теплоты (теплопроводность) подчиняется **закону Фурье:**

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

Здесь j_E — **плотность теплового потока** — тепловая энергия, переносимая в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную оси x ,

λ — **коэффициент теплопроводности**,

$\frac{dT}{dx}$ — **градиент температуры** — скорость изменения температуры на единицу длины x в направлении нормали к этой площадке,

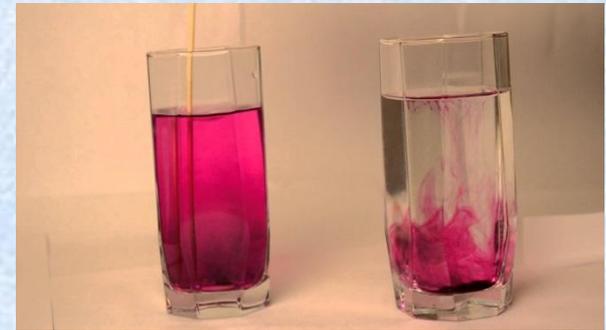
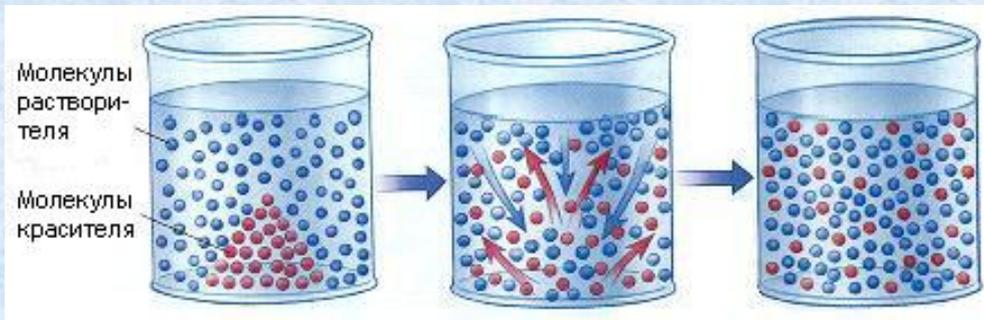
c_V — **удельная теплоемкость газа** при постоянном объеме (количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг газа на 1 К).

Теплопроводность организма

Кожа как теплоизолятор. Кожа и в особенности подкожная жировая ткань — тепловые изоляторы. Теплопроводность жировой ткани составляет лишь одну треть от теплопроводности других тканей. Поэтому кожа эффективна в поддержании постоянной внутренней температуры даже при температуре на поверхности кожи, близкой к температуре среды.

Биологическая ткань человека	Теплопроводность, Вт/(м·град)
Эпидермис	0,21...0,27
Дерма	0,45...0,53
Кожа	0,45...0,5
Кровь	0,53...0,55
Плазма крови	—
Эритроциты крови	—
Жировая ткань	0,2
Мозг	0,5
Миокард	—
Мягкие ткани и мышцы	0,5
Печень	0,43
Почка	0,47
Селезенка	0,46
Тело человека	0,48

Вязкость



Явление вязкости заключается в переносе импульса от между соприкасающимися слоями газа или жидкости. Это приводит к торможению более быстрого слоя и ускорению слоя, движущегося медленнее.

Перенос импульса (вязкость) подчиняется закону Ньютона:

$$j_p = -\eta \frac{dv}{dx}$$

Здесь j_p — **плотность потока импульса** — полный импульс, переносимый в единицу времени в положительном направлении оси x через единичную площадку, перпендикулярную оси x ,

η — **динамическая вязкость**,

$\frac{dv}{dx}$ — **градиент скорости**, показывающий быстроту изменения скорости в направлении x , перпендикулярном направлению движения слоев газа.

Вязкость – сила внутреннего трения

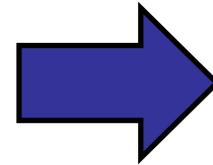
$$j_p = -\eta \frac{dv}{dx}$$

Другая запись закона Ньютона:

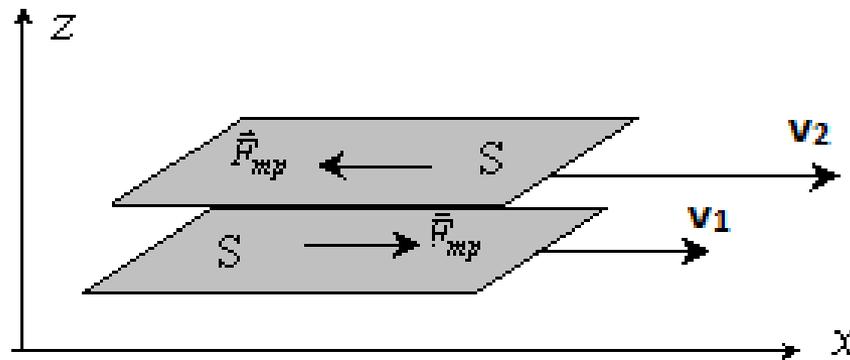
Плотность потока импульса:

$$\vec{j}_p = \frac{\vec{dp}}{Sdt} = \frac{m\vec{a}}{S} = \frac{\vec{F}}{S}$$

$$\frac{F}{S} = -\eta \frac{dv}{dx}$$



$$F = -\eta \frac{dv}{dx} S$$



Относительная вязкость крови

НОРМА	4,2 – 6
АНЕМИЯ	2 – 3
ПОЛИЦИТАМИЯ	15 – 20
МУЖЧИНЫ	4,3 – 1,7
ЖЕНЩИНЫ	3,9 – 4,9

Вязкость крови зависит от концентрации эритроцитов и белков плазмы, от их состава, от размеров клеток крови, эластичности мембран эритроцитов.

$$\eta = \frac{\eta_{\text{жидкости}}}{\eta_{\text{воды}}}$$

- относительная вязкость