



МЕДИЦИНСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ПЛЕВЕН
ФАКУЛТЕТ „Фармация“
ЦЕНТЪР ЗА ДИСТАНЦИОННО ОБУЧЕНИЕ

Лекция №6

Физика и биофизика

Пренос на топлинна енергия. Топлина - същност и физиологично действие. Температура - същност, измерване, температурни скали. Пренос на топлина чрез топлопроводност (закон на Фурие), конвекция, изпарение и инкандесценция.

Транспорт на молекули и йони. Дифузия, същност и видове. Свободна дифузия, закон на Фик. Несвободна дифузия, осмоза, филтрация, диализа. Обмяна на вода между кръвта и тъканите.

.

Проф. Константин Балашев, дхн

ТОПЛИНА

ФИЗИОЛОГИЧНО ДЕЙСТВИЕ НА ТОПЛИНАТА

Топлината е основен вид енергия в природата. Тя има важно биологично значение, тъй като силно влияе върху скоростта на биохимичните метаболитни процеси. Съгласно уравнението на Арениус, скоростната константа k на всяка химична реакция се увеличава с повишаване на абсолютната температура T , при която протича процеса:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

(A е Арениусовата константа, E_a - активираща енергия на химичната реакция, R - универсалната газова константа). Като въздейства върху скоростта на биохимичните реакции, топлинната енергия променя скоростта на физиологичните процеси.

Установено е, че повишаване на температурата на организма само с 1 °C ускорява неговия метаболизъм средно с около 7 %. Термичните граници на живота за топлокръвните организми са от 30 до 43 °C, с оптимум при около 37 °C. Локалното загряване на органи или части от тялото ускорява техния метаболизъм, а също и циркулацията на кръвта в тях в резултат на релаксация на капилярните кръвоносни съдове (вазодилатация). По такъв начин се засилва трофиката (захранването) на тъканите и се подпомага преодоляването на патологичния процес със силите на самия организъм. За тази цел се прилага топлообмен с нагрети тела, загряване чрез облъчване с инфрачервена светлина, радиовълни, ултразвук, загряване чрез протичане на високочестотен електрически ток и др.

Топлинната терапия е полезна и при лечението на някои ракови заболявания в комбинация с радиационната им терапия. Например туморът се загрява посредством диатермия до около 42 °C в продължение на 20-30 минути, след което непосредствено се прилага радиационното облъчване. Разработени са и високотемпературни хирургични инструменти, използващи електричен ток или лазерно лъчение.

Топлината играе спомагателна роля при лечението на различни заболявания поради, противовъзпалителния, болкоуспокояващ, антиспастичен и релаксиращ ефекти, които нейното прилагане оказва върху човешкия организъм.

ТРАНСПОРТ НА ТОПЛИННА ЕНЕРГИЯ

Жизнените процеси в човешкия организъм поддържат и определят от непрекъснатата обмяна на материя, енергия и информация между него и околната среда, както и между различните части на организма.

Енергията може да се транспортира през пространството посредством частици или вълни. Примери в това отношение са процесите на транспорт на енергия посредством механични или електромагнитни вълни, на топлина чрез топлопроводност, конвекция, изпарение или топлинно излъчване.

От биологична гледна точка топлината е изключително важен вид енергия. Познаването на физичните процеси, посредством които топлинната енергия може да се пренася от едно тяло на друго и въобще в пространството, е необходимо не само за правилното разбиране на важни физиологични процеси (например терморегулацията на организма), но и за ефективното използване на топлината за терапевтични цели в медицината.



Как може да бъде извършен пренос на топлина от едно тяло към друго или от едно място към друго в една и съща система? Известни са четири различни физични механизма:

- Посредством *топлопроводност* (в твърди тела или флуиди в покой),
- Чрез *конвекция* (в движещи се течности или газове, при което флуидният поток се съчетава с топлопроводност),
- При *изпарение* (част от топлинната енергия на субстанцията се пренася с изпарените частици в газовата фаза),
- Чрез *излъчване и поглъщане* на електромагнитни вълни (инфракчервена светлина).

Топлопроводност

Топлопроводността е процес на пренос на топлина посредством пряко предаване на кинетична енергия от частица на частица. Чрез топлопроводност топлината се пренася от по-топли към по-студени части на дадено тяло или от едно тяло към друго, когато са в контакт. В резултат се достига до уеднаквяване на температурите в цялата система.

Пренасянето на топлина чрез топлопроводност е спонтанен и необратим процес, обусловен от нееднаквото ѝ разпределение в пространството, т.е. от наличието на *температурен градиент*. Температурният градиент ***grad T*** представлява отношение на температурната разлика **$T_1 - T_2$** между две точки от пространството и разстоянието **$x_1 - x_2$** между тези точки:

$$\text{grad } T = \frac{T_1 - T_2}{x_1 - x_2} = \frac{\Delta T}{\Delta x}$$



Процесът се описва от **закона на Фурие** (*Jean Baptiste Joseph Fourier*, френски математик):

$$I = -k \text{grad } T$$

$I = \frac{1}{S} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right)$ е интензитетът на топлинния поток (скоростта на пренос на топлина ΔQ за време Δt през площ S , разположена напречно на посоката на пренос), $\text{grad } T$ - е температурния градиент, а k - коефициент на топлопроводност.

Скоростта на топлопроводност зависи от големината на концентрационния градиент и коефициента на топлопроводност. С преноса на топлина температурните разлики постепенно намаляват, а следователно и градиентите. Ето защо процесът на топлопроводност протича с намаляваща скорост докато температурният градиент стане нула, т.е. до изравняване на температурата във всички части на системата.

Скоростта на процеса е различна и специфична за различните вещества, тъй като зависи от атомно-молекулния им строеж и агрегатното им състояние (различно разстояние между молекулите, различна свобода на движение на частиците). Теплопроводността зависи и от някои външни условия: температурата (различна средна честота и сила на ударите между частиците) и налягането (различно средно разстояние между частиците). Ето защо различните вещества имат различна топлопроводност. Тя е най-ниска при газовете, а най-висока - при металите (последното се дължи на високата концентрация на свободни електрони в тях). Всички тези зависимости се отразяват с коефициента на топлопроводност κ .

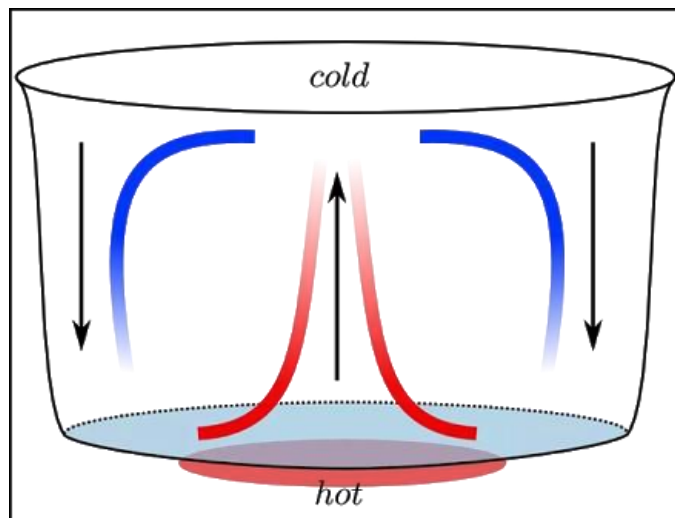
Металите (сребро, мед) са добри проводници на топлината. Неметалите се използват като топлинни изолатори (тухли, бетон, дърво, текстил). Кухини с въздух в топлините изолатори допълнително намаляват тяхната топлопроводност (например кухи тухли, пенобетон, стиропор, дунапрен). Вакуумът не провежда топлина чрез топлопроводност и по тази причина се смята за най-добрия топлинен изолатор (той обаче не възпрепятства преноса на топлина посредством инфрачервено излъчване). Топлопроводността се величава с нарастване на температурата. Топлопроводността на различните тъкани в човешкото тяло също е различна. Съдържащите по-голямо количество вода тъкани (кръв, лимфа, мускули и др.) имат топлопроводност, близка до тази на водата, а богатите на мазнини както и съединителната тъкан - по-малка.

Като следствие от закона на Фурие една проста формула може да се използва за оценка обмяната на топлина чрез топлопроводност между човешкото тяло и неговата околна среда. Скоростта на топлинния поток е пропорционална на площта на тялото S и разликата между температурите на тялото T_b и на околната среда T_s :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = hS(T_b - T_s)$$

където h е коефициент на пропорционалност, известен още като *коефициент на топлинен трансфер*.

Конвекция



Конвекцията е процес на пренос на топлина посредством флуиди, т.е. вещества, които могат да текат (газове и течности). Докато при топлопроводността преносът на топлина се извършва без видимо движение на веществото (т.е. на микро ниво), при конвекцията това става посредством макродвижение. Тя представлява движение на флуида от студени към топли региони с по-ниска плътност.

Конвекцията може да бъде *свободна* или *принудена*.



Конвекцията продължава до изравняване на температурите в целия обем на флуида.

Свободната конвекция може да бъде обяснена със **закона на Архимед**, съгласно който всяко потопено във флуид тяло, олеква с толкова, колкото тежи изместеният от него флуид. Свободната конвекция възниква при нагряване на флуид чрез топлопроводност при контакт с по-топъл обект. Нагряването предизвиква намаляване плътността на нагретия обем флуид. По-топлият флуид има по-ниска плътност от по-студения и се стреми да се издигне спрямо студения. Поради разликата в плътността на флуида между нагретия обем (V) и тази в съседните области ($\Delta\rho$), върху този обем започва да действа изтласкваща *Архимедовата сила* $F = \Delta\rho Vg$, която го премества нагоре (g е земното ускорение). На мястото на тази порция флуид идва нова и процесът се повтаря. Заместването на издигащите се нагоре по-топли области от флуида с по-студени създава конвективни потоци.

Факторите, от които зависи скоростта на свободна конвекция са: *температурната разлика между слоевете на флуида, топлопроводността на самия флуид и неговия вискозитет*. Колкото температурната разлика и топлопроводността са по големи, толкова по-бърза е конвекцията. Увеличаването на вискозитета я забавя.

При принудената конвекция движението на пренасящия топлината флуид се извършва принудително чрез вентилатор, вятър, бъркалка и т.н.).

Генерираната във вътрешните органи на човешкото тяло топлина се пренася от кръвта към външната повърхност - към кожните капиляри и от там, към заобикалящата среда. Прилежащия към повърхността на тялото слой въздух се загрява чрез топлопроводност и започва естествена конвекция. Във вятър или в течаща вода този прилежащ до тялото слой се сменя принудително по-бързо и отделянето на топлина се увеличава.

Инкандесценция

Всяко тяло с температура, по-висока от 0 K, излъчва електромагнитни вълни, чийто честотен диапазон и интензитет зависят от температурата. Този процес се нарича *инкандесценция* или *топлинно излъчване* (виж Инкандесценция). Ако температурата е достатъчно висока, лъчението е видимо (например светлината, излъчвана от нагрятата волфрамова жичка в електрическите лампи). При температурата на човешкото тяло излъчването е в далечния инфрачервен диапазон с максимум при дължина на вълната около 9 микрона и е невидимо от човешкото око, но може да бъде регистрирано с подходяща апаратура.

Топлинното излъчване пренася топлина посредством електромагнитните вълни в инфрачервената област на спектъра. Поглъщането на инфрачервените лъчи от веществата води до увеличаване молекулно-механичната енергия на техните частици, т.е. до увеличаване на тяхната топлинна енергия. Ето защо топлинното излъчване е важен механизъм за пренос на топлина в пространството. За разлика от останалите, този тип пренос на топлина може да се извършва и във вакуум.

Топлинното излъчване на едно тяло може да се пресметне по формулата $E = e\sigma(T_b^4 - T_s^4)$, където T_b е абсолютната температура на тялото, T_s - на околната среда, e – излъчвателната способност, зависеща от излъчващия материал и неговата температура, а σ - константа на Стефан-Болцман. ($\sigma = 5.670374419 \dots \times 10^{-8}, W \times m^{-2} \times K^{-4}$). За човешкото тяло e има стойност около единица. Чрез този закон може да се пресметне, че мощността на топлинното излъчване от 1 cm^2 повърхност на човешкото тяло с температура 875 W . Топлинното излъчване от околната среда (например с температура $T_b = 33^\circ\text{C}$ и $T_s = 20^\circ\text{C}$, което се поглъща от тялото, е 735 W . Балансът между излъчената и погълната от тялото топлина показва обща топлинна загуба от 140 W . Тъй като нормално по-голямата част от тялото е покрита с дрехи, топлинните загуби обикновено са значително по-малки, но все пак са съществени за физиологичните процеси в организма.

Изпарение



Течностите запазват обема си и не се разпадат на части поради взаимното привличане на техните молекули. Тези молекули обаче са в постоянно топлинно движение. Енергията на това движение е толкова по-голяма, колкото по-висока е температурата на течността (респективно - съдържанието на топлина). Някои молекули, притежаващи по-висока кинетична енергия от останалите, успяват да преодолеят силите на задържане и да се откъснат от течността, т.е. да се изпарят, като отнасят със себе си съответните порции топлинна енергия. Ето защо при изпарението освен материя, се пренася и топлина.

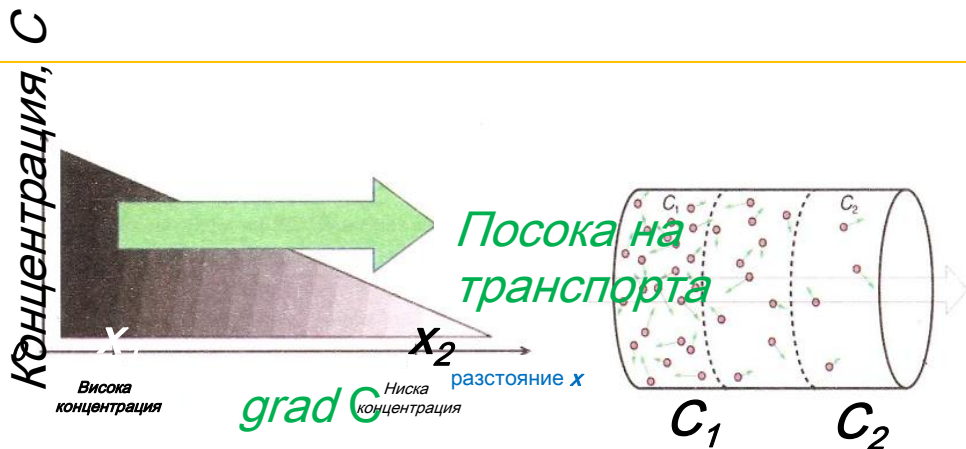
Ако достъпното за парите пространство е ограничено, молекулите на течността, които навлизат в газовата фаза могат да се върнат обратно в течността. Но ако това пространство е голямо или пък има газов поток, който да ги отнася надалеч, те не се връщат обратно. Така течността губи частици както и топлината, която те отнасят със себе си. Посредством изпарение температурата на течността може да бъде поддържана по-ниска от тази на околната среда.

Топлинната енергия Q , транспортирана от изпарените частици, е произведение на латентната топлина на изпарение на течността L_v и броя N на молекулите, напускащи течността: $Q = L_v N$. Латентна топлина на изпарение L_v е енергията, необходима за преодоляване на силите, задържащи заедно молекулите на течността. Тя е количеството енергия, необходимо да се превърне единица маса от течността при температурата на кипене на тази течност в пари. За водата нейната стойност е $2.25 \times 10^6, J \times kg^{-1}$.

ТРАНСПОРТ НА МОЛЕКУЛИ И ЙОНИ

Дифузия

Дифузията е спонтанен пренос на частици (молекули, йони, атоми) от област с по-висока към област с по-ниска тяхна концентрация. Тя е спонтанен и необратим процес. Дифузията се извършва в посока към намаляване разликите в концентрацията на веществото и довежда до неговото равномерно разпределяне в заемания от него обем. Движеща сила на дифузията са концентрационните градиенти.



Концентрационен градиент е отношение между разликата в концентрациите $\Delta C = C_2 - C_1$ в две точки с координати x_1 и x_2 и разстоянието $\Delta x = x_2 - x_1$ между тези точки:

$$\text{grad } C = \frac{C_2 - C_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta C}{\Delta x}$$

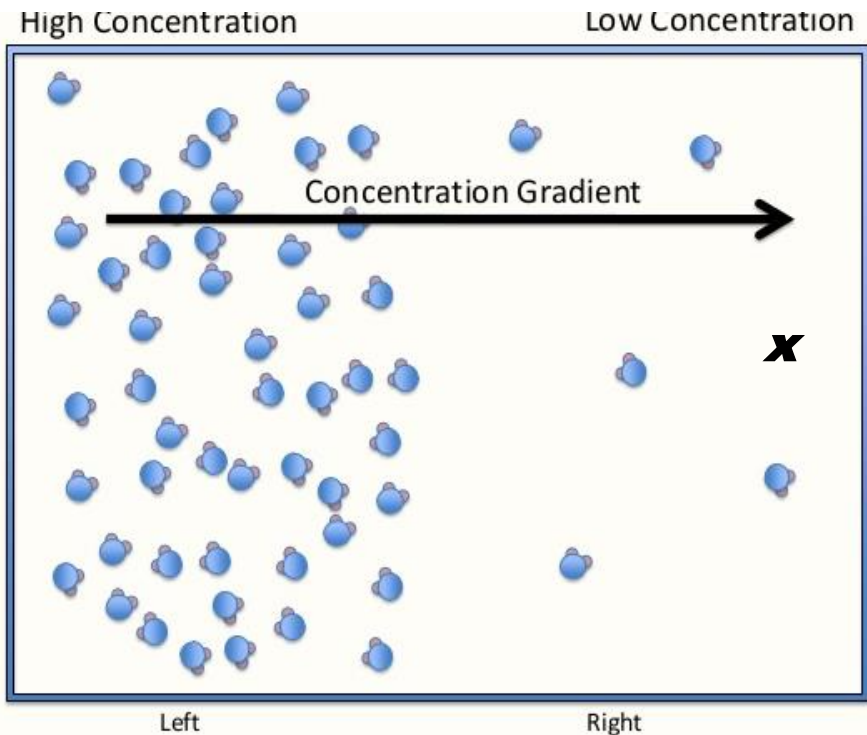


Енергията, която използва дифузията, е топлинната енергия на хаотично движение на частиците, изграждащи веществата. Тези частици нормално извършват хаотично **ненасочено** движение. Вероятността за такова движение във всички посоки е еднаква. Ако обаче частиците са по-концентрирани, локално някъде в пространството, дифузията ще ги разпредели по-равномерно. *Макроскопски*, това означава **насочено** движение към областите с по-ниска плътност. Как **ненасоченото** движение води до **насочено** преместване? Въпреки че вероятността за хаотично движение във всички посоки е еднаква, повече частици ще се преместват насочено към областите с по-малко частици, защото в тази посока те срещат по-малка съпротива (ще се удрят с по-малко частици с по-малка средна честота).



Има два основни вида дифузия - *свободна* и *несвободна*. Когато хаотичното топлинно движение на дифундиращите частици не е затруднено от външни фактори процесът се нарича **свободна дифузия**. Ако обаче, някаква преграда с различна пропускливост за различните частици затруднява това движение, тогава процесът се нарича **несвободна дифузия**. Например, такава дифузия се извършва през липидния бислой на биологичните мембрани или през техни канали. Несвободната дифузия от своя страна се разделя на **проста** (когато частиците дифундират *самостоятелно*) и **улеснена** (когато частиците дифундират с помощта на други частици - *преносители*).

Свободна дифузия



Нека приемем, че в затворена флуидна система концентрацията C на молекули се променя само в едно направление (Ox) и че дифузията протича в тази посока. Нека в един начален момент на разстояние $\Delta x = x_2 - x_1$ концентрационната разлика е $\Delta C = C_2 - C_1$. Отношението $\frac{\Delta C}{\Delta x} = \text{grad } C$ е концентрационния градиент



Процесът на дифузия се описва количествено от **закона на Фик** (*Adolf Fick*, германски физиолог):

$$I = -D \text{grad } C$$

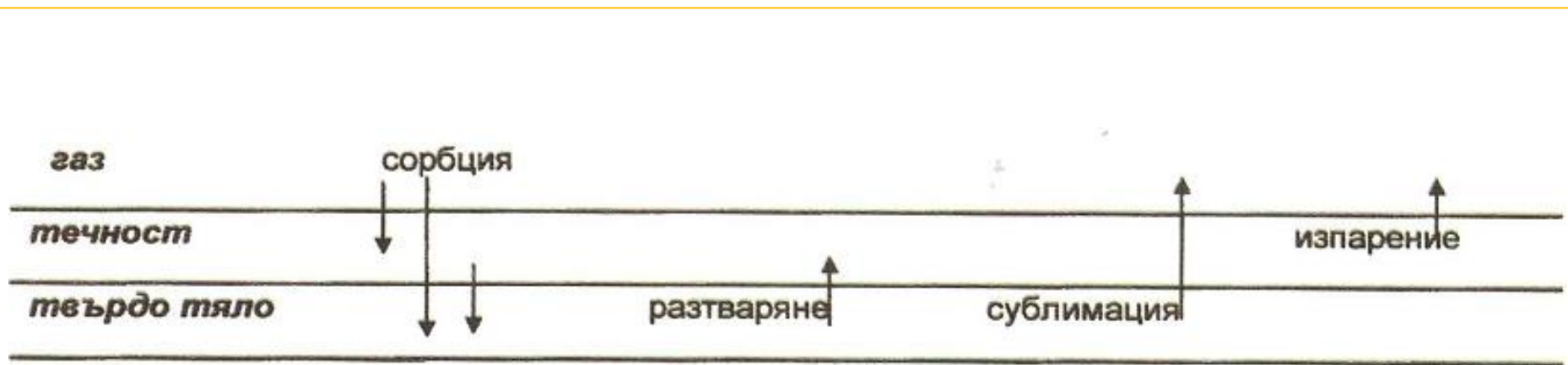
$I = \frac{1}{S} \left(\frac{\Delta m}{\Delta t} \right)$ е интензитетът на дифузионния поток (скоростта на пренос на маса Δm за време Δt през площ S , разположена напречно на посоката на пренос), $\text{grad } C$ е концентрационния градиент, а D - коефициент на дифузия.

Коефициентът на дифузия D характеризира скоростта на процеса в зависимост от спецификата на веществата. Той зависи от средната скорост на топлинното движение на молекулите на веществото (v_{cp}) и от средното разстояние, изминавано между ударите помежду им (λ_{cp}): $D = \frac{1}{3} v_{cp} \lambda_{cp}$. И двата параметъра са различни при различни вещества и агрегатни състояния. Върху тях влияят и външни условия, например температурата T ($v_{cp} \propto T$), налягането p ($v_{cp} \propto \frac{1}{p}$).

На макрониво дифузионният коефициент зависи от:

- (1) **молекулния строеж и агрегатното състояние** на веществата (поради различните размери на молекулите, разстояния между тях и различната свобода на тяхното движение),
- (2) **температурата** (различната средна скорост на топлинното движение),
- (3) **налягането** (различната дължина на средния свободен пробег на молекулите).

По-малките частици дифундират по-бързо поради по-голямата им подвижност. Например **калиевите йони** имат по-малък диаметър от **натриевите** и дифундират около 30 пъти по-бързо от тях. Скоростта на дифузия е най-ниска в твърдите тела и най-висока в газовете, течностите заемат междинно положение. В течностите свободната дифузия е около сто хиляди пъти по-бавна спрямо газовете, а в твърдите тела - над сто милиарда пъти, т.е. практически не протича. Скоростта на дифузия нараства с повишаване на температурата и намаляване на налягането.



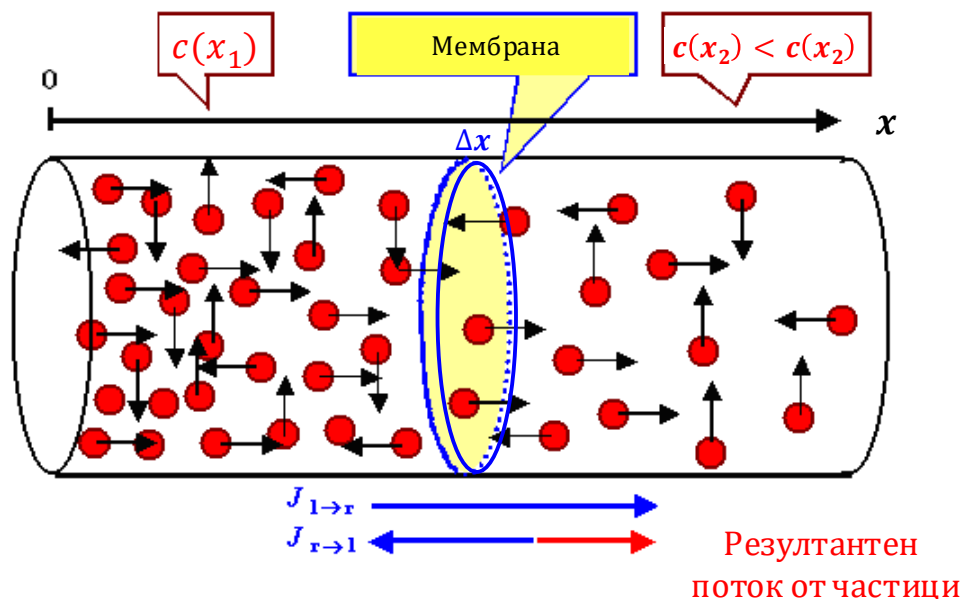
Свободна дифузия протича и когато два флуида в еднакво агрегатно състояние (които се смесват добре, но не реагират химически помежду си) са в контакт. Освен взаимното *дифундиране* на молекулите на вещества в еднакво агрегатно състояние (газ в газ, течност в течност), дифузия е възможна и между вещества в различно агрегатно състояние, например: газ в течност (което се нарича *сорбция*: обемна - абсорбция или повърхностна - адсорбция), газ в твърдо тяло (абсорбция или адсорбция), течност в газ (изпарение), твърдо тяло в течност (разтваряне), твърдо тяло в газ (сублимация).

Несвободна дифузия

Когато процесът на дифузия протича през някаква преграда с пропускливост, различна за различните дифундиращи частици, тогава той се нарича *несвободна дифузия*. Такива прегради (мембрани) се наричат селективно проницаеми (полупропускливи) и затрудняват протичането на дифузията. Скоростта на несвободна дифузия е много по-малка от тази на свободната и се определя главно от проницаемостта на преградата за дифундиращите частици.

При газовете несвободната дифузия носи името *трансфузия*, а при течностите - *осмоза* и *диализа*. Трансфузията, осмозата и дифузията са в основата на жизнено важни физиологични процеси - обмяната на газове в белия дроб, обмяната на вещества през клетъчните мембрани и пр.

Проста несвободна дифузия

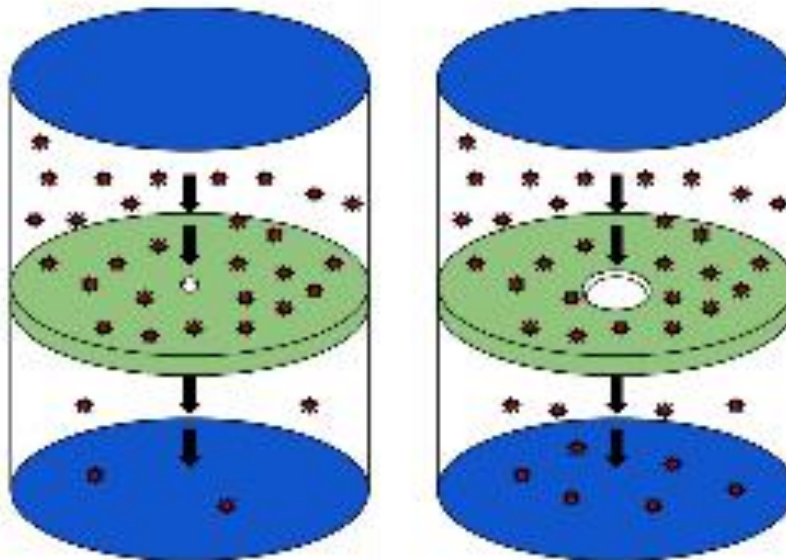


Нека две области от разтвор на дадена субстанция са разделени от мембрана с определена дебелина Δx , а разликата в концентрациите е ΔC . Съгласно закона на Фик интензитетът на дифузионния поток през мембраната е:

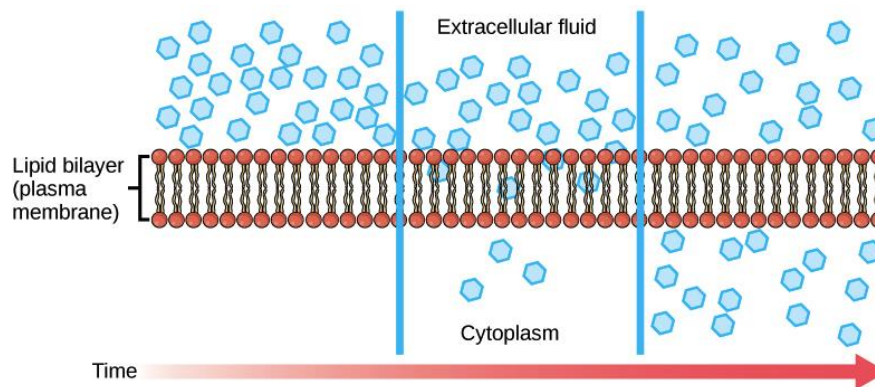
$$I = D \frac{\Delta C}{\Delta x}$$

където $\frac{\Delta C}{\Delta x}$ е концентрационния градиент, а D - коефициент, зависещ от природата на дифундиращите частици и температурата.

Ефузия (effusion)



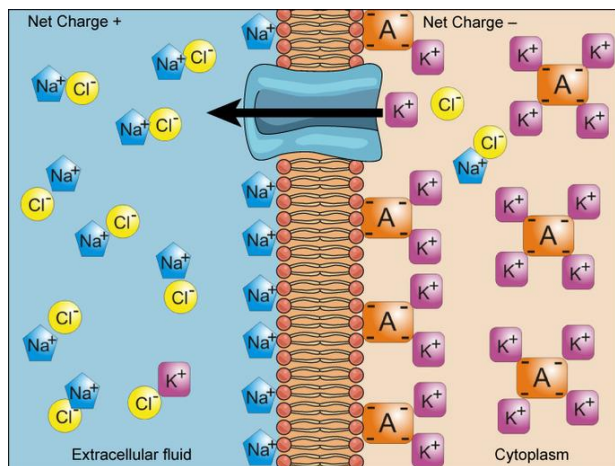
Изображението вляво показва процеса ефузия (effusion), докато изображението вдясно показва процеса дифузия. Ефузията се осъществява през отвор, който е по-малък от дължината на средния свободен пробег на частиците, докато дифузията се осъществява през отвор, през който едновременно могат да преминават множество частици.



При дифузия през биологичните мембрани трябва да се има пред вид, че те имат определена дебелина и поради това в този случай концентрационният градиент може да бъде заменен просто с трансмембранната разлика в концентрациите. Дебелината на мембраните Δx е от 6 до 8 nm. Най-често тя не е точно известна, но винаги има някаква постоянна стойност. Ето защо е удобно константата Δx да бъде поставена в коефициента на пропорционалност като се дефинира нов коефициент - коефициент на проницаемост $P_D = \frac{D}{\Delta x}$. Тогава *транспортът на неутрални молекули през мембраната* може да се опише с една опростена форма на закона на Фик, предложена от Колендър и Берлунд:

$$P_D = D \Delta C$$

За разлика от коефициента на свободна дифузия D , който зависи само от природата на дифундиращото вещество и температурата, коефициентът на проницаемост на мембраната P_D зависи и от нейните свойства и функционалното ѝ състояние.



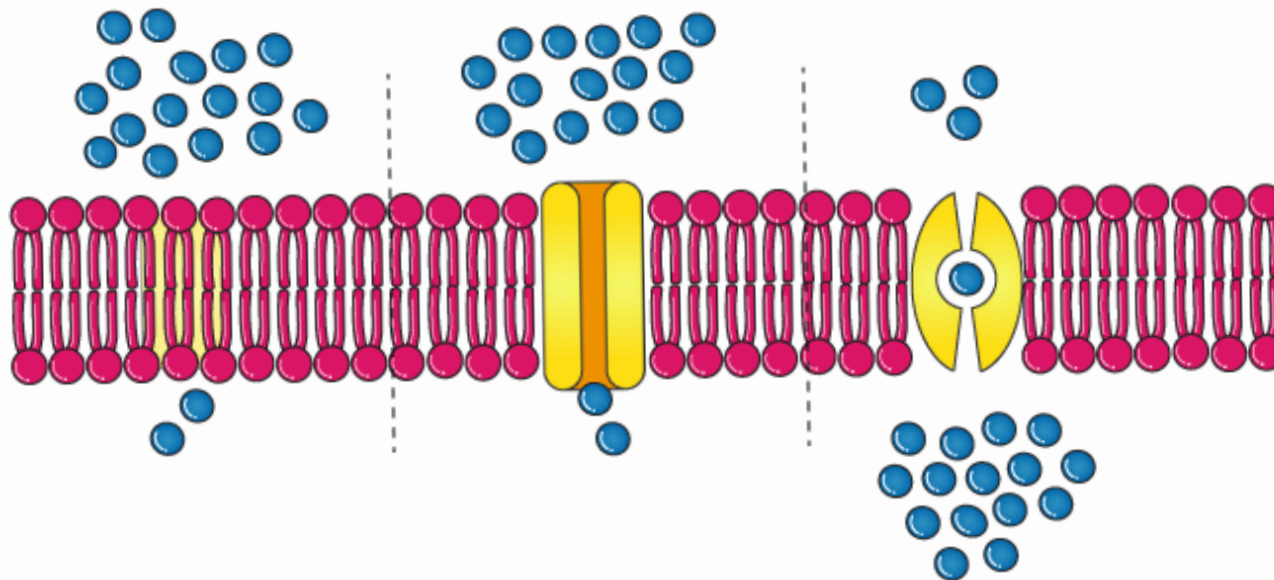
Йонните концентрации от двете страни на биологичните мембрани винаги са различни. По тази причина между двете им страни съществуват освен концентрационни, и електричен градиенти. Ето защо *транспортът на йони* през мембраните се обуславя не само от концентрационния им градиент ($\frac{\Delta C}{\Delta x}$), но и от електричен ($\frac{\Delta \varphi}{\Delta x}$), които действат едновременно. В този случай йонният дифузионен поток през мембраната се описва от друга опростена форма на уравнението на Фик:

$$I = P_0 \left[\Delta C + \left(\frac{cZF}{RT} \right) \Delta \varphi \right]$$

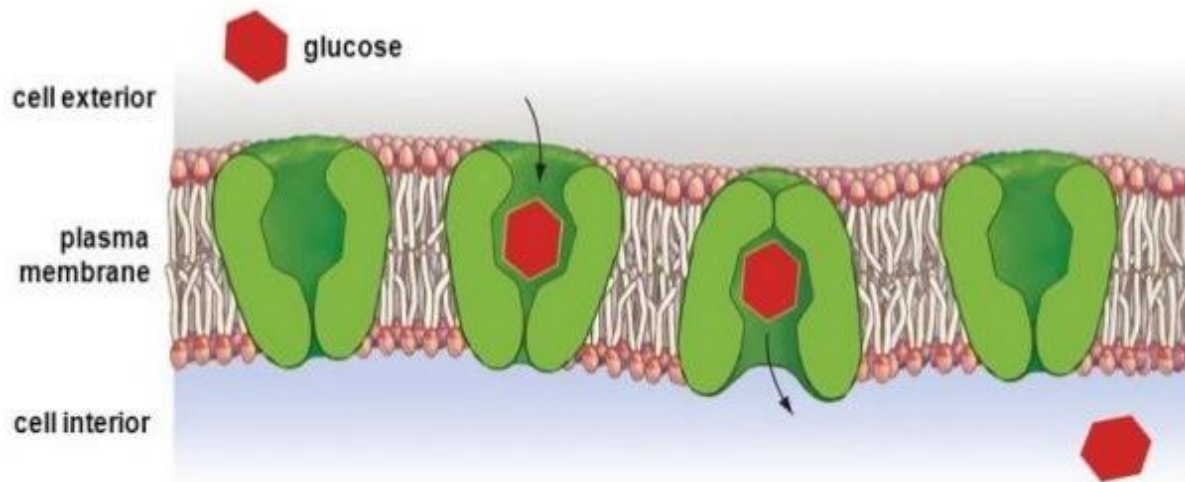
където F е Фарадеевата константа, c - моларната концентрация, а Z - валентността на йоните. (Фарадеевата константа представя електричния товар на един мол електрони; $F = 9,65 \times 10^4 \text{ C/mol}$)

Улеснена несвободна дифузия

Много субстанции могат да дифундират самостоятелно *твърде слабо* през клетъчните мембрани или въобще не могат да преминават през тях (например захари, аминокиселини, някои йони). Такива жизнено важни вещества обаче могат да дифундират през мембраната с помощта на разположени в нея молекули- преносители. Освен чрез проста несвободна дифузия неутрални молекули и йони могат да се пренасят и чрез улеснена несвободна дифузия. Процесът е дифузия, тъй като транспортираните молекули или йони се движат по техния концентрационен градиент - от по-висока към по-ниска тяхна концентрация, но е улеснена, защото се извършва с помощта на преносители, които го улесняват. За активирането на преносителя не е необходима никаква друга енергия, освен тази за химичното свързване на транспортираните частици с него.



Преносителите обикновено са *интегрални трансмембранны протеини*. Те притежават рецепторни участъци, разположени от едната страна на мембраната, към които пренасяните молекули или йони се свързват. Мястото за свързване е високо специфично - често само един единствен тип молекула (йон) може да се свърже към него. След свързване с рецептора на преносителя, молекулата (йона) се пренася през мембраната и освобождава от другата страна.

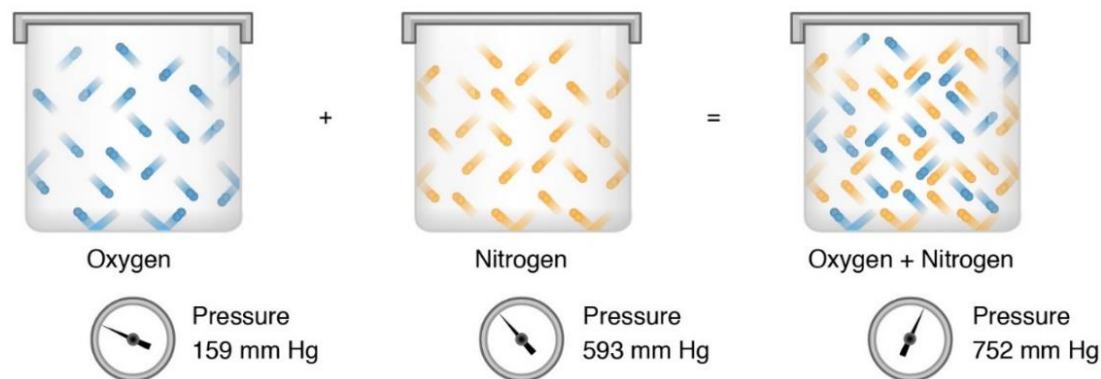


Пример за добре изучена система за улеснена дифузия *е улеснената дифузия на глюкоза*. Тази специфична за глюкозата транспортна система не е просто мембранен канал. **Първо**, за разлика от канала тя не пропуска избирателно в зависимост от размера на частиците. **Второ**, тя работи много по-бавно, отколкото повечето канали. Най-важната разлика между мембрания канал и глюкозния преносител е, че **молекулата на последния претърпява конформационни промяна** като пренася глюкозата през мембраната. Сменяйки две конформации тя придвижва глюкозо-свързващото място от едната страна на мембраната към другата. Прескачайки между тези две състояния преносителят улеснява дифузията на глюкозата, т.е. той позволява на глюкозата да преодолее бариерата на хидрофобния мембранен интериор, движейки се спонтанно по нейния концентрационен градиент. Когато глюкозната концентрация достигне равновесие от двете страни на мембраната сумарното движение на глюкозата се прекратява.

Трансфузия

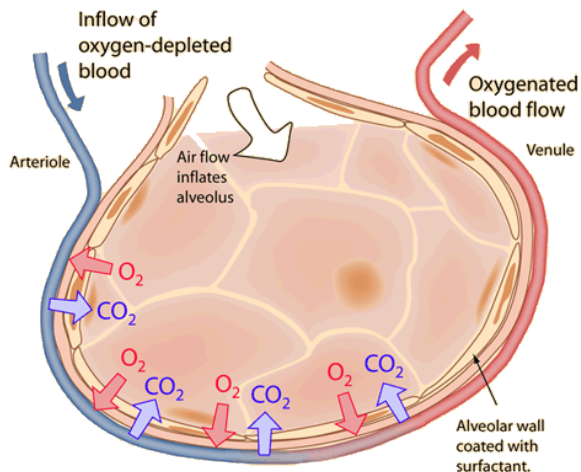
Трансфузията е несвободна дифузия на газове през мембрани. Въпреки че като разновидност на дифузията се описва от закона на Фик, тя е по-сложен процес, защото нейната скорост зависи и от разтворимостта и парциалните налягания на газовете.

Когато един газ е в контакт с повърхността на течност, броят на неговите молекули, които навлизат в течността, е пропорционален на налягането му. При два пъти по-високо налягане, два пъти повече молекули ще удрят повърхността на течността за единица време и съответно два пъти повече молекули ще отидат в нея. При газова смес количеството от всеки газ, което ще навлезе в течността, е пропорционално на парциалното му налягане.



Съгласно **закона на Далтон** в смес от няколко газа *парциално налягане* на един от тях е онова налягане, което съответният газ би имал, ако само той би заемал същия обем. Парциалното налягане на дадения газ е пропорционално на неговата концентрация в сместа. Например, ако от затворен съд със сух въздух при атмосферно налягане **760 Torr** се премахнат всички молекули с изключение на кислородните, налягането ще падне до **159 Torr** (концентрацията на кислорода във въздуха е 21 %, а 159 е 21 % от 760). Това е парциалното (или частично) налягане на кислорода, т.е. онази част от общото налягане на газовата смес, с която само кислородните молекули действат върху стените на съда. Отбелязва се с **p_{O_2}** .

В съответствие със закона на Фик, скоростта на несвободна дифузия през мембрана на един газ от газова смес ще бъде право пропорционална на разликата между парциалните налягания на този газ от двете страни на мембраната (**$\Delta p_{\text{газ}}$**) и обратно пропорционална на дебелината на мембраната (**Δx**): **$I \propto \frac{\Delta p_{\text{газ}}}{\Delta x}$** .



$$\frac{v_{CO_2}}{v_{O_2}} = \frac{S_{CO_2}}{S_{O_2}} \sqrt{\frac{MW_{O_2}}{MW_{CO_2}}}$$

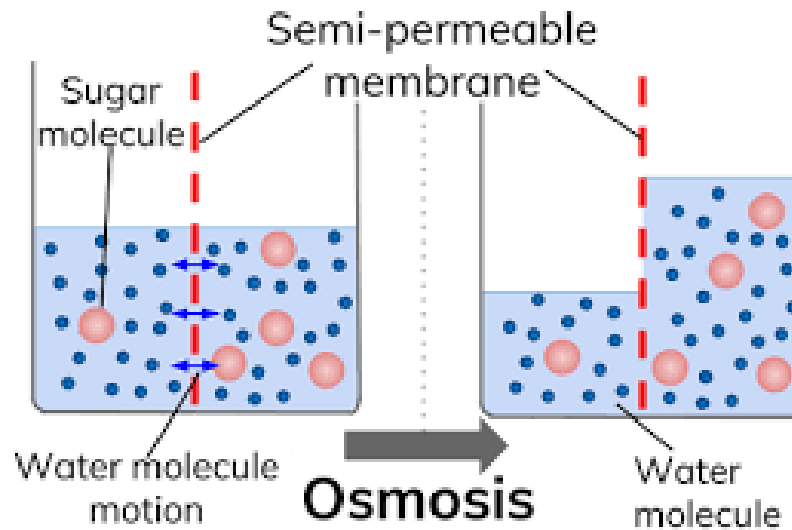
v_{CO_2}, v_{O_2} скорост на дифузия на газовете

S_{CO_2}, S_{O_2} разтворимост на газовете

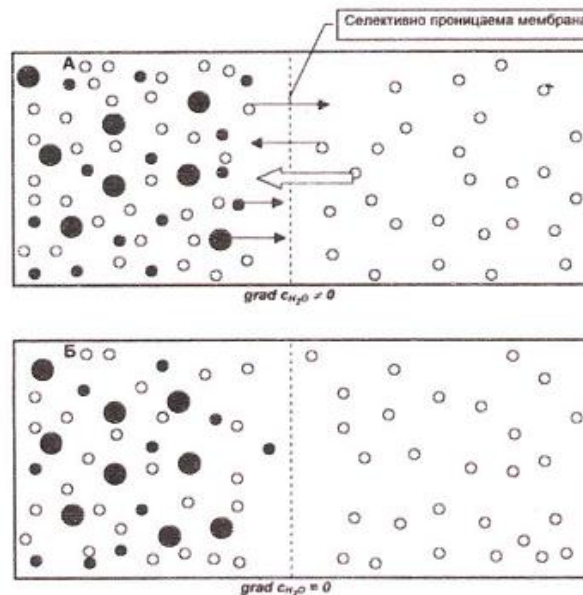
MW_{CO_2}, MW_{O_2} молекулни тегла на газовете

Но различните газове в сместа имат различна разтворимост и това оказва силно влияние върху резултантната скорост на тяхната дифузия. Нека илюстрираме това с пример за трансфузия на респираторните газове CO_2 и O_2 в кръвта през алвеоларните мембрани. Съгласно **закона на Грахам**, когато газ се разтваря в течност, скоростта на неговата дифузия в нея е пропорционална на разтворимостта му в течността и обратно пропорционална на квадратния корен от неговата молекулна маса. Масата на въглеродния диоксид е 44 атомни единици за маса, а на кислорода - 32. Следователно, трябва да се очаква, че поради по-малката си маса молекулите на O_2 ще дифундират по-бързо от тези на CO_2 . Но въглеродният диоксид е 22 пъти по-разтворим от кислорода в кръвната плазма. Като се имат пред вид тези данни по закона на Грахам може да се пресметне, че отношението между скоростите на трансфузия на CO_2 и O_2 е $22 \times (32/44)^{1/2} = 19$. Оказва се, че поради по-високата разтворимост на CO_2 в кръвната плазма, трансфузията му ще бъде 19 пъти по-бърза тази на O_2 .

Осмоза



Осмозата е несвободна дифузия на течности през селективно проницаема преграда. Това е преграда, пропускаща избирателно само определени видове частици. Например, такова свойство има пореста мембрана с определен диаметър на порите. Наличието на селективно проницаема преграда не пречи на свободната дифузия на частиците, които тя пропуска, но е непреодолимо препятствие за преминаването на останалите. С други думи, *осмозата е процес на селективна дифузия*. Селективността се определя както от свойствата на частиците, така и от тези на преградата.



Да разгледаме затворен съд, съдържащ вода и воден разтвор на NaCl, разделени от мембрана, пропускаща само молекулите на водата **(А)**. В единица обем от разтвора на NaCl ще има по-малко водни молекули в сравнение със същия обем във водата поради това, че там присъстват и йони на разтвореното вещество, които заемат известен обем. Следователно за молекулите на водата съществува концентрационен градиент от двете страни на мембраната, който обуславя тяхната дифузия в посока към разтвора. Тя ще продължава докато концентрациите на водните молекули от двете страни на мембраната се уеднаквят **(Б)**. За по-големите частици на разтвореното вещество, йоните на натрия и хлора, очевидно също съществува градиент, но тяхната дифузия през мембраната е невъзможна поради това, че тя е непроницаема за тях.

Осмозата също черпи енергия *от концентрационни градиенти*. Молекулите на разтворителя преминават през мембраната от област с по-малко концентриран към област с по-концентриран разтвор. Фактически това е дифузия на разтворителя от област с по-висока към област с по-ниска негова концентрация, т.е. *дифузия по концентрационния градиент на разтворителя*.

След установяването на равновесие, в единица обем от разтвора на NaCl ще има повече частици, защото там допълнително ще са преминали молекули на разтворителя (водата), а йоните на разтвореното вещество са останали. Поради това там ще се създаде допълнително налягане, дължащо се на частиците на разтвореното вещество, които са в повече. Това налягане се нарича **осмотично налягане** и най-често се обозначава с π . Неговата посока е обратна на тази, в която протича осмозата. Налягането е средната сила, с която частиците на флуида, движейки се хаотично и удряйки стените на съда, в който той се намира, действат върху единица площ. *То зависи от броя на частиците в единица обем и от средната скорост на топлинното им движение.*



За разтвори на неелектролити (вещества, недисоцииращи на йони) осмотичното налягане π е пропорционално на моларната концентрация на разтвореното вещество c и абсолютната температура T :

$$\pi = cRT$$

където R е универсалната газова константа. Това е **уравнение на Вант-Хоф** (*Jacobus Hendricus vant Hoff*, нидерландския физико-химик, Нобелов лауреат по химия за 1901 г.).

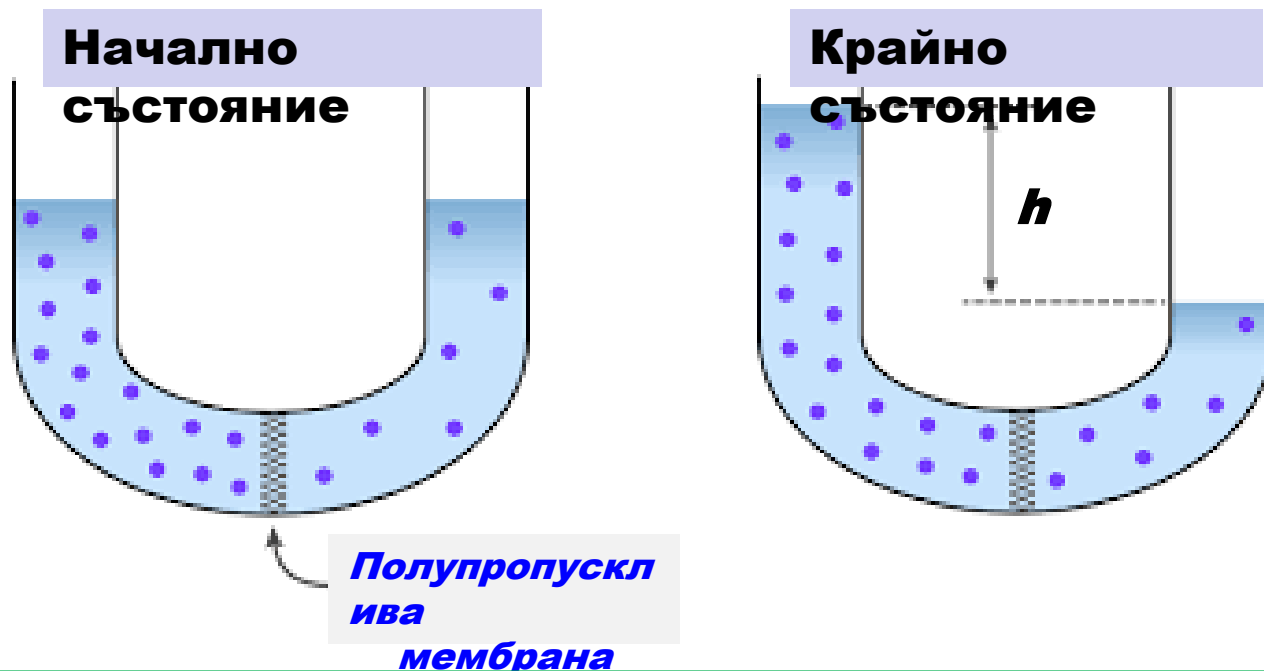
За разреждени разтвори на електролити осмотичното налягане π е:

$$\pi = icRT$$

Коефициентът i се нарича *изотоничен коефициент*. Той показва колко пъти се увеличава броят на частиците при дисоциация на молекулата на разтварянното вещество, затова i зависи от степента на електролитна дисоциация и от броя на йоните, на които се дисоциира всяка негова молекула.

За концентрацията на разтвори се използва термина **моларност**, който се дефинира като **брой молове** разтворено вещество на килограм разтворител (вода). Свързаният с него термин **осмоларност** е броят на частиците разтворено вещество в килограм вода, независимо от тяхната маса, размери и йонна активност.

Връзката между моларността и осмоларността зависи от броя на йоните, на които дисоциира молекулата на разтвореното вещество. Например, един едномоларен разтвор на глюкоза е също едноосмоларен, тъй като глюкозната молекула не дисоциира на йони. Обаче едномоларен разтвор на NaCl е двуосмоларен, тъй като NaCl дисоциира на два йона- натриев катион и хлорен анион.



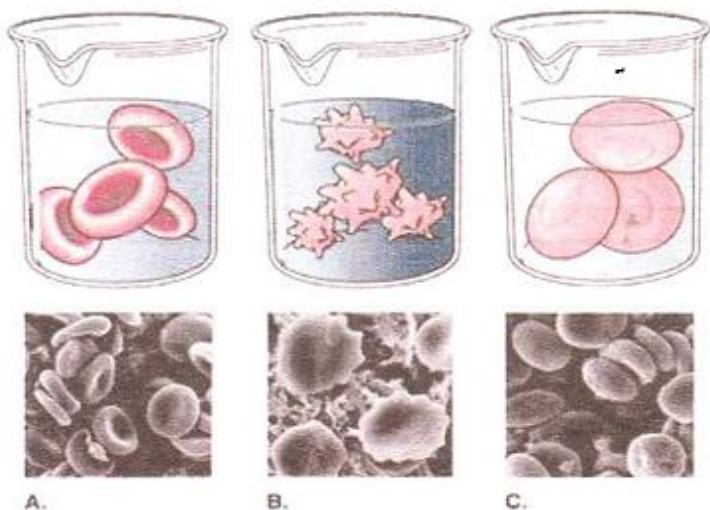
Осмотичното налягане може да бъде точно измерено, тъй като е равно на хидростатичното налягане, необходимо за спиране на осмозата, т.е. на дифузията на разтворителя (например водата) през мембраната. Това е илюстрирано на Фигурата, където е показано осмотичното налягане в *U-образна тръба*, двете половини на която са разделени от мембрана, пропусклива за водата, но не и за частиците на разтвореното вещество. Водният разтвор е поставен в лявата част на тръбата, а в дясната се намира чиста вода. При равновесие, осмотичното движение на разтворителя към страната на разтвора увеличава хидростатичното налягане от лявата страна и го намалява от дясната. Тази разлика в наляганията от двете страни на мембраната е осмотичното налягане.

Винаги, когато два разтвора с различни концентрации са разделени с мембрана, позволяваща преминаването на молекулите на разтворителя, между тях ще протича осмоза в посока към разтвора с по-високо осмотично налягане (концентрация на разтвореното вещество). Осмотичният трансмембранен поток на вода може да се опише с уравнението:

$$I = P_0 \Delta \pi$$

в което $\Delta \pi$ е разликата в осмотичните налягания от двете страни, на мембраната, а P_0 - осмотичният коефициент на проницаемост на мембраната.

Осмотичното налягане не зависи от вида на разтвореното вещество, а само от концентрацията му. Затова разтвори на различни вещества могат да имат еднакви осмотични налягания. Разтвори с еднакви осмотични налягания се наричат **изотонични**. Ако един разтвор има по-високо осмотично налягане от друг, то той е **хипертоничен** спрямо него, и обратно - вторият разтвор е **хипотоничен** по отношение на първия.

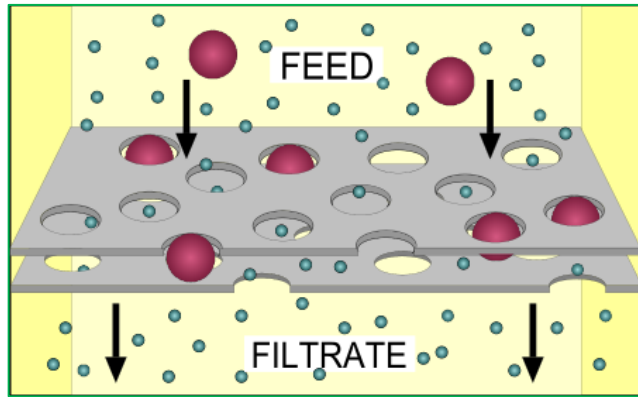


В медицината, като временни заместители на кръвта се използват разтвори, изотонични на кръвната плазма. Най-простият такъв разтвор е 0,9% воден разтвор на $NaCl$. В изотонична среда еритроцитите запазват своя обем и нормалната си двойно вдлъбната форма **(А)**, в хипотонична те се раздуват и могат да лизират **(С)**, а в хипертонична се свиват **(В)**. И в двата случая се нарушават техните функции.

Осмозата играе важна роля в растителните и животински организми, способствайки за движението на водата през клетъчните мембрани, които са селективно проницаеми. Едно от условията за нормална жизнена дейност на всички клетки е изотоничност на екстрацелуларната среда, в която те се намират.

Измервания на осмотичното налягане се използват в клиничната практика за определяне осмоларността на биологични флуиди като серум, плазма, урина, ликвор. В такива важни от клинична гледна точка течности, осмоларността се обуславя главно от няколко вида малки молекули и йони. В серума например това са **електролитите, глюкозата и уреята**. По-големите белтъчни молекули присъстват в серума в много по-високи концентрации (тегло/обем), но тъй като имат висока молекулна маса и не дисоциират на по-малки частици, техният брой е много по-малък от този на натриевите йони например.

Филтрация



Филтрацията е движение на течност (най-често вода) през порите на мембрана под въздействие на градиент на хидравличното налягане. Скоростта на филтрация се описва от уравнение, което е следствие от **закона на Хаген-Поазьой**:

$$I = P_F \Delta p$$

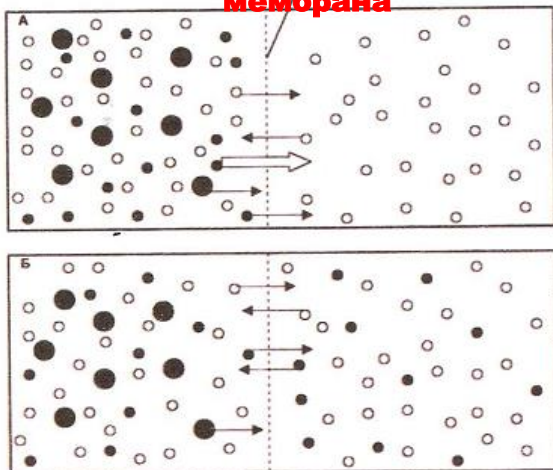
P_F е филтрационен коефициент на проницаемост на мембраната. Неговата стойност зависи от свойствата на мембраната (брой, радиус и дължина порите) и на течността (вискозитет и плътност): $P_F \propto \frac{npr^4}{\eta \Delta x}$, където n , r и Δx са съответно броят, радиусът и дължината на мембранните пори, а η и ρ - вискозитетът и плътността на филтрираната течност.

Най-често потокът на вода през биологичните мембрани се определя от два типа градиенти - на осмотично ($\Delta\pi$) и хидравлично (Δp) налягания:

$$I = P_{HD} (\Delta\pi \pm \Delta p)$$

Диализа

Селективно проницаема мембрана



Да разгледаме затворен съд, съдържащ вода и воден разтвор на NaCl, разделени от мембрана, пропускаща *не само молекулите на водата, но и натриевите йони* **(А)**. В такъв случай освен водните молекули през мембраната ще могат да дифундират (в противоположни посоки) и натриевите йони. След установяването на равновесие **(Б)**, в обема, в който е имало само молекули на водата, ще има вече и йони на натрия в концентрация, равна на тази от другата страна на мембраната. С други думи, там допълнително ще са преминали натриеви йони. Ако водата от тази страна на мембраната тече и постоянно отнася със себе си дифундираните в нея йони на натрия, това ще поддържа постоянно концентрационен градиент за тях, докато те постепенно напълно бъдат изведени от разтвора.



Чрез диализа може да бъде извършено разделяне на частиците на различни разтворени вещества. Това зависи от техните размери (маса) и проницаемостта на диализната мембрана (главно от размерите на нейните пори). Диализата се използва най-често за разделяне на високомолекулни от нискомолекулни вещества (например на белтъци от минерални соли).

Такъв процес протича и в бъбреците. Чрез диализа в бъбреците нискомолекулните продукти на катаболитните процеси преминават от кръвта в урината (хемодиализа) и чрез нея извеждат от организма.