

Поверхневі явища. Адсорбція на межі поділу фаз. Хроматографія

План

1. Поверхневі явища, їх роль і класифікація
2. Поверхнева енергія і поверхневий натяг
3. Поверхнево-активні речовини і адсорбція на рухомій межі поділу фаз
4. Біологічна роль поверхневих явищ. Будова біологічних мембран
5. Адсорбція на межі поділу тверде тіло-газ
6. Адсорбція на межі поділу тверде тіло-розчин
7. Фізико-хімічні основи адсорбційної терапії
8. Хроматографія та її застосування в біології і медицині

1. Поверхневі явища, їх роль і класифікація

У гетерогенних системах на межі поділу фаз відбуваються особливі процеси, що супроводжуються так званими *поверхневими явищами*. Саме на поверхні поділу фаз відбуваються процеси обміну, синтезу, адсорбції, десорбції, ферментативні реакції тощо, які забезпечують життєдіяльність організмів.

Насамперед життя людини починається з дихання, яке відбувається за участю кисню. Він вбирається альвеолами легень, кількість яких досягає сотень мільйонів, а їх загальна поверхня становить приблизно 90 м², що у 50 разів перевищує поверхню тіла людини. Далі кисень зв'язується гемоглобіном і переноситься червоними кров'яними тільцями - еритроцитами, кількість яких у крові людини досягає 27 трильйонів, а поверхня становить близько 3200 м².

Сумарна поверхня мембран усіх клітин організму людини дуже велика і становить приблизно 15 тис. м², частка біомембран дорівнює 3/4 маси сухої клітини.

Отже, дослідження фізико-хімії поверхневих явищ тісно пов'язане з вивченням цих важливих процесів у живих системах.

Активоване вугілля завдяки величезній поверхні (1г вугілля має поверхню 1000 м²) виявляє високу адсорбційну здатність і застосовується у медичній практиці та промисловості для поглинання шкідливих газів, токсинів тощо.

Залежно від агрегатного стану контактуючих фаз поверхні поділу класифікують на:

рухомі межі поділу: рідина-газ ($P-G$), рідина-рідина ($P-P$);

нерухомі межі поділу: тверде тіло-газ ($T-G$), тверде тіло-рідина ($T-P$), тверде тіло-тверде тіло ($T-T$).

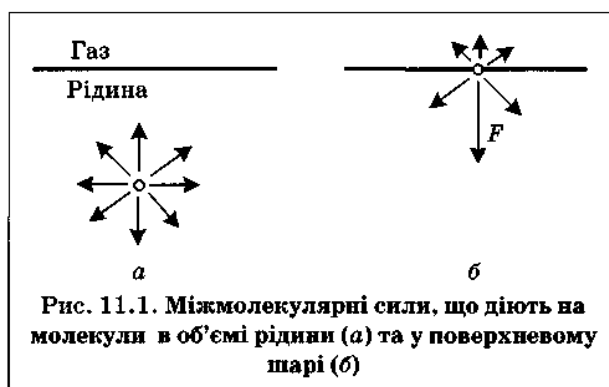
Далі розглянемо види і суть поверхневих процесів, що відбуваються на рухомих і нерухомих межах поділу фаз.

2. Поверхнева енергія і поверхневий натяг

Будь-яка гетерогенна система на межі поділу фаз має певний запас вільної поверхневої енергії. Який механізм її виникнення? Розглянемо посудину, в яку

налито рідину. Властивості молекул на поверхні поділу рідина-газ (повітря) відрізняються від властивостей молекул в об'ємі рідкої фази.

Молекули всередині рідини рівномірно притягуються з усіх боків такими самими за природою молекулами, і силове поле міжмолекулярної взаємодії скомпенсоване (рівнодійна сил дорівнює нулю).



Якщо молекула рідини знаходиться на поверхні поділу фаз, сили міжмолекулярної взаємодії не зрівноважуються, оскільки інтенсивність взаємодії між молекулами рідини значно вища, ніж між молекулами рідини та газу; рівнодійна сил F не дорівнює нулю і напрямлена всередину рідкої фази. Це зумовлює втягування поверхневих молекул углиб рідини. Таким чином, молекули, розташовані на поверхні, мають певний надлишок енергії, який називають *вільною поверхневою енергією* G_s . Відношення надлишку вільної поверхневої енергії Гіббса до площі поверхні поділу фаз називають *поверхневим натягом*:

$$\sigma = \frac{G_s}{S},$$

де G_s - вільна поверхнева енергія; S - площа поверхні поділу фаз; a - поверхневий натяг. Його можна визначити як роботу при оборотному ізотермічному процесі, яку потрібно виконати для збільшення поверхні поділу фаз на 1 м^2 . Виражають в одиницях сили на одиницю довжини (Н/м) або величиною енергії на одиницю площі (Дж/м²).

Величину поверхневого натягу визначають експериментально кількома методами: капілярного підняття, максимального тиску бульбашок повітря (метод Ребіндера), сталагмометричним, відриву кільця, втягування пластинки (метод Вільгельмі) та ін.

Поверхневий натяг - характерна фізична константа будь-якої чистої рідини за сталої температури. Він тим більший, чим більші полярність молекул рідини і здатність їх утворювати водневі зв'язки. Порівняно з іншими рідинами, поверхневий натяг води є найбільшим.

Згідно з другим законом термодинаміки, поверхнева енергія рідини прагне досягти мінімуму. У чистих рідинах такий стан забезпечується зменшенням площі поверхні S . Цим пояснюють кулясту форму крапель води, оскільки поверхня кулі мінімальна. Проте форма крапель у різних рідин різна. У ртуті, поверхневий натяг якої дуже великий ($4851 \text{ СГ}^3 \text{ Н/м}$), краплі мають форму ідеальної кулі. У води притягання молекул слабше, поверхневий натяг менший ($72,75 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$) і краплі мають овальну (витагнуту) форму. А спирт,

бензен, у яких поверхневий натяг ще менший, розтікаються по поверхні у вигляді плівки.

Поверхневий натяг залежить від температури і для багатьох рідин лінійно зменшується з її підвищенням. Це пояснюють тим, що через прискорений рух послаблюються сили притягання молекул і за певної критичної температури (температура кипіння) поверхневий натяг дорівнюватиме нулю - зникне межа поділу, система стане гомогенною, рідина перейде у газуватий стан. Таку закономірність встановив ще Д. Менделєєв.

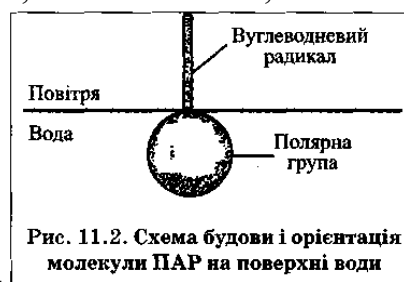
3. Поверхнево-активні речовини і адсорбція на рухомій межі поділу фаз

Із формули (11.1) випливає, що поверхнева енергія системи залежить від поверхневого натягу та площі поверхні поділу фаз. Було зазначено, що запас вільної поверхневої енергії чистої рідини можна змінити, змінюючи її поверхню. Для розчинів цього можна досягти лише зміною поверхневого натягу. Отже, надлишок вільної поверхневої енергії на межі поділу фаз у розчинах компенсується самочинним зменшенням поверхневого натягу, яке відбувається під час адсорбції.

Адсорбція - це самочинний процес зміни концентрації компонентів у поверхневому шарі C_s порівняно з їх концентрацією в об'ємі фази C_v . Загалом залежно від природи розчиненої речовини поверхневий натяг розчину може зменшуватись, збільшуватись або не змінюватись, порівняно з поверхневим натягом розчинника.

Найпоширенішим розчинником у неживій і живій природі є вода. Тому саме стосовно води усі речовини поділяють на *поверхнево-активні*, *поверхнево-неактивні* (*поверхнево-інактивні*) та *поверхнево-індиферентні*. Такий поділ умовний, оскільки значна кількість речовин, які є поверхнево-активними у водних розчинах, - поверхнево-неактивні в інших розчинниках.

Поверхнево-активні речовини (ПАР) - це сполуки, що адсорбуються на поверхні поділу фаз ($C_s > C_v$) і зменшують поверхневий натяг води ПАР поділяють на аніонактивні, катюнактивні, неюногенні та



амфолітні (амфотерні). ($\sigma_{р-ну} < \sigma_{води}$).

Така властивість ПАР визначається особливістю їх будови .

У молекулі ПАР розрізняють дві частини: неполярну (вуглеводневий ланцюг) та полярну (функціональна група, наприклад —ОН, —СООН, —NH₂, —SO₃H та ін.). Тому до ПАР належать спирти, жир-

ні кислоти та їх солі (мила), сульфокислоти та інші класи органічних сполук. Вуглеводнева частина молекули *гідрофобна* (відштовхує воду), а полярна група, яка має значний дипольний момент і інтенсивно взаємодіє з водою, є *гідрофільною* (тобто притягує воду). Молекули, що мають таку будову, називають *дифіль-*

ними. Найвигіднішим положенням дифільних молекул є їх розміщення на межі поділу фаз, оскільки полярна група втягується водою, а неполярний вуглеводневий радикал виштовхується з неї.

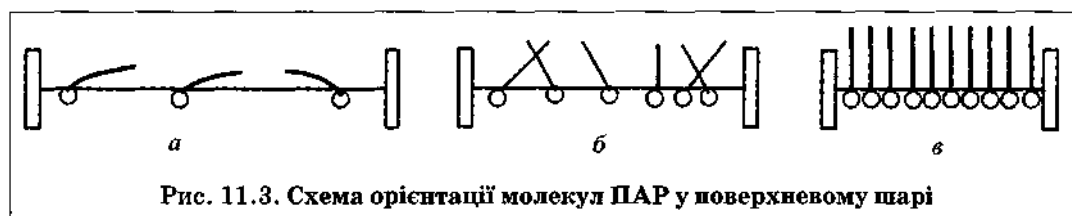
У дифільних молекул з короткою гідрофобною частиною (нижчі представники наведених гомологічних рядів) переважають гідрофільні властивості, тому вони легко розчиняються у воді. Зі збільшенням довжини вуглеводневого радикалу посилюються гідрофобні властивості речовин, знижується їх розчинність у воді і зменшується власний поверхневий натяг.

Поверхнево-неактивними (ПНР) називають речовини, які збільшують поверхневий натяг води і концентруються в об'ємі розчину ($C_S < C_V$). До поверхнево-неактивних речовин належать неорганічні кислоти, основи, солі та деякі дуже полярні органічні сполуки (гліцерол, амінокислоти тощо). ($\sigma_{р-ну} > \sigma_{води}$)

Поверхнево-індиферентними (ПІР) називають речовини, що не змінюють поверхневий натяг розчинника <

($\sigma_{р-ну} = \sigma_{води}$), оскільки їх поверхнева й об'ємна концентрації однакові ($C_S = C_V$). Прикладом таких речовин є сахароза та інші вуглеводи, форміатна кислота НСООН (містить полярну групу, але не має вуглеводневого радикалу).

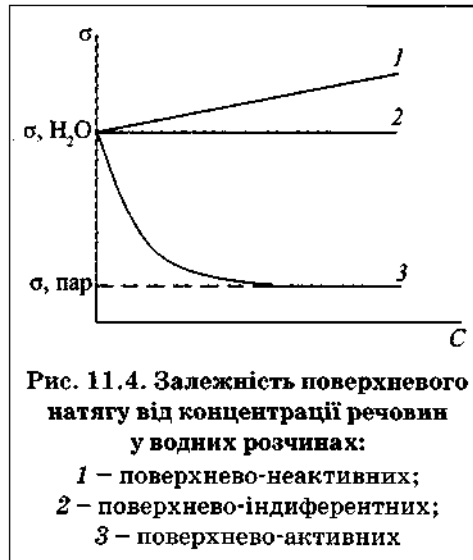
Як орієнтуються молекули ПАР у поверхневому шарі і як змінюватиметься при цьому поверхневий натяг? Якщо концентрація дифільних молекул ПАР невелика, то всі вони розміщуються на межі поділу так, що вуглеводневі радикали знаходяться на поверхні води і орієнтовані щодо неї під кутом, близьким до 10° . Таке розміщення можливе завдяки гнучкості вуглеводневого ланцюга.



При збільшенні концентрації молекули ПАР набувають чіткішої орієнтації, за певної їх концентрації розміщуються чітко вертикально, утворюючи насичений мономолекулярний адсорбційний шар. Висновок про те, що в мономолекулярному поверхневому шарі вуглеводневі радикали ПАР орієнтовані

вертикально, було підтверджено рентгенографічними дослідженнями.

Поверхневу плівку з одного шару молекул ПАР, що утворюється на межі між водним розчином ПАР і повітрям, органічною рідиною або твердою поверхнею, називають **моношаром**.



Як змінюється поверхневий натяг зі збільшенням концентрації розчиненої речовини (ПАР, ПНР, ППР)? *Графіки залежності σ — C називають ізотермою поверхневого натягу* і можуть мати вигляд, зображений на рис. 11.4. Для поверхнево-неактивних речовин зі збільшенням концентрації поверхневий натяг зростає (крива 1), для поверхнево-індиферентних - не змінюється (крива 2), а для поверхнево-активних - зменшується (крива 3).

Аналіз ізоTERM поверхневого натягу свідчить, що всі криві починаються з однієї точки, яка відповідає поверхневому натягу води. При добавлянні до води перших порцій ПАР останні майже повністю розподіляються у поверхневому шарі і поверхневий натяг різко зменшується. Момент утво-

рення насиченого мономолекулярного шару ПАР відповідає мінімуму поверхневого натягу .

Поверхнева активність. Правило Дюкло—Траубе. Здатність поверхнево-активних речовин знижувати поверхневий натяг кількісно виражають *поверхневою активністю*. Її визначають як відношення зміни поверхневого натягу до зміни концентрації ПАР і на честь Гіббса позначають буквою G :

$$G = \pm \frac{d\sigma}{dc}$$

У Міжнародній системі одиниць (СІ) поверхневу активність вимірюють у Джм/моль або Нм²/моль. Вона показує зменшення поверхневого натягу розчину при зміні концентрації ПАР на одиницю і характеризує адсорбційну здатність речовини. $\frac{d\sigma}{dc} < 0$,

Якщо поверхневий натяг зі збільшенням концентрації розчиненої речовини зменшується, то

що спостерігається для ПАР. Для ПНР поверхнева активність є додатною величиною: $\frac{d\sigma}{dc} > 0$,

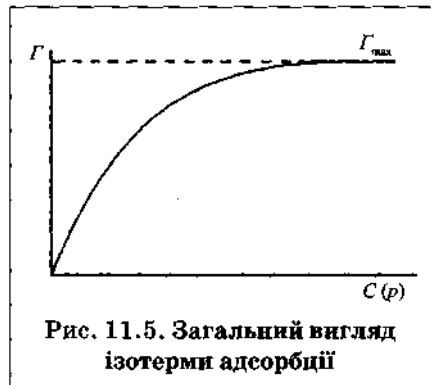
оскільки зі зростанням концентрації таких речовин поверхневий натяг також збільшується.

Від чого залежить поверхнева активність ПАР? Виявилось, що поверхнева активність дифільних молекул залежить від довжини вуглеводневого радикалу. Біолог П. Дюкло та фізіолог **Ж. Траубе** (1831) сформулювали таке правило: у певному гомологічному ряду (жирних кислот, спиртів та інших дифільних сполук) у водних розчинах однакової концентрації зі збільшенням довжини вуглеводневого радикалу на одну групу —CH₂— поверхнева активність збільшується у 3-3,5раза, тобто

$$\frac{G_{n+1}}{G_n} = \beta \approx 3-3,5,$$

де G - поверхнева активність; n - число груп —CH₂— ; β - коефіцієнт Траубе.

Правило Дюкло-Траубе найточніше виконується за низьких концентрацій розчинених речовин. Із нього випливає важливий висновок: площа, яка припадає на одну молекулу максимально насиченого ПАР адсорбційного шару, залишається сталою в межах гомологічного ряду. Наприклад, для спиртів вона становить 0,25 нм² (0,25-НГ¹⁸ м²), для кислот - 0,205 нм² (0,205-10⁻¹⁸ м²). Згідно з правилом Дюкло-Траубе змінюється анальгетична та наркотична дія відповідних лікарських препаратів.



Мінімальне значення поверхневого натягу на ізотермах відповідає моменту повного насичення поверхневого шару молекулами ПАР, тобто максимальній адсорбції (Γ_{max}). *Графік залежності величини адсорбції від концентрації $\Gamma = f(C)$ називають ізотермою адсорбції.*

Наведені графіки показують, що зі збільшенням концентрації ПАР адсорбція зростає, причому за малих концентрацій залежність пропорційна, а за високих - адсорбція досягає свого граничного значення Γ_{max} і потім не змінюється. Величина Γ_{max} є сталою для всіх чле-

нів гомологічного ряду, оскільки визначається тільки природою функціональних груп.

Рівняння адсорбції Гіббса та його аналіз. На сьогодні ще не розроблено надійних методів визначення надлишку розчиненої речовини у поверхневому шарі, проте можна експериментально точно виміряти поверхневий натяг розчинів ПАР різних концентрацій, а потім обчислити величину адсорбції за **рівнянням Гіббса** (1878):

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \frac{d\sigma}{dc},$$

де Γ - величина адсорбції розчиненої речовини, моль/м², C - загальна концентрація розчину, моль/м³; R - газова стала; T - абсолютна температура, К; поверхнева активність G , Н-м²/моль. $\pm \frac{d\sigma}{dc}$

Рівняння Гіббса є математичним обґрунтуванням загального правила: *речовина, що зменшує поверхневий натяг, концентрується у поверхневому шарі.*

$$\frac{d\sigma}{dc} < 0$$

Аналіз рівняння Гіббса (11.4) підтверджує, що оскільки для ПАР то адсорбція є додатною величиною ($\Gamma > 0$); для ПНР і адсорбція є від'ємною ($\Gamma < 0$), тобто поверхнево-неактивні речовини

$$\frac{d\sigma}{dc} > c$$

адсорбуються на межі поділу, а розподіляються в усьому об'ємі розчину

4. Біологічна роль поверхневих явищ. Будова біологічних мембран

Поверхневий натяг і адсорбція мають велике значення у процесах обміну речовин у живих системах. Поверхневий натяг біологічних рідин значно менший, порівняно з водою, завдяки наявності в них поверхнево-активних речовин. Так, поверхневий натяг сироватки крові людини становить $(40—47)10^{-3}$ Дж/м². Оскільки ПАР здатні концентруватись біля стінок судин і клітинних мембран, вони підвищують їх проникність і поліпшують обмінні процеси. Відомо особливий вид біологічно активних ПАР, так званих *сурфактантів*, що знаходяться в легенях. їх основним компонентом є дипальмітил-фосфатидилхолін (ДПФХ).

Особлива роль поверхневих явищ у функціонуванні біологічних мембран. Відомо, що одним із компонентів клітин є зовнішні (плазматичні) мембрани, які відокремлюють внутрішній вміст клітини від зовнішнього середовища. Для молекул та йонів мембрана діє як фільтр, тобто пропускає одні частинки та затримує інші.

Мембранні структури розміщуються не тільки на периферії клітини, а й усередині її і відокремлюють ядро від цитоплазми, що його оточує. В особливих випадках утворюються й інші мембрани, наприклад, диски у зовнішньому сегменті паличок сітківки.

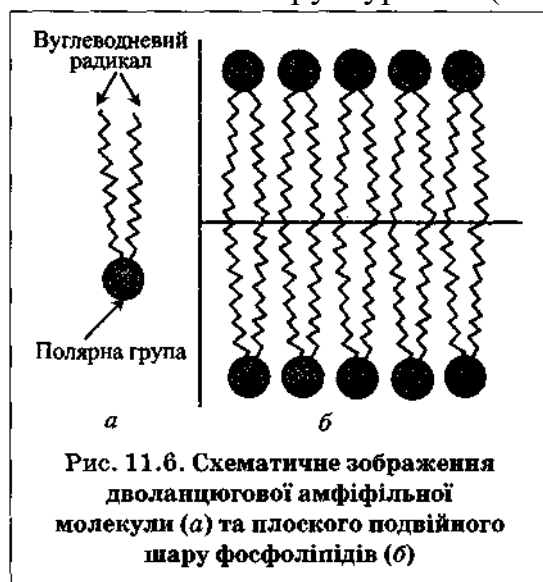
Структурною основою мембрани є дифільні (амфіфільні) молекули ліпідів. Мембранні ліпіди містять довгі вуглеводневі радикали, холестерин та його естери. Найчастіше амфіфільними сполуками у складі мембран є фосфоліпіди -естери гліцерофосфату.

Амфифільні молекули поділяють на одно- та дволанцюгові.
Важливою властивістю дволанцюгових амфифільних молекул є їх здатність до утворення

подвійних шарів у водних середовищах у вигляді пластинчастих структур.

Дифільні молекули об'єднуються так, що їхні полярні групи контактують з водою, а вуглеводневі радикали збираються разом і утворюють вуглеводневу фазу. Одноланцюгові амфифільні молекули прагнуть до утворення у водному середовищі глобулярних міцел¹, а не бімолекулярних шарів.

Таким чином, тенденція до формування мембраноподібних плоских бімолекулярних шарів - це властивість винятково дволанцюгових амфифільних молекул. Подвійний шар фосфоліпідів - основа замкнених структур (ліпосом) різних типів .



Усередині подвійного шару фосфоліпідів знаходяться молекули білків. Вони відіграють роль каталізаторів хімічних реакцій, що відбуваються на мембранах, та рецепторів сигналів, за допомогою яких клітина взаємодіє із навколишнім середовищем та іншими клітинами.

Мембрана має будову рідкого кристала, що дуже важливо для її функціонування. При переході мембрани з рідкокристалічного стану в упорядкований її робота гальмується. У такому разі спостерігається розвиток патологічних процесів в організмі - атеросклероз, утворення жовчних каменів тощо.

5. Адсорбція на межі поділу тверде тіло-газ

Межі поділу між твердим тілом і газом та твердим тілом і розчином належать до *нерухомих меж поділу фаз*. Усі випадки вбирання газів і випарів твердими тілами називають *сорбцією*. Якщо цей процес відбувається тільки на поверхні, його називають *адсорбцією*, якщо речовина, що вбирається поверхнею, дифундує всередину поглинаючої речовини і розподіляється по її об'єму, таке явище називають *абсорбцією*.

Тверде тіло, на поверхні якого відбувається адсорбція, прийнято називати *адсорбентом*, а речовину, що адсорбується, - *адсорбтивом*. Речовину в адсорбованому стані називають *адсорбатом*.

Тверді адсорбенти - це природні і штучні матеріали з великою зовнішньою і внутрішньою поверхнями, на яких відбувається процес адсорбції. Непоруваті адсорбенти (порошкоподібні речовини) мають значну зовнішню поверхню, а по-

руваті (силікагель, активоване вугілля, алюмогелі тощо) - внутрішню за рахунок величезної кількості мікропор. Слід зауважити, що поверхня адсорбенту неоднорідна і адсорбція відбувається лише на окремих «активних центрах». Важливою

характеристикою адсорбентів є їх питома поверхня.

Величину адсорбції визначають співвідношенням числа молекул n адсорбату до одиниці площі поверхні S (м²), або маси m (кг) адсорбенту:

$$\Gamma = \frac{n}{S} \text{ [моль/м}^2\text{]}; \Gamma = \frac{n}{m} \text{ [моль/кг]}.$$

Унаслідок адсорбції відбувається самочинне зменшення поверхневого натягу адсорбенту до встановлення рівноваги між швидкостями прямого процесу (*адсорбції*) і зворотного, який називають *десорбцією*.

Десорбція - це відокремлення адсорбованих молекул з поверхні адсорбенту.

Залежно від природи адсорбційних сил розрізняють два види адсорбції: *фізичну* та *хімічну (хемосорбцію)*.

Фізична адсорбція зумовлена дією силових полів поверхневих молекул адсорбенту, слабких вандерваальсових сил міжмолекулярної взаємодії, при цьому молекули адсорбату не втрачають своєї індивідуальності. Прикладом фізичної адсорбції може бути вбирання благодородних газів активованим вугіллям.

Хімічна адсорбція зумовлена валентними силами хімічної взаємодії між поверхневими молекулами адсорбенту і адсорбату. На поверхні адсорбенту утворюються хімічні сполуки, і окремі молекули втрачають свою індивідуальність. На відміну від фізичної, хемосорбція характеризується необоротністю, тепловим ефектом, близьким до енергії утворення хімічних сполук (40-120 кДж/моль), збільшенням адсорбції за підвищення температури.

Прикладом хемосорбції є реакція у протигазах з використанням адсорбенту - активованого вугілля: отруйний газ фосген COCl_2 , проходячи крізь шар активованого вугілля, розкладається з утворенням нетоксичних сполук за рівнянням $\text{COCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{HCl}$.

На адсорбцію газів на нерухомій поверхні впливають такі чинники.

Тиск газу p над поверхнею твердого адсорбенту. Залежність адсорбції газу від тиску виражають ізотермою адсорбції (див. рис. 11.5). Адсорбція досягає максимального граничного значення, коли вся поверхня адсорбційних центрів буде зайнята молекулами адсорбату й утвориться насичений мономолекулярний шар.

Температура. З підвищенням температури фізична адсорбція зменшується, а хімічна - зростає.

Природа газу. Газ тим краще адсорбується, чим легше він зріджується і чим вища його критична температура.

Природа адсорбенту і його питома поверхня. Питому поверхню адсорбенту $S_{\text{пит}}$ виражають відношенням поверхні поділу фаз S до одиниці маси адсорбенту m :

$$S_{\text{пит}} = \frac{S}{m}.$$

У поруватих адсорбентах $S_{\text{пит}}$ зростає як унаслідок збільшення дисперсності, так і за рахунок площі пор. Наприклад, у непоруватій речовині (цукрової пудри) та поруватій (активованого вугілля)

питома поверхня відповідно становить $= 510^2 \text{ м}^2/\text{кг}$ і $5 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{кг}$, тобто у поруватого адсорбенту вона більша в тисячу разів.

Площа поверхні однієї таблетки активованого вугілля (0,25 г) досягає 125 м^2 , тому його використовують у медичній практиці як ефективний дезін-токсикаційний засіб. З метою активації деревне або тваринне вугілля піддають обробці *перегрітою водяною парю* (при $100 \text{ }^\circ\text{C}$). При цьому пори очищаються від смолистих речовин, внутрішня поверхня значно збільшується і тому зростає адсорбційна здатність.

Теорія мономолекулярної адсорбції Ленгмюра. Адсорбція газу на твердій поверхні є найпростішим випадком адсорбції. Для характеристики цього процесу американський учений І. Ленгмюр запропонував *теорію мономолекулярної адсорбції*, основні положення якої такі.

Адсорбція має локалізований характер, тобто молекули адсорбату не можуть переміщуватися по поверхні адсорбенту, між адсорбованими молекулами і поверхневим шаром відсутня будь-яка взаємодія.

Адсорбція молекул адсорбтиву відбувається на *активних (адсорбційних) центрах* твердої поверхні. Кожен такий центр адсорбує лише одну молекулу адсорбтиву, тому на поверхні адсорбенту утворюється лише мономолекулярний шар адсорбату.

Адсорбовані молекули постійно десорбуються і перебувають в адсорбованому стані мільйонні частки секунди. Між процесом адсорбції й десорбції встановлюється адсорбційна рівновага, унаслідок якої розподіл молекул газу між поверхнею і об'ємом залишається сталим.

Кількість адсорбованої речовини Γ залежить від тиску газу і температури. Найчастіше досліджують залежність адсорбції від тиску за сталої температури (ізотерму адсорбції). На основі експериментальних даних Ленгмюр запропонував *рівняння ізотерми адсорбції*:

$$\Gamma = \Gamma_{\max} \frac{p}{K + p}$$

яке називають *рівнянням ізотерми адсорбції Ленгмюра*. Його можна застосовувати і до мономолекулярної адсорбції з розчинів.

Якщо молекули розчинено! речовини адсорбуються на поверхні адсорбенту, а їх концентрація дорівнює C , то

$$\Gamma = \Gamma_{\max} \frac{C}{K + C}.$$

Аналіз рівняння Ленгмюра показує, що у випадку малих значень тиску p (або концентрації C), коли $p < K$, отримаємо вираз Як впливає з цього рівняння, поверхнева концентрація молекул

газу Γ прямо
$$\Gamma = \frac{\Gamma_{\max}}{K} p$$

пропорційна тиску p .

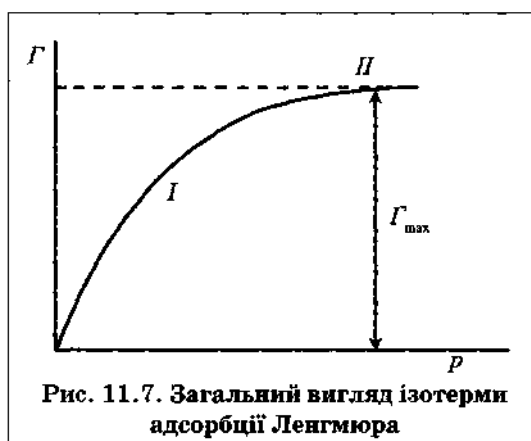


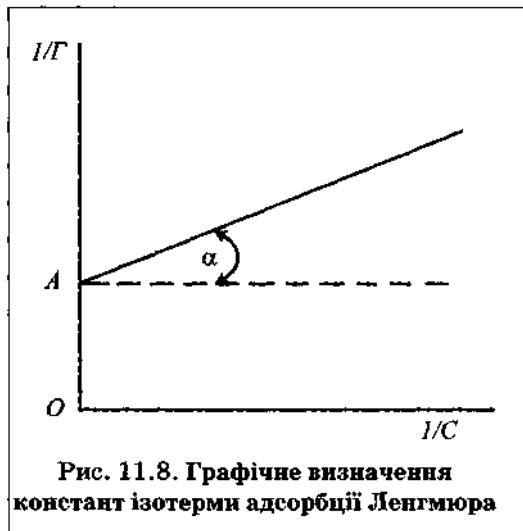
Рис. 11.7. Загальний вигляд ізотерми адсорбції Ленгмюра

У разі високого значення тиску, коли $p > K$, одержимо $\Gamma = \Gamma_{\max}$, тобто кількість адсорбованих молекул дорівнює числу активних центрів, адсорбція досягає граничного значення Γ_{\max} і далі не змінюється, ділянка II).

Адсорбційний мономолекулярний шар на поверхні поділу рідина-газ, як і нерозчинний мономолекулярний шар на поверхні поділу тверде тіло-газ, називають *частоколом Ленгмюра*.

Константа K відображує спорідненість молекул газу й адсорбенту. Що менше значення K , то за нижчого тиску виконується умова $p < K$ та досягається насичення поверхні.

Для експериментального визначення Γ_{\max} і K рівняння Ленгмюра перетворюють на рівняння прямої



$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\Gamma_{\max}} + \frac{K}{\Gamma_{\max}} \left(\frac{1}{C} \right)$$

і будують графік залежності $1/\Gamma$ від $1/C$

Тангенс кута нахилу прямої α дорівнює K/Γ_{\max} , а відрізок OA на осі ординат дорівнює $1/\Gamma_{\max}$.

Теорія мономолекулярної адсорбції Ленгмюра спрощує картину адсорбції, оскільки насправді адсорбція не обмежується утворенням мономолекулярного шару, а супроводжується виникненням кількох моношарів. Ця теорія полімолекулярної адсорбції дістала назву *теорії BET*.

6. Адсорбція на межі поділу тверде тіло-розчин

Адсорбція речовин із розчинів на твердих адсорбентах має велике практичне значення. Її широко застосовують у промисловості для очищення газів, питної води та стічних вод, повітря, цукру від забруднень, а також у медичній практиці для очищення організму від чужорідних речовин (отрут, токсинів, великих

доз сильнодіючих лікарських препаратів) тощо. Перші дослідження з адсорбції з розчинів на вугіллі виконав російський учений Т. Ловіц (1785).

Ізотерми адсорбції речовин із розчинів подібні до ізотерм адсорбції газів. Разом з тим адсорбція з розчинів - значно складніший процес, який залежить від природи розчиненої речовини та її концентрації, природи розчинника та адсорбенту. Особливості цього виду адсорбції такі.

На поверхні адсорбенту, поряд з адсорбцією розчиненої речовини, відбувається адсорбція розчинника, тобто молекули розчинника конкурують з молекулами розчиненої речовини за адсорбційні центри на поверхні твердого тіла. Тому можливі два види адсорбції з розчинів: *позитивна*, коли молекули розчиненої речовини адсорбуються краще за молекули розчинника, і *негативна*, коли молекули розчинника адсорбуються краще за молекули розчиненої речовини.

Адсорбція з розчинів відбувається повільніше від адсорбції газів.

З підвищенням температури розчину адсорбція зменшується.

Залежність адсорбції речовин (газуватих або твердих) від їх концентрації у розчині описують *емпіричним рівнянням Фрейндліха*:

$$\frac{x}{m} = k p^{\frac{1}{n}}, \text{ або } \frac{x}{m} = k C^{\frac{1}{n}}$$

де x - кількість речовини адсорбтиву, моль; m - маса адсорбенту;

p - рівноважний тиск; C - рівноважна концентрація; k і $1/n$ - емпіричні константи.

Наведене рівняння (11.10) показує: що вищий тиск або концентрація розчиненої речовини, то більша кількість речовини адсорбується на поверхні адсорбенту, але пропорційність має не прямий, а експоненціальний характер.

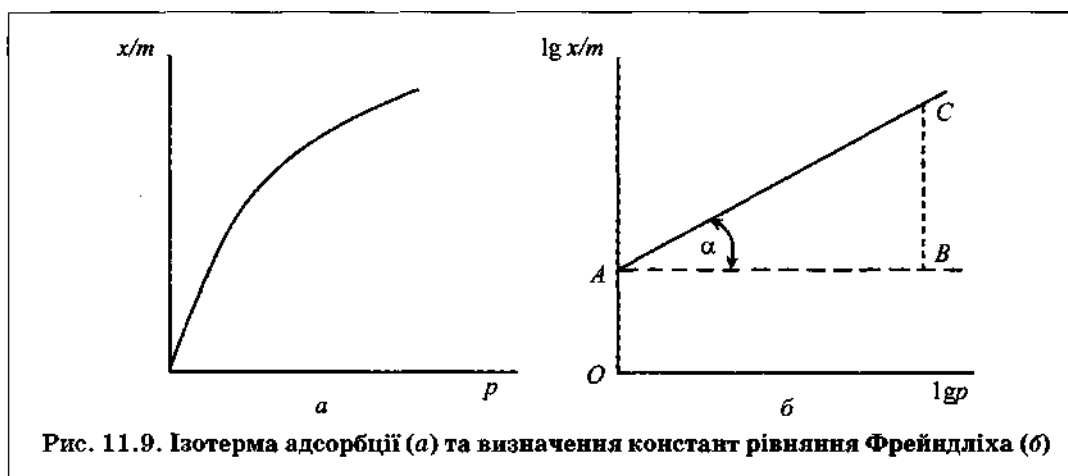


Рис. 11.9. Ізотерма адсорбції (а) та визначення констант рівняння Фрейндліха (б)

Константа k залежить від властивостей адсорбенту, адсорбату і температури і має назву *питомої адсорбції*, тобто вона чисельно дорівнює адсорбції за рівноважної концентрації 1 моль/дм³.

Для визначення констант рівняння Фрейндліха перетворюють

логарифмуванням на лінійну форму: $\lg \frac{x}{m} = \lg k + \frac{1}{n} \lg C$.

Експериментально визначають величину адсорбції $\Gamma = x/m$ $\lg \frac{x}{m} - \lg p$,

важних тисків p або концентрацій C , будують логарифмічний графік у координатах за яким знаходять константи відрізок OA дорівнює

константі k і $\frac{1}{n} \lg k$, а $\text{tg} \alpha = \frac{1}{n}$.

Зазначимо, що рівняння Фрейндліха справджується лише за середніх значень тиску.

Розчинена речовина може знаходитись у розчині у вигляді молекул (не-електроліти, слабкі електроліти) або йонів (сильні електроліти), тому залежно від природи адсорбованих частинок на твердій поверхні адсорбцію поділяють на *молекулярну* та *йонну*.

Молекулярна адсорбція. Для молекулярної адсорбції характерні такі закономірності.

Адсорбція - вибірковий процес, який залежить від **полярності адсорбенту**. Доведено, що на полярних адсорбентах краще адсорбуються полярні речовини, а на неполярних - неполярні. Наприклад, на поверхні полярного адсорбенту силікагелю SiO_2 легко адсорбуються спирти, вода, аміни тощо, а на неполярному вугіллі або сажі C - неполярні органічні речовини, причому чим більша молярна маса адсорбтиву, тим інтенсивніше відбувається адсорбція.

Важливу роль у процесі адсорбції речовин з розчинів відіграє **полярність розчинника**, мірою якої є діелектрична проникність ϵ . Акад. П. Ребіндер сформулював **правило вирівнювання полярностей**: на полярних адсорбентах краще адсорбуються полярні речовини із неполярних або малополярних розчинників, а на неполярних - неполярні речовини із полярних розчинників. Отже, процес адсорбції відбувається у бік вирівнювання полярностей фаз, причому чим більша різниця полярностей, тим швидше відбувається цей процес.

Це твердження узгоджується з **правилом Шилова**: що краще речовина розчиняється у розчиннику, то гірше вона адсорбується на твердій поверхні, і навпаки, що речовина менш розчинна, то вона краще адсорбується

При адсорбції речовин із багатокомпонентних розчинів спостерігається витіснення одних речовин з поверхневого шару і заміна їх іншими залежно від їх поверхневої активності. Підтверджується **правило витіснення Фрейндліха**: *що краще адсорбується речовина з індивідуального розчину, то краще вона адсорбується і з суміші, оскільки має здатність витіснити інші речовини.*

Саме механізм витіснення одних молекул субстрату на поверхні ферментів іншими відбувається під час ферментативних процесів, оскільки поверхнева активність продуктів розкладання є меншою за поверхневу активність вихідних речовин.

3. При адсорбції з розчинів справджується **правило Дюкло-Траубе**. Адсорбція представників гомологічного ряду ПАР на гідрофобних адсорбентах з вод-

них розчинів збільшується зі зростанням довжини вуглеводневого радикалу: $\text{HCOOH} < \text{CH}_3\text{COOH} < \text{C}_2\text{H}_5\text{COOH} < \text{C}_3\text{H}_7\text{COOH} < \text{C}_4\text{H}_9\text{COOH}$.

Адсорбцію широко застосовують у медицині. Починаючи з 80-х років ХХ ст., у медичній практиці стали широко використовувати *ентеросорбенти* та *Імобілізовані препарати*, тобто ферменти, гормони, антибіотики, зафіксовані на поверхні неорганічних та органічних полімерів. Такими полімерами є похідні акрилових кислот, вінілового спирту, вінілпіролідону, силікагель тощо.

Імобілізовані біопрепарати використовують у медичній практиці для діагностики та лікування багатьох захворювань. Висвітленню основ адсорбційної терапії присвячено наступний розділ.

Адсорбція електролітів із розчинів. Адсорбція сильних електролітів із розчинів істотно відрізняється від молекулярної адсорбції, адже електроліти в розчинах знаходяться у вигляді йонів. При цьому йони зазвичай адсорбуються на полярних адсорбентах.

Адсорбцію на твердій поверхні з розчинів електролітів називають *йонною*. **Йонна адсорбція** - це хімічна взаємодія між йонами розчиненої речовини і твердою поверхнею адсорбенту. Проте енергії утвореного нового хімічного зв'язку недостатньо для того, щоб відірвати поверхневі атоми адсорбенту. Тому зв'язок нової сполуки з твердим сорбентом зберігається.

Особливістю такої адсорбції є те, що на межі поділу тверде тіло-рідина виникає подвійний електричний шар. Тому поверхня адсорбенту набуває певного заряду, наявність якого спричинює притягання з розчину йонів протилежного знака.

Залежно від механізму процесу розрізняють *вибіркову* та *йонообмінну* адсорбцію сильних електролітів.

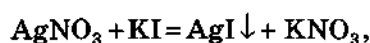
Вибіркова (селективна) адсорбція визначається процесом адсорбції катіонів або аніонів і підпорядковується правилам вибіркової адсорбції, сформульованим **Панетом** і **Фаянсом**.

Кристалічну ґратку адсорбенту добудовують ті йони електроліту, що входять до її складу, ізоморфні з її йонами або ті, що утворюють з ними важкорозчинні сполуки.

На твердій поверхні адсорбенту адсорбуються тільки ті йони, знак заряду яких протилежний знаку заряду поверхні адсорбенту.

Згідно з правилами Панета-Фаянса, для здійснення вибіркової адсорбції адсорбент має бути важкорозчинною сполукою і мати кристалічну будову, а розчин - надлишок саме тих йонів, з яких складається ґратка адсорбенту.

Наприклад, згідно з реакцією



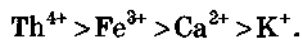
де KI взятий у надлишку, одержимо важкорозчинну сполуку - AgI, яка має кристалічну будову.

На поверхні кристалічної ґратки аргентум йодиду в певній послідовності розміщені йони Ag^+ і I^- (рис. 11.10), що робить її електронейтральною. Тому кристалічну ґратку AgI добудовують не йони K^+ або NO_3^- , а йони, що утворюють з ними важкорозчинну сполуку. При цьому крім електростатичних сил притягання діють хімічні сили. Йони I^- міцно адсорбуються, входять у кристалічну ґратку адсорбенту і надають їй негативного заряду.

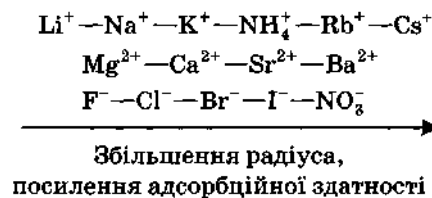
Під дією негативного заряду поверхні ґратки, завдяки електростатичному притягання, у шарі рідини біля негативно зарядженої поверхні перебувають йони Калію. На межі тверде тіло-розчин виникає ПЕШ. Детальніше механізм виникнення ПЕШ.

Природа йонів значною мірою впливає на їх здатність до адсорбції. Остання залежить від валентності, радіуса йона, ступеня його гідратації. За адсорбційною здатністю йони розміщують у **ліотропні ряди Гофмейстера**.

Доведено, що чим більший заряд йона, тим краще він адсорбується на твердій поверхні. Наприклад:



Адсорбційна здатність йонів однакового заряду залежить від їх радіуса та здатності до сольватації (гідратації). **Ліотропні ряди однозарядних йонів** мають такий вигляд:



Наведені правила вибіркової адсорбції йонів відіграють особливу роль у побудові колоїдних частинок, що розглядається .

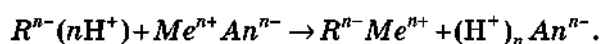
Ионообмінна адсорбція - це процес еквівалентного обміну одноіменно зарядженими йонами між адсорбентом і розчином. При цьому тверда поверхня адсорбенту поглинає з розчину катіони або аніони, а замість них віддає у розчин еквівалентну кількість інших йонів того самого знака, тому цей процес може бути описаний стехіометричним рівнянням. Адсорбенти, на поверхні яких відбувається процес еквівалентного обміну, називають **йонобмінниками**. Йонобмінники не розчинні ні у воді, ні в кислотах, ні в лугах.

За походженням йонобмінники бувають неорганічні та органічні, природні (глина, ґрунт, цеоліти та інші мінерали) та синтетичні (**йоніти**), серед яких найчастіше використовують **йонобмінні смоли** - високомолекулярні сполуки, на полімерній матриці яких розміщені ковалентно зв'язані йоногенні групи.

Функціональні властивості йонітів зумовлені природою йоногенних груп, і за цією ознакою йоніти поділяють на **катіоніти**, **аніоніти** та **амфоліти**. Останні залежно від умов здатні до обміну як катіонами, так і аніонами.

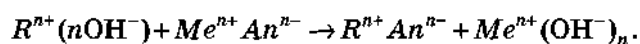
Елементарну комірку *катіоніту* можна розглядати як високомолекуляр-ний полівалентний аніон (R^n), відокремлений поверхнею поділу від середовища, що його оточує. Такий полівалентний аніон містить на поверхні велику кількість йонів Гідрогену, які здатні обмінюватися на катіони, що знаходяться в рідині. Тому катіоніт можна умовно записати так: $R^n-(nH^+)$. *Сильнокислотні катіоніти* містять залишки сульфатної, фосфатної та інших сильних кислот; *слабкокислотні* - карбоксильні —COOH, сульфогрупу —SO₃H та інші групи, що слабо дисоціюють. Наприклад, катіоніт марки КУ-1 є продуктом поліконденсації фенолобензолсульфокислоти і є біфункціональним катіонітом (містить фенольний гідроксил —OH і сульфогрупу —SO₃H).

На поверхні катіонітів відбувається *катіонний обмін*, який загалом можна зобразити таким рівнянням:



Комірку *аніоніту* можна уявити як високомолекулярний полівалентний катіон, протиіонами якого є гідроксид-іони OH⁻, здатні до обміну на аніони розчину, наприклад: $R^{n+}(nOH^-)$. Йоногенними групами *сильнодсновних аніонітів* є амонієві основи, а *слабкодсновних* - аміногрупи різного ступеня заміщення (—NH₂, =NH, =N—) та залишки інших органічних основ. Наприклад, аніоніт марки АН-10 є сіллю четвертинних амонієвих основ.

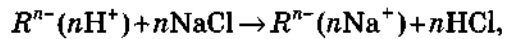
Схему *аніонного обміну*, який відбувається на поверхні аніоніту, можна зобразити так:



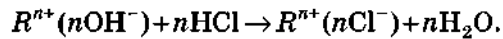
Однією з головних характеристик йонітів є їх *обмінна ємність*, тобто число мілімолів йонів, що зв'язує 1 г сухого йоніту з розчину за рівноважних умов.

Оскільки йонний обмін є оборотним процесом, це дає можливість регенерувати використані йоніти. Катіоніти регенерують кип'ятінням їх у \bar{M} розчині HCl, аніоніти - відповідно в \bar{M} розчині луку.

Найпіршого застосування йоніти набули для отримання знесоленої (демі-нералізованої) води. Для цього воду спочатку пропускають через колонку з катіонітом $R^n-(nH^+)$, де відбувається катіонний обмін, наприклад:



потім отриману підкислену воду пропускають через колонку з аніоном $R^{n+}(nOH^-)$:



Очищена вода за характеристиками не поступається воді дистильованій.

Біологічна роль йонного обміну. З обміном йонів пов'язана більшість процесів у живих системах. Кров як одну з найважливіших рідин організму можна розглядати як розчин електролітів із середньою концентрацією 0,05М. Йонооб-мінні властивості мають структурні елементи клітин: ядра, мітохондрії, мембрани, мікросоми та ін. Отже, можна вважати, що організми побудовані з йонів. Найпростіший йонний обмін виявляється також у дії ферментів та біологічних мембран.

Властивості йонів мають тканини рослин і тварин. Їх катіонообмінні властивості визначаються наявністю карбоксильних та фосфатних груп, а здатність обмінюватися аніонами - аміногрупами білків.

Йоніти використовують також як каталізатори деяких реакцій, для очищення стічних вод, у йонообмінній хроматографії - для виділення та очищення амінокислот. Їх застосовують у медичній практиці для консервування крові, при отруєннях йонами важких металів (Pb^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} тощо). Катіоніти призначають як антацидні засоби при ацидозах, для лікування набряків, пов'язаних із декомпенсацією серцевої діяльності, та запобігання їм. За допомогою йонооб-мінників виготовляють дитяче харчування - йонітне молоко.

7. Фізико-хімічні основи адсорбційної терапії

Значну кількість захворювань людей спричинюють чужорідні для організму сполуки *екзогенного* (промислові забруднення, пестициди, препарати побутової хімії, лікарські засоби тощо) та *ендогенного* (утворюються і накопичуються в організмі, наприклад, при опіках, променевій хворобі) *походження*. Новий напрям медицини, який, на відміну від традиційної, ґрунтується не на введенні ліків в організм, а на виведенні з нього шкідливих і токсичних речовин, називають *адсорбційною*, або *еферентною*¹,

медициною. Головним завданням методів еферентної медицини є моделювання природних методів детоксикації.

Залежно від конкретної мети сорбційна детоксикація може здійснюватись методом *гемосорбції*, *плазмосорбції*, *лімфосорбції*, *лікворосорбції*, *ентеросорб-ції*, *аплікаційної сорбції*.

Принцип *гемосорбції* полягає у пропусканні крові через колонку з адсорбентом, яка підключена до системи циркуляції крові. У медичній практиці цей метод часто називають *гемоперфузією* і застосовують при нирковій та печінковій недостатності, екзогенних та індогенних отруєннях снодійними препаратами, нейролептиками, фосфорорганічними сполуками та ін., аутоімунних та алергійних захворюваннях тощо. Для широкого застосування гемосорбції потрібно вирішити проблему створення відповідних *гемосорбентів* з високою гемосумісністю і селективністю, які не змінюють реологічних характеристик крові, є хімічно стійкими, виявляють високу адсорбційну здатність стосовно того чи іншого токсину.

Суть *плазмосорбції* - пропускання плазми крові, попередньо відокремленої від формених елементів через колонку із сорбентом. Цей метод застосовують при тяжких отруєннях у тих випадках, коли не можна використати гемосорбцію.

Лімфосорбцію (очищення організму пропусканням лімфи через колонку із сорбентом) найчастіше застосовують при екзогенних отруєннях алкалоїдами блідої поганки, хлоропохідними вуглеводнів та ін. Перевагою цього методу є

відносна нетравматичність (відсутність ушкодження формених елементів, порушень згортання крові та змін у серцево-судинній системі).

Ентеросорбцію здійснюють за допомогою перорального вживання сорбентів, так званих *ентеросорбентів*, які під час проходження через травний канал адсорбують шкідливі речовини, зменшуючи тим самим їх вміст у крові. Застосовують цей метод для виведення алкалоїдів, наркотичних речовин, барбітуратів тощо, лікування алергійних захворювань. Розроблено ентеросорбенти на основі рослинних волокон - *фітосорбенти*, які очищують організм від радіонуклідів, важких металів.

Для лікування інфікованих ран, опіків ефективною є *аплікаційна терапія* - один із методів детоксикації організму накладанням на

рану або зону опіку марлевої пов'язки із сорбційним матеріалом. Це сприяє звільненню ушкоджених тканин від продуктів розпаду білків, інтенсифікації процесів регенерації тканин, зменшенню інтоксикації цілого організму. Розроблено волокнисті вугільні сорбенти з іммобілізованими на поверхні ферментами, які сприяють швидшому загоєнню ран. Вони можуть бути також носіями лікарських засобів - антибіотиків, антисептиків та інших антибактеріальних препаратів.

Під час вибору того чи іншого сорбенту враховують його селективність і сорбційну ємність відносно конкретної речовини.

8. Хроматографія та її застосування в біології і медицині

Хроматографія - це фізико-хімічний метод розділення і аналізу сумішей газів, випарів, рідин або розчинених речовин за допомогою сорбційних процесів. Цей метод відкрив у 1903 р. М. Цвет, який уперше застосував його для розділення рослинних пігментів. Хроматографія ґрунтується на різному розподілі компонентів суміші між двома фазами - рухомою та нерухомою.

Речовини, що складають нерухома фаза, називають *сорбентами*. Вони можуть бути як у твердому, так і в рідкому стані, але зазвичай це тверді речовини. Як сорбенти використовують силіцій діоксид, силікагель, алюміній оксид тощо.

Рухома фаза - це потік рідини або газу, що фільтрується крізь шар сорбенту. Вона виконує функції *розчинника* і *носія* суміші речовин, які аналізують, і її називають *сорбатом*.

Хроматографія посідає одне з провідних місць серед великої кількості хімічних та фізико-хімічних методів розділення, аналізу, дослідження структури і властивостей індивідуальних хімічних сполук та їх складних сумішей і дуже широко представлена у Державній фармакопеї України.

Нині хроматографію широко використовують у наукових дослідженнях та у практиці лабораторій з контролю якості лікарських засобів, клінічних та хіміко-токсикологічних лабораторій.

Класифікація хроматографічних методів. Хроматографічні методи поділяють за різними ознаками, а отже, хроматографія буває таких типів: *газова, газорідинна та рідинна* (за природою середовища, в якому проводиться розділення); *молекулярна, гель-фільтраційна, йонообмінна, осадова, розподільна* (за механізмом розділення);

колонкова, паперова, тонкошарова, капілярна (за технікою виконання). Коротко розглянемо хроматографічні методи аналізу, найпоширеніші в біології та медицині.

Газова хроматографія. Для розділення, аналізу і дослідження речовин та їх сумішей, що не розкладаються у газуватому стані, найширшого застосування набула *газова хроматографія*.

У газовій хроматографії як рухому фазу (*газ-носій*) найчастіше використовують інертні гази (гелій, аргон, азот). Нерухомою фазою може бути нелетка рідина (гліцерол, поліетиленгліколь), яку наносять на твердий носій (скло, тефлон), що ним заповнюють колонку.

Під час проходження досліджуваної суміші через хроматографічну колонку її компоненти селективно утримуються нерухомою фазою, а потім виходять із колонки і реєструються детектором, сигнали якого автоматично записуються у вигляді хроматограми. Кожному компоненту суміші на хроматограмі відповідає окремий пік. Положення піка визначається величиною *часу утримування* (x_d), тобто часом від початку введення проби до виходу максимального піка.

Ідентифікацію компонентів суміші проводять зіставленням часу утримування відповідного компонента і еталону - речовини аналогічної структури. Збіг часу утримування еталону і досліджуваної речовини свідчить про їх ідентичність.

Визначення кількісного складу суміші полягає в тому, що інтенсивність піка кожного компонента пропорційна його вмісту в суміші.

Метод газохроматографічного аналізу дуже чутливий. Для його проведення достатньо кілька кубічних сантиметрів газу, мікролітрів рідини чи мікрограмів леткої речовини.

Газову хроматографію широко застосовують у медицині для визначення вмісту багатьох лікарських препаратів, продуктів їх метаболізму, рівня жирних кислот, холестерину, стероїдів в організмі хворого тощо, у токсикологічній хімії, судовій медицині, криміналістиці та гігієні.

Рідинна хроматографія. У методі рідинної хроматографії рухомою фазою є *рідина*, нерухомою - твердий адсорбент. На відміну від

газової, рідинна хроматографія може бути використана для аналізу речовин з молекулярною масою від кількох сотень до кількох мільйонів а. о. м., у тім числі складних макромолекул, нуклеїнових кислот, білків тощо.

Як розчинник застосовують легкі вуглеводні та їх похідні: гексан, бензен, толуен, метанол, етанол тощо. їх вибір визначається типом сорбенту, яким може бути силікагель, алюміній оксид, магній оксид, сахароза, полімери.

Залежно від характеру взаємодій, що відбуваються в шарі сорбенту, рідинну хроматографію поділяють на дві групи: *молекулярну* та *хемосорбційну*.

До першої групи відносять *гель-фільтраційну* (молекулярно-ситову), до другої групи - *афінну* {біоспецифічну} *хроматографію*.

Гель-фільтраційна хроматографія ґрунтується на принципі розділення суміші речовин за розмірами їхніх молекул. Процес відбувається завдяки тому, що в цеоліт (молекулярне сито) або пори гелю дифундують тільки ті речовини, розміри молекул яких не перевищують розміри пор адсорбенту. Унаслідок цього молекули меншого розміру долають більший шлях і виходять з колонки пізніше, ніж більші молекули.

Останнім часом молекулярно-ситову хроматографію широко використовують для визначення молекулярної маси білків, виділення та очищення біополі-мерів (білків, пептидів, полісахаридів, нуклеїнових кислот) і навіть для розділення клітин, наприклад, лімфоцитів, еритроцитів тощо.

Паперова хроматографія (ПХ). У фармації й медицині широко застосовують *паперову* і *тонкошарову* *хроматографії*, які відрізняються від інших хроматографічних методів простотою та зручністю виконання експерименту.

У ПХ як нерухому фазу використовують хроматографічний папір, або речовини, попередньо нанесені на його волокна.

Для отримання хроматограми розчини чистих речовин (свідків) і суміш, яку потрібно розділити, наносять на хроматографічний папір, нижній кінець якого занурюють у відповідну систему розчинників. Через деякий час суміш розділяється на зони окремих компонентів. Для виявлення зон хроматограму розглядають у світлі УФ-

випромінювання за певної довжини хвилі й олівцем позначають контури плям.

Кількісне визначення полягає в тому, що пляму вирізають і після подрібнення паперу екстрагують досліджувану речовину відповідним розчинником. Вміст речовини визначають будь-яким методом, придатним для визначення малих кількостей (спектрофотометрія, полярографія тощо).

Тонкошарова хроматографія (ТШХ). У цьому методі роль носія виконує тонкий шар порошкоподібного сорбенту, нанесений на скляну або металеву пластинку. Як сорбенти застосовують силікагель, алюміній оксид, магній силікат тощо.

Аналіз цим методом загалом мало чим відрізняється від паперової хроматографії. Разом з тим метод ТШХ має низку переваг: високу швидкість процесу хроматографування, можливість використання як нерухомої фази більшого асортименту сорбентів.

ПХ і ТШХ посідають одне з провідних місць серед методів розділення та аналізу органічних і біоорганічних сполук. За допомогою цих методів можна визначити речовини масою 10-20 мкг, розділення триває кілька хвилин, тому їх часто застосовують як експрес-методи.