

## Содержание:

image not found or type unknown



## Введение



полупроницаемая мембрана

Диффузия - (лат. diffusio

«распространение, растекание, рассеивание; взаимодействие») — процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекулами или атомами другого вещества, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому объёму. В некоторых ситуациях одно из веществ уже имеет выровненную концентрацию и говорят о диффузии одного вещества в другом. При этом перенос вещества происходит из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией (противоположно направлению вектора градиента концентрации).

# БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

(Р. Броун англ. 1827 г.)

*движение очень мелких твердых частиц (броуновских), находящихся в жидкости*



**ПРИЧИНА** → непрерывное движение молекул

## БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

никогда  
не прекращается

тела состоят  
из отдельных частиц – молекул

молекулы непрерывно  
беспорядочно  
движутся

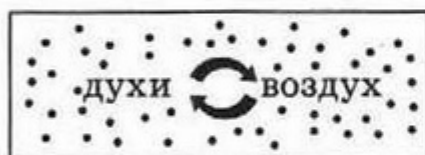
# ДИФфуЗИЯ

*явление, при котором происходит взаимное проникновение молекул одного вещества между молекулами другого*

**ПРИЧИНА** → молекулы движутся непрерывно и беспорядочно

## ДИФфуЗИЯ В ГАЗАХ

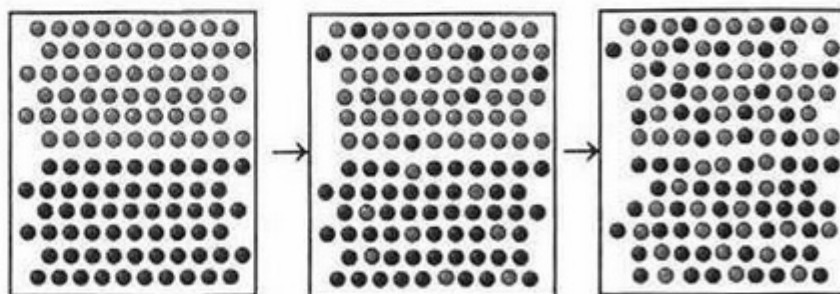
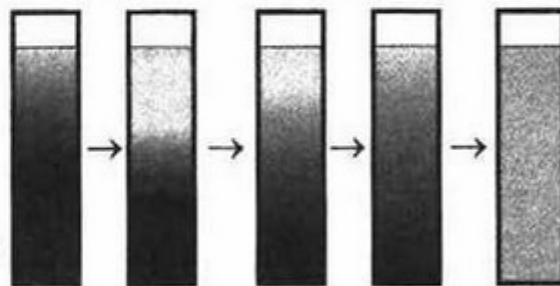
(за несколько минут)



## ДИФфуЗИЯ В ЖИДКОСТЯХ

(за 2-3 недели)

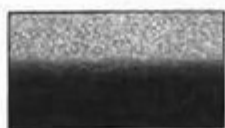
вода  
↻  
медный купорос



## ДИФфуЗИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

(за несколько лет при 20 °C)

свинец  
↻  
на 1 мм  
ЗОЛОТО



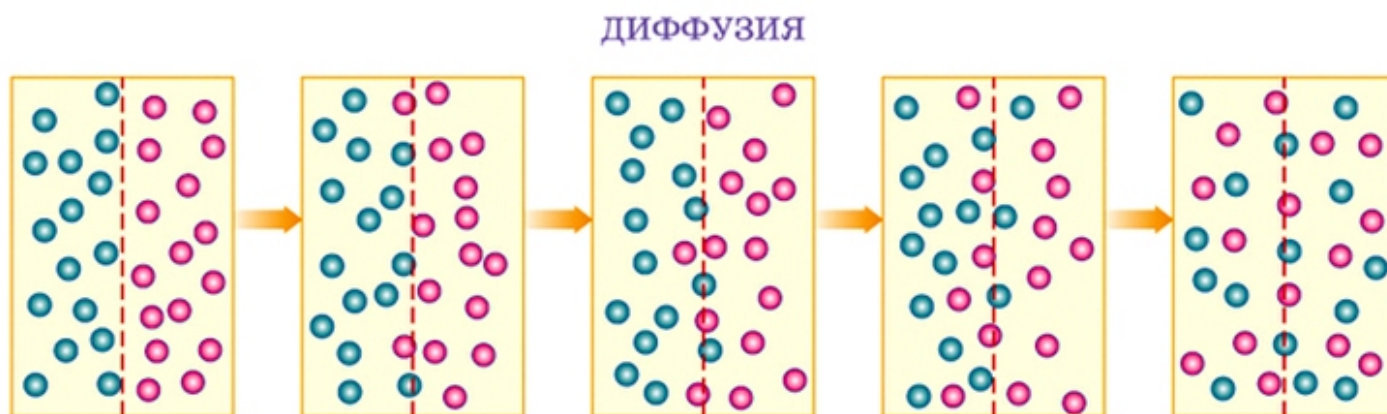
$t^{\circ}\uparrow \rightarrow \uparrow$  скорость движения молекул  $\rightarrow \uparrow$  скорость диффузии

Примером диффузии может служить перемешивание газов (например, распространение запахов) или жидкостей (если в воду капнуть чернил, то жидкость через некоторое время станет равномерно окрашенной). Другой пример связан с твёрдым телом: атомы соприкасающихся металлов перемешиваются на границе соприкосновения. Важную роль диффузия частиц играет в физике плазмы.

## **Диффузия в газах**

Опыты показывают, что диффузии в газах — самый быстрый процесс, в жидкостях он протекает гораздо медленнее, но может наблюдаться даже в твердых телах.

Диффузия в газах происходит быстрее, чем в жидкостях, потому, что газы имеют меньшую плотность, чем жидкости, т.е. молекулы газов расположены на больших расстояниях друг от друга. Ещё медленнее происходит диффузия в твёрдых телах, поскольку молекулы твёрдых тел находятся ещё ближе друг к другу, чем молекулы жидкостей.



Скорость диффузии зависит не только от агрегатного состояния вещества, но и от температуры. При более высокой температуре диффузия будет происходить быстрее. Это происходит потому, что при повышении температуры быстрее движутся молекулы. Скорость движения молекул и температура тела взаимосвязаны. Чем больше средняя скорость движения молекул тела, тем выше его температура.

## ПРИТЯЖЕНИЕ МЕЖДУ МОЛЕКУЛАМИ:

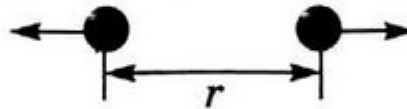
1. В разных веществах неодинаково → различная прочность тел (сталь прочнее меди)
2. Становится заметным на  $r \approx$  размерам молекул

Примеры проявления:

- слипание свинцовых цилиндров
- сварка и пайка металлов
- склеивание



между молекулами существует отталкивание

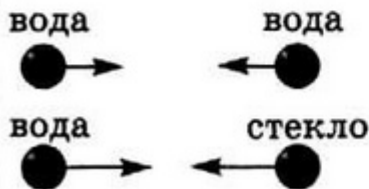
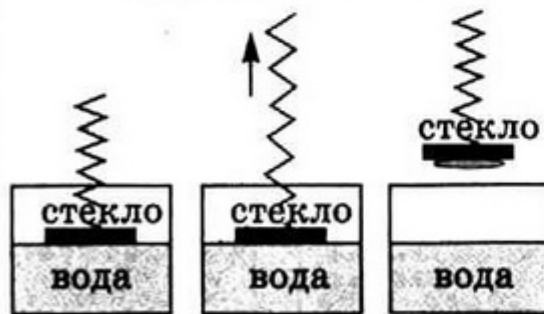


при  $r <$  размеров молекул → ↑ отталкивание

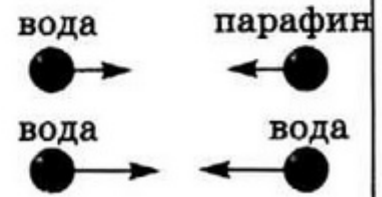
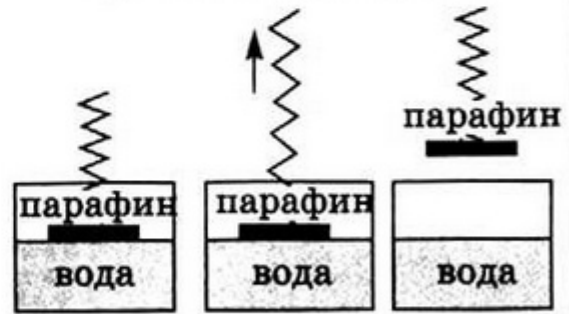
Примеры проявления:

- сжатое тело распрямляется

### СМАЧИВАНИЕ



### НЕСМАЧИВАНИЕ



смачивает ← ВОДА → несмачивает  
 кожу, дерево                      воск, жирные пов-ти

случае газов средняя скорость малых молекул больше, а именно она обратно пропорциональна квадратному корню из массы молекулы и растёт с повышением температуры. Диффузионные процессы в твёрдых телах при высоких температурах часто находят практическое применение. Например, в определённых типах **электронно-лучевых трубок (ЭЛТ)** применяется металлический торий, продиффундировавший через металлический вольфрам при 2000 °С.

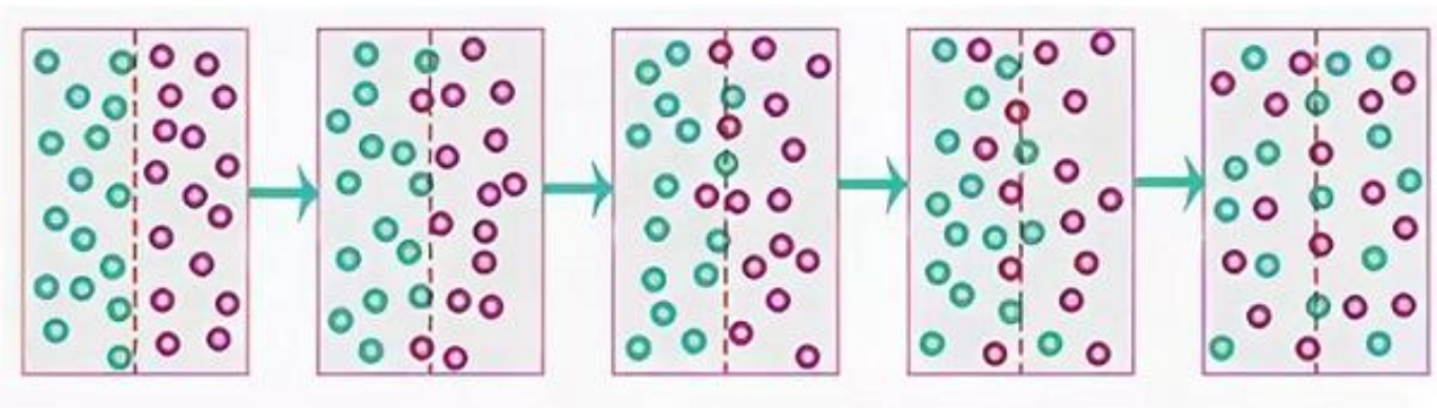
Если в смеси газов масса одной молекулы в четыре раза больше другой, то такая молекула передвигается в два раза медленнее по сравнению с её движением в чистом газе. Соответственно, скорость диффузии её также ниже. Эта разница в скорости диффузии лёгких и тяжёлых молекул применяется, чтобы разделять субстанции с различными молекулярными весами. В качестве примера можно привести разделение изотопов. Если газ, содержащий два изотопа, пропускать через пористую мембрану, более лёгкие изотопы проникают через мембрану быстрее, чем тяжёлые. Для лучшего разделения процесс производится в несколько этапов. Этот процесс широко применялся для разделения изотопов урана (отделение  $^{235}\text{U}$  от основной массы  $^{238}\text{U}$ ).

## **Диффузия в химии; в жидкостях**

Как было сказано ранее, диффузия - процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекул или атомов другого вещества, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентрации по всему занимаемому объёму. Причиной диффузии является тепловое движение частиц.

Чтобы понять этот процесс нагляднее, обратимся к неорганической химии. При добавлении  $\text{KMnO}_4$  (марганцовка) в  $\text{H}_2\text{O}$  (вода) происходит диссоциация на  $\text{K}^+$  и  $\text{MnO}_4^-$ . Напомним, молекула воды существует в виде сцепления двух ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ .

Итак, в ходе добавления  $\text{KMnO}_4$  в  $\text{H}_2\text{O}$  мы наблюдаем, что вода изменяет свой цвет. Это происходит из-за растворения в ней марганцовки. Произойдет хаотическое перемещение ионов обоих веществ, вследствие чего сцепленные ионы воды поменяют свой цвет и освободят место для других, не реагировавших, ионов.



Причем движимые частицы во время диффузии, всегда распространяются равномерно по всему предоставленному объему. Сам процесс диффузии занимает определенное время.

Табл. 2. – КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В ВОДНЫХ И НЕВОДНЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ

Растворенное в-во <i>A</i>	Р-ритель <i>B</i>	<i>T</i> , К	$D_{AB} \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с
Водород	Водный р-р КСl (1 моль/л)	298	3,79
Водород	Водный р-р MgSO <sub>4</sub> (0,5 моль/л)	298	3,90
Водород	Водный р-р MgSO <sub>4</sub> (2 моль/л)	298	1,57
Диоксид углерода	Водный р-р NaCl (1,04 моль/л)	298	1,73
Вода	Анилин	293	0,70
Вода	Глицерин	293	0,0083
Вода	Этиленгликоль	293	0,18
Уксусная к-та	Ацетон	298	3,31

Табл. 3. КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИФФУЗИИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

Растворенное в-во	Концентрация, моль/л	<i>T</i> , К	$D \cdot 10^9$ , м <sup>2</sup> /с
Соляная к-та	0,10	285	2,29
Азотная к-та	0,05	293	2,62
Азотная к-та	0,25	293	2,59
Гидроксид натрия	0,05	288	1,49
Хлорид лития	0,05	291	1,12
Хлорид натрия	0,40	291	1,17
Хлорид натрия	0,80	291	1,19
Хлорид натрия	2,00	291	1,23

Также важно знать, что явление диффузии происходит далеко не со всеми веществами. Например, если воду перемешать не с марганцовкой, а с маслом, то диффузии между ними не будет, так как молекулы масла электрически нейтральны. Образованию какого-то соединения с молекулами воды помешают сильные связи внутри молекулы масла.

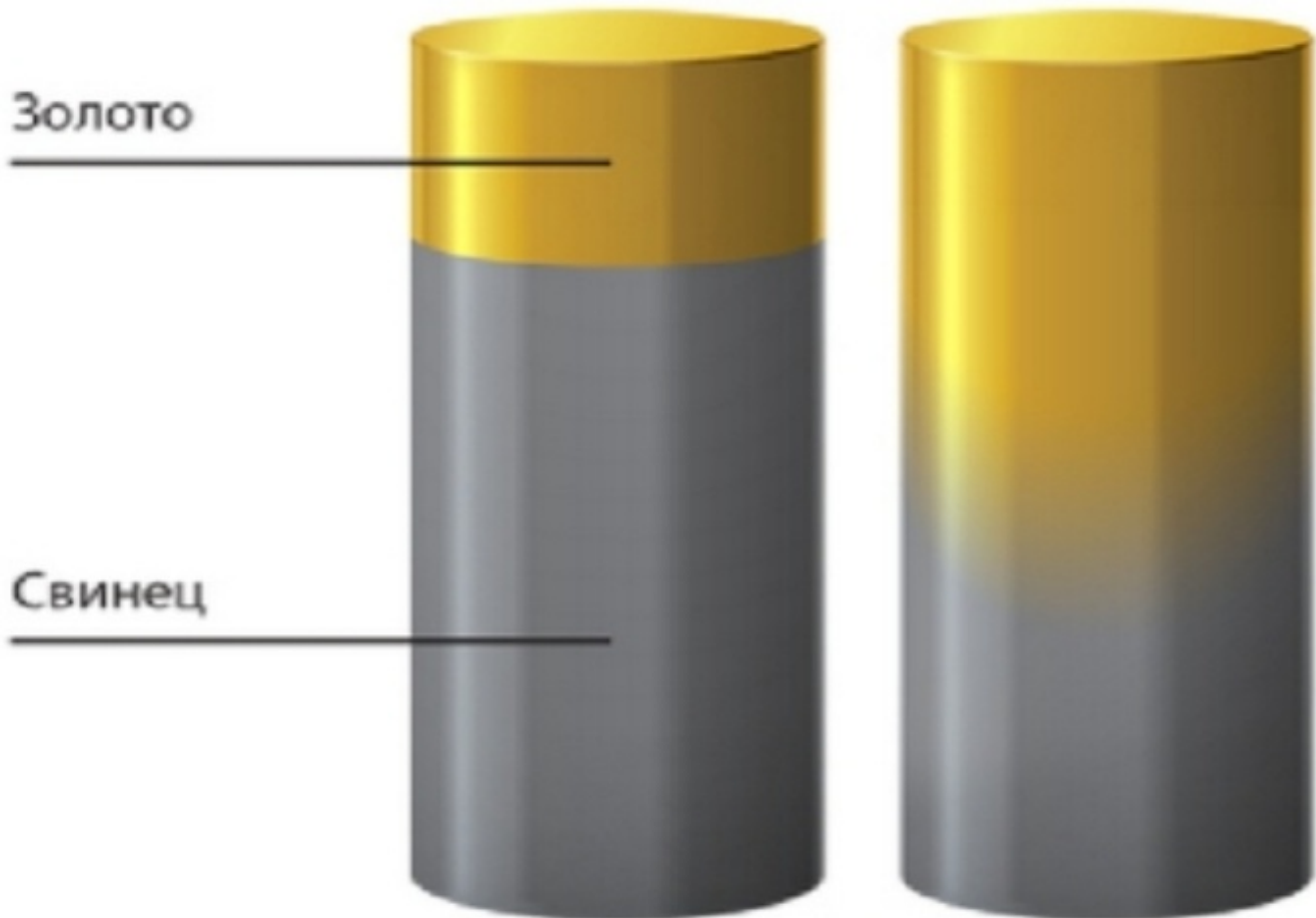
Табл. 4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИФФУЗИИ ГАЗОВ В ПОЛИМЕРАХ

Полимер	$D \cdot 10^{11}, \text{ м}^2/\text{с}$					
	He	Ar	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Полидиметилсилоксан	370	108	115	94	85	330
Полиэтилен низкого давления	70	3,7	4,6	3,2	3,7	-
Поливинилтриметилсилан	370	4,8	7,6	3,6	5,0	180
Поливинилацетат	128	0,4	0,6	-	-	26,3
Полиизопрен	216	13,6	17,3	11,7	13,5	-

### *Диффузия в твердых веществах*

В твердых веществах диффузия либо происходит очень медленно, либо совсем нет. Объясняется это характерным наличием кристаллической решетки, где все частицы расположены упорядочено.





Соединив гладко отполированными поверхностями два бруска из разных металлов, например из меди и алюминия, и оставив их в таком положении на длительное время (на 4—5 лет), мы обнаружим их сращивание за счет проникновения атомов меди в алюминиевый образец и, наоборот, проникновения атомов алюминия в медный.

Наглядным примером диффузии твердых тел служит свинец и золото. Расположенные друг на друге, при комнатной температуре в  $20^{\circ}\text{C}$ , эти вещества будут очень медленно воспроизводить сам процесс. Диффузия станет заметна не ранее 4-5 лет.

**Проявление диффузии:** окрашивание, склеивание, проникновение питательных веществ из кишечника в кровь.

*Феноменологическое описание Диффузии*

Подходя к вопросу феноменологически (т. е., отталкиваясь от наблюдений явления, а не процессов, лежащих в его основе), можно, исходя из экспериментальных

данных, записать так называемый **закон Фика**, утверждающий, что плотность потока вещества при диффузии пропорциональна градиенту концентрации диффундирующего компонента. В одномерном случае

The screenshot shows a PDF document with the following content:

19

## 2. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ДИФФУЗИИ

*Диффузией* называют перемешивание компонентов смеси, возникающее при наличии перепада их концентраций. На *микроскопическом* (молекулярном) уровне причиной диффузии является хаотичное движение индивидуальных частиц, которое на *макроскопическом* уровне приводит к возникновению *направленного* течения компонентов смеси. Процесс диффузии направлен к установлению равновесия — то есть к выравниванию концентраций и равномерному перемешиванию компонентов.

Подходя к вопросу *феноменологически* (т.е., отталкиваясь от наблюдаемых явления, а не процессов, лежащих в его основе), можно, исходя из экспериментальных данных, записать так называемый **закон Фика**, утверждающий, что плотность потока вещества при диффузии пропорциональна градиенту концентрации диффундирующего компонента. В одномерном случае

$$j = -D \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.1)$$

где  $n$  — концентрация (объёмная плотность) переносимого компонента,  $j$  — его плотность потока. Коэффициент пропорциональности  $D$  называют *коэффициентом диффузии*. В векторном виде закон Фика описывает распределение потоков в пространстве:

$$\mathbf{j} = -D \nabla n, \quad (2.2)$$

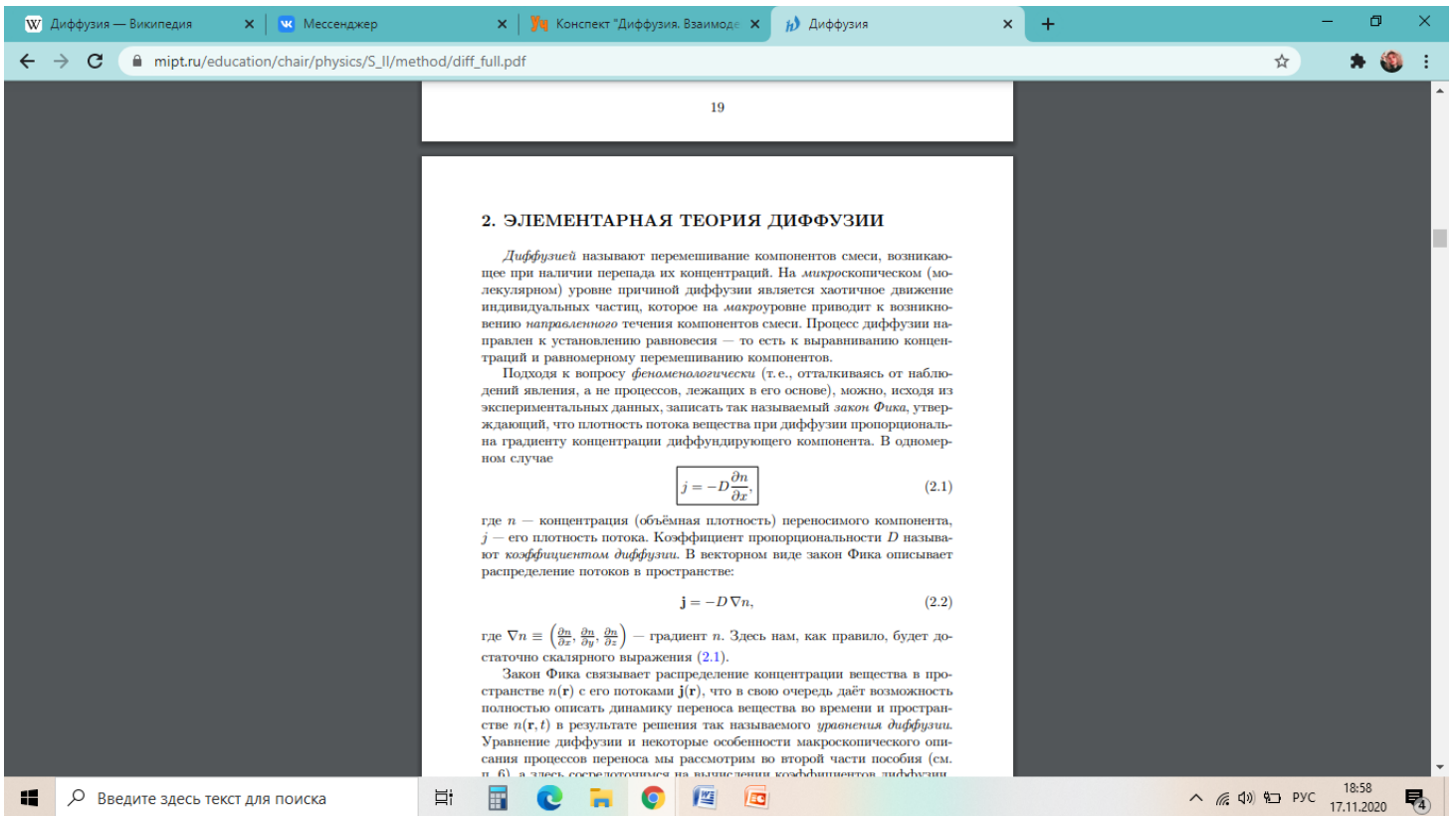
где  $\nabla n \equiv \left( \frac{\partial n}{\partial x}, \frac{\partial n}{\partial y}, \frac{\partial n}{\partial z} \right)$  — градиент  $n$ . Здесь нам, как правило, будет достаточно скалярного выражения (2.1).

Закон Фика связывает распределение концентрации вещества в пространстве  $n(\mathbf{r})$  с его потоками  $\mathbf{j}(\mathbf{r})$ , что в свою очередь даёт возможность полностью описать динамику переноса вещества во времени и пространстве  $n(\mathbf{r}, t)$  в результате решения так называемого *уравнения диффузии*. Уравнение диффузии и некоторые особенности макроскопического описания процессов переноса мы рассмотрим во второй части пособия (см. п. 6) в связи с рассмотрением на примере закона Фика коэффициента диффузии.

где  $n$  концентрация (объёмная плотность) переносимого компонента, а

$j$  его плотность потока. Коэффициент пропорциональности  $D$  называют коэффициентом диффузии. В векторном виде закон Фика описывает распределение потоков в пространстве:

где,



градиент [Здесь нам, как правило, будет достаточно скалярного выражения

**Закон Фика** связывает распределение концентрации вещества в пространстве  $n(\mathbf{r})$  с его потоками  $\mathbf{j}(\mathbf{r})$ , что в свою очередь даёт возможность полностью описать динамику переноса вещества во времени и пространстве  $n(\mathbf{r}, t)$  в результате решения, так называемого уравнения диффузии..

**Второй закон Фика** определяет скорость накопления растворенной примеси в любой плоскости, перпендикулярной направлению диффузии.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{dj}{dx} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Закон связывает

пространственное и временное изменения концентрации:

19

## 2. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ДИФФУЗИИ

*Диффузией* называют перемешивание компонентов смеси, возникающее при наличии перепада их концентраций. На *микроскопическом* (молекулярном) уровне причиной диффузии является хаотичное движение индивидуальных частиц, которое на *макроуровне* приводит к возникновению *направленного* течения компонентов смеси. Процесс диффузии направлен к установлению равновесия — то есть к выравниванию концентраций и равномерному перемешиванию компонентов.

Подходя к вопросу *феноменологически* (т.е., отталкиваясь от наблюдаемых явления, а не процессов, лежащих в его основе), можно, исходя из экспериментальных данных, записать так называемый *закон Фика*, утверждающий, что плотность потока вещества при диффузии пропорциональна градиенту концентрации диффундирующего компонента. В одномерном случае

$$j = -D \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (2.1)$$

где  $n$  — концентрация (объемная плотность) переносимого компонента,  $j$  — его плотность потока. Коэффициент пропорциональности  $D$  называют *коэффициентом диффузии*. В векторном виде закон Фика описывает распределение потоков в пространстве:

$$j = -D \nabla n, \quad (2.2)$$

где  $\nabla n \equiv \left( \frac{\partial n}{\partial x}, \frac{\partial n}{\partial y}, \frac{\partial n}{\partial z} \right)$  — градиент  $n$ . Здесь нам, как правило, будет достаточно скалярного выражения (2.1).

Закон Фика связывает распределение концентрации вещества в пространстве  $n(\mathbf{r})$  с его потоками  $j(\mathbf{r})$ , что в свою очередь даёт возможность полностью описать динамику переноса вещества во времени и пространстве  $n(\mathbf{r}, t)$  в результате решения так называемого *уравнения диффузии*. Уравнение диффузии и некоторые особенности макроscopicского описания процессов переноса мы рассмотрим во второй части пособия (см.

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_{акт}}{RT}}$$

Коэффициент

диффузии **D** зависит от температуры. В ряде случаев в широком интервале температур, эта зависимость представляет собой **уравнение Аррениуса**:

Где :

- **K** - константа скорости реакции;
- **A** - предэкспоненциальный коэффициент, учитывающий вероятность и число столкновений;
- **e** - основание натурального логарифма;
- **E(акт)** - энергия активации (Дж/моль);
- **T** - абсолютная температура Кельвина (K);
- **R** - универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/моль×K).

### Диффузия лёгкой примеси

Теоретическое изучение диффузионных процессов начнём с простейшей модели, позволяющей строгим и вместе с тем наглядным образом получить **закон Фика** и выражение для коэффициента диффузии.

Исследуем движение частиц на фоне случайным образом распределённых в пространстве неподвижных рассеивающих центров. Эта модель, называемая газом Лоренца, подходит для описания диффузии примеси лёгких частиц в тяжёлом газе. Действительно если концентрация примеси  $n \ll n_0$  мала по сравнению с концентрацией фоновых частиц  $n_0 \ll n_0$ , то можно пренебречь изменением концентрации фона и рассматривать только процесс переноса примесных частиц ( $n_0 \approx \text{const}$ ). Если, кроме того, масса частицы примеси  $m$  много меньше массы частиц фона  $m \ll m_0$ , то средняя скорость хаотичного теплового движения тяжёлых частиц много меньше скорости лёгких, поэтому фоновые частицы можно считать практически неподвижными, «прибитыми гвоздями».

Каждая частица примеси движется прямолинейно от столкновения до столкновения с неподвижными частицами фона. В результате однократного столкновения с рассеивающим центром скорость частицы случайным образом (изотропно) изменяет своё направление, практически не меняясь по величине. Средняя длина свободного пробега лёгких частиц примеси определяется формулой:

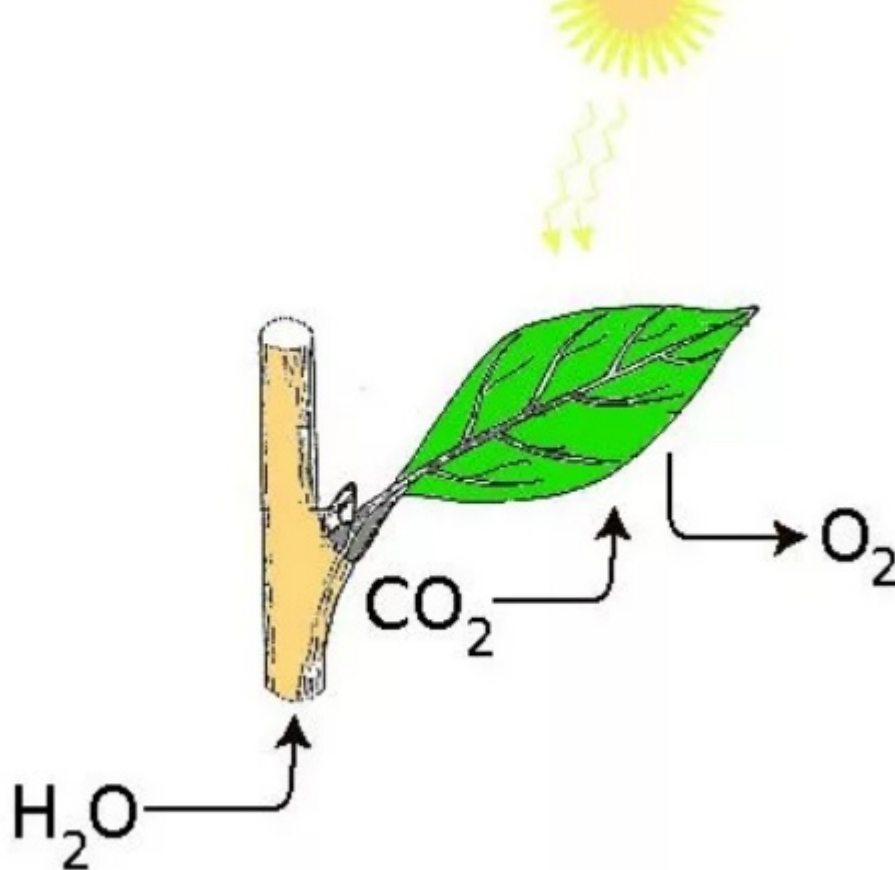
$$\lambda = \frac{g}{Z} = \frac{1}{\sqrt{2\pi d^2 n}}$$

Где  $\pi d^2$  - среднее эффективное сечение соударений.

*Окружающий мир: диффузия в биологии*

Благодаря диффузии происходят следующие процессы:

- *Поддерживается однородный состав атмосферного воздуха;*
- *Осуществляется дыхание человека и животных;*



Происходит

питание растений.

Значимый биологический процесс – *фотосинтез* - осуществляется в том числе и при помощи **диффузии**. Как мы знаем, благодаря энергии солнечного света, вода из-за хлорофиллов разлагается на составляющие, кислород, который выделяется при этом, попадает в атмосферу и поглощается всеми живыми организмами. Сам процесс *поглощения кислорода человеком и животными, обмен веществ у растений - все это поддерживается диффузией*.

Стоит отметить, именно благодаря диффузии мы можем чувствовать запахи, использовать соль, сахар и другое.

*Диффузия: применение*

- *Термообработка металлов;*
- *Нанесение тонкого металлического слоя на поверхность изделия;*

- Цементация стали – поверхностное диффузное насыщение малоуглеродистой стали углеродом с целью повышения твёрдости, износоустойчивости.
- Пищевая промышленность;
- В хозяйстве диффузия способствует консервации;
- В медицине приобрело широкое использования из-за того, что благодаря диффузии кислород проникает в кровь, из крови - в ткани. На основе этого используются ингаляторы.

## **Вывод**

**Диффузия** - фундаментальное явление природы, поэтому так важно изучать и понимать это явление. Без диффузии не существовало бы Вселенной, планет, Земли, всего живого.