

Лекція 6

Тема. Взаємодія радіоактивного випромінювання з речовиною. Радіаційно-хімічні ефекти в речовині.

Мета. Ознайомити студентів з основними радіаційно-хімічними ефектами, що відбуваються під час взаємодії радіоактивного випромінювання з речовиною, та механізмами радіолізу в неорганічних та органічних сполуках.

Вступ.

Багато органічних речовин знаходять широке застосування в якості екстрагентів і розріджувачів у технології переробки ядерного палива і як перспективні теплоносії для ядерних реакторів. Тому знання закономірностей радіолізу цих систем є досить важливим для пророкування їхньої поведінки в різних технологічних умовах.

План.

- 1. Взаємодія заряджених частинок та електромагнітного випромінювання з речовиною, механізм збурення та іонізації молекул речовини.**
- 2. Радіаційно-хімічні процеси в речовині. Механізм виникнення активних частинок. Радіаційно-хімічний вихід. Радіоліз.**
- 3. Радіоліз розведених водних розчинів неорганічних та органічних сполук.**
- 4. Особливості радіаційних перетворень у твердих речовинах.**

Зміст лекції

1. Взаємодія заряджених частинок та електромагнітного випромінювання з речовиною, механізм збурення та іонізації молекул речовини.

α -Частинки, які утворюються під час радіоактивного розпаду, вступають у взаємодію із речовиною середовища. Ця взаємодія закінчується або розсіюванням енергії α -частинок з їх перетворенням в атоми Гелію, або захопленням α -частинок ядрами речовини середовища, в результаті чого проходить ядерна реакція. Ядерні реакції з неприскореними α -частинками дуже рідкісні, і тому розсіювання енергії α -частинок відбувається за рахунок їх пружної та непружної взаємодії як з електронами атомів, так і з їх ядрами. Випадки розсіювання α -частинок на ядрах небагаточисельні, і тому розсіювання здійснюється, головним чином, за рахунок взаємодії α -частинок з атомними електронами, що призводить або до збудження атомів і молекул речовини середовища, або до їх іонізації. Збудження молекул найчастіше спостерігається для конденсованих речовин. Для багатьох речовин збудження призводить до люмінесценції. α -Частинки спричиняють іонізацію, зазвичай, у разі проходження їх потоку через газ, причому в результаті одного акту іонізації утворюється пара йонів (позитивний йон та електрон). Електрони, які утворюються в результаті іонізації, можуть за рахунок великої кінетичної енергії викликати вторинну іонізацію.

Шлях α -частинок є завжди прямолінійним, тому що ці елементарні частинки мають більшу масу та енергію в порівнянні з електронами, з якими

вони взаємодіють. Довжина пробігу в повітрі становить – 5-20 см. Потік α -частинок повністю поглинається аркушем паперу або тонким шаром алюмінію.

У залежності від природи розсіюючого середовища йонізація α -частинками може призводити до хімічних змін. α -Випромінювання розкладає воду з утворенням кисню, водню та гідроген пероксиду. Забарвлення скла, порцеляни та мінералів під дією α -частинок також пов'язане з хімічними перетвореннями. α -Частинки мають сильний хімічний вплив на органічні речовини та біологічну тканину. Результатом розсіювання енергії α -частинок може бути електромагнітне випромінювання та виділення тепла. Наприклад, у 1 г радію, який знаходиться в рівновазі з найближчими продуктами розпаду, виділяє близько 144,928 Дж/с.

β -Частинки, які утворюються в результаті розпаду ядер, взаємодіють з речовиною середовища, що призводить до розсіювання енергії та їх гальмування, до збудження та йонізації атомів і молекул середовища. Розсіювання енергії β -частинок проходить за рахунок пружної та непружної взаємодії з електронами атомів. Захоплення β -частинок ядрами спостерігається надзвичайно рідко.

У результаті збудження під дією β -частинок ряд речовин, наприклад кальцій вольфрамат, синтетичний сапфір, нафталін, антрацен та ін., світяться.

Йонізація β -частинками полягає у вибиванні електрона з атома чи молекули. Внаслідок йонізації утворюються позитивні йони та електрони (в деяких випадках вторинний електрон може приєднатись до нейтрального атома чи молекули з утворенням негативного йона).

Йонізуюча здатність β -частинок, внаслідок їх малої маси і заряду, порівняно з α -частинками в декілька разів менша за рівних значень їх енергії. Тому β -промені меншою мірою втрачають енергію і володіють більшою проникною здатністю, ніж α -частинки.

Іншою особливістю β -частинок є те, що їх траєкторії руху не є прямолінійними, а викривлені через сильну взаємодію з електронами зовнішніх оболонок інших атомів, а фактичний пробіг в 1,5–4 рази більший за товщину пройденого шару речовини. Це призводить навіть до відбивання β -частинок від речовини. Ступінь відбивання посилюється із збільшенням порядкового номеру елементів.

β -Випромінювання відрізняється від α -випромінювання ще й тим, що величина пробігу частинок має змінну величину внаслідок неперервності енергетичного спектру (пробіг залежить від початкової енергії часток). Пробіг має сталі значення тільки для часток з максимальною енергією. Оскільки гальмування визначається числом взаємодій β -частинок з електронами, то пробіг залежить і від електронної густини речовини.

Завдяки здатності до йонізації β -випромінювання може у визначених середовищах викликати хімічну дію. Хімічна дія β -випромінювання аналогічна до хімічної дії α -випромінювання, але виражена слабше і розповсюджується глибше в речовину. У водних розчинах висока інтенсивність β -випромінювання призводить до реакцій відновлення.

Позитронний розпад зустрічається рідше β -розпаду (головним чином, у штучних радіоактивних ізотопів); позитрони мають дуже короткий період

життя. У разі зустрічі позитрона з електроном може пройти їх перетворення в іншу форму матерії – кванти електромагнітного поля. У цьому випадку повна енергія електрона і позитрона (включаючи енергію, яка відповідає масі спокою) або цілком переходить в енергію виникаючих квантів електромагнітного випромінювання, або частково передається якому-небудь третьому тілу, найчастіше атомному ядру. Такий процес перетворення позитрона та електрона носить не дуже вдалу назву процесу анігіляції (від лат. annihlatio, букв. – «зникнення», «перетворення в ніщо»). Анігіляція вільного позитрона з вільним електроном можлива тільки з випромінюванням двох (або більше, що менш імовірно) фотонів – квантів електромагнітного випромінювання.

Ядра (${}_{Z+1}^A X$ і ${}_{Z-1}^A X$), що утворюються в результаті β -розпаду, відчують віддачу, але меншу, ніж у результаті α -розпаду. Однак цієї енергії достатньо, щоб розірвати хімічний зв'язок. У кінцевому випадку енергія, розсіяна β -частинками, перетворюється або в електромагнітне випромінювання, або в тепло, але тепловий ефект β -випромінювання меншим, ніж для α -випромінювання.

γ -Випромінювання супроводжує α - і β -розпад, завдяки утворенню збуджених ядер. γ -Кванти можуть вступати у взаємодію з електронами даного атома, відриваючи їх від нього. Цей ефект називається внутрішньою конверсією γ -променів і розглядається як внутрішній фотоефект.

γ -Промені можуть взаємодіяти з ядрами атомів шляхом ядерних реакцій, можуть когерентно розсіюватись на кристалах з підпорядкуванням рівнянню Брегга. Крім цих взаємодій, розрізняють ще три типи: фотоелектричний ефект, ефект Комптона і утворення пар (електрон + позитрон). Поглинання γ -променів за рахунок взаємодії за трьома останніми типами підпорядковується експоненціальному закону, який виражається рівнянням:

$$I = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} r}, \quad (6.1)$$

де μ – лінійний коефіцієнт поглинання чи послаблення, який показує частку γ -випромінювання, що поглинається шаром речовини товщиною 1 см, см^{-1} ;

ρ – густина речовини-поглиначка, $\text{г}/\text{см}^3$;

r – товщина шару, $\text{г}/\text{см}^2$.

Фізичне явище резонансного поглинання гамма-випромінювання атомів у твердому тілі називається **ефектом Мессбауера**, який названо на честь Рудольфа Мессбауера, що у 1957 р. розробив метод спостереження резонансного поглинання.

Ядро ізольованого атома не поглинає гамма-кванти тієї ж енергії, що й випромінює. Причина цього в тому, що у випадку великої енергії фотона не можна нехтувати втратою енергії на віддачу ядра. Випромінюючи гамма-квант, ядро згідно із законом збереження імпульсу повинно рухатися в протилежному напрямку, поглинаючи гамма-квант, воно вбирає в себе його імпульс і рухається в тому ж напрямку (рис. 6.1). У оптичному діапазоні енергія віддачі маленька, і атоми зазвичай поглинають з тією самою частотою, що й випромінюють.

Втрата енергії на віддачу дорівнює

$$E_R = \frac{E_\gamma^2}{2mc^2}, \quad (6.2)$$

де E_R – втрата енергії;
 E_γ – енергія γ -кванта;
 m – маса ядра;
 c – швидкість світла у вакуумі.

Видно, що втрати обернено пропорційні до маси ядра.

Ідея експерименту Мессбауера в тому, щоб використати тверде тіло замість ізольованого атома. У твердому тілі, наприклад, кристалі, завдяки квантовим явищам, рух атомів набуває колективного характеру. Енергія віддачі передається не окремим атомам, а коливанням усього кристалу – фононам. Як наслідок, маса, яка отримує віддачу, значно зростає, зменшуючи втрати енергії. Таким чином стає можливим поглинання ядром γ -кванту, який утворився в результаті випромінювання ідентичного ядра, без віддачі.

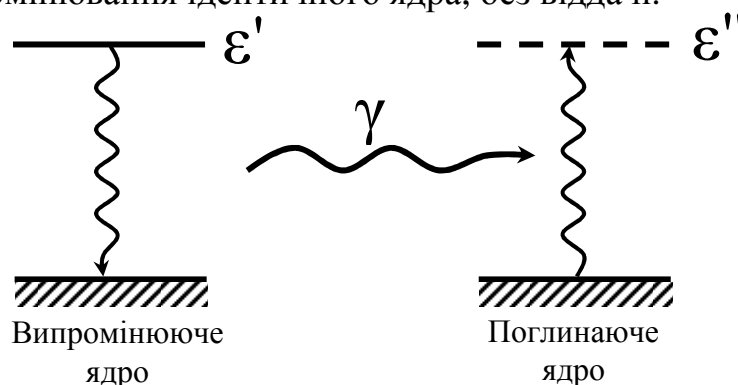


Рис. 6.1. Фізична природа явища резонансного випромінювання та поглинання γ -квантів атомів у твердому тілі.

Мессбауерівська спектроскопія є одним із методів матеріалознавства, тонким інструментом, який дозволяє визначити хімічні характеристики оточення радіоактивних атомів. Найчастіше вона використовує ядра ^{57}Fe .

2. Радіаційно-хімічні процеси в речовині. Механізм виникнення активних частинок. Радіаційно-хімічний вихід. Радіоліз.

Вивчення хімічних перетворень в системах під дією на них йонізуючого випромінювання є предметом радіаційної хімії.

Радіоліз – це хімічні перетворення під дією йонізуючого випромінювання. **Авторадіоліз** – це радіоліз радіоактивних речовин під дією власного випромінювання. Явищем авторадіолізу не слід нехтувати, оскільки зберігання радіоактивних речовин призводить до їх забруднення продуктами авторадіолізу, а у водних розчинах, завдяки реакціям розчиненої радіоактивної речовини з продуктами радіолізу води, відбуваються зміни хімічного стану радіоактивної речовини.

Імпульсний радіоліз – метод дослідження швидких хімічних реакцій та їх короткоживучих продуктів (час життя 10^{-1} - 10^{-12} с) під час дії на речовину коротким імпульсом йонізуючого випромінювання. Цей метод розроблений у 1960 р. незалежно трьома групами дослідників: Р. Мак-Карті і А. Мак-

Локланом (Великобританія), М. Матесоном и Л. Дорфманом (США), Дж. Кінном (Великобританія).

Найчастіше для досліджень використовують імпульси електронів високих енергій (від $\sim 0,5$ до 30-40 МеВ), рідше X-випромінювання; іноді застосовують імпульси важких заряджених частинок (наприклад, протонів). Тривалість імпульсів 10^{-13} - $2 \cdot 10^{-12}$ с. У якості джерел імпульсного випромінювання найбільш поширеними є лінійні електронні прискорювачі, дуже точні і високовольтні прискорювачі; застосовуються також рентгенівські трубки, електронні імпульсні трансформатори та ін. Для реєстрації короткоживучих частинок, що утворюються в результаті реакції, використовують оптичні (спектрографічний, спектрофотометричний, методи люмінесценції та світлорозсіювання) і електричні (кондуктометричний і полярографічний) методи. Найчастіше використовують спектрофотометричний метод. В залежності від тривалості імпульса і тимчасового дозволу розрізняють установки мікро-, нано- і пікосекундного діапазонів. У типовій установці міросекундного діапазону пучок зондуючого світла від неперервного джерела (звичайної ксенонової лампи) пропускають через комірку з речовиною; під дією імпульсу йонізуючого випромінювання в речовині з'являються короткоживучі частинки, внаслідок чого змінюється інтенсивність світлового потоку. Змінений світловий потік фокусується на щілину монохроматора, який виділяє потік визначеної довжини хвилі, перетворений фотоприймачем в електричний сигнал, що реєструється осцилографом. Таким чином отримують криву зміни оптичної густини в часі. Оптичний спектр поглинання будується шляхом зняття декількох кривих за різних довжин хвиль. Імпульсний радіоліз дозволяє здійснити йонізацію і збудження молекули чи атома, розірвати будь-який хімічний зв'язок, тим самим отримати практично усі короткоживучі частинки і вивчити швидкі реакції їх перетворень. До недоліків слід віднести важкість і високу ціну експериментальної техніки. Імпульсний радіоліз використовують для вивчення сольватованих електронів, вільних радикалів, йон-радикалів, карбаніонів, карбкатионів, йонів металів, збуджених молекул і атомів, для дослідження кінетики швидких реакцій, тунелювання електронів у конденсованій фазі, переносу протонів, передачі енергії збудження, хімічної поляризації електронів і т.п., а також для з'ясування механізму радіаційно-хімічних, радіаційно-фізичних і радіобіологічних процесів.

Основною характеристикою радіаційно-хімічних реакцій (радіолізу) є **радіаційно-хімічний вихід** (G), який дорівнює числу молекул, атомів, йонів, вільних радикалів і т. д., що утворюються (або витрачаються) під час поглинання системою енергії йонізуючого випромінювання 100 еВ. Радіаційно-хімічний вихід для ланцюгових реакцій може досягати сотні тисяч, а для неланцюгових тільки 10 – 15%. Продукт, який має даний вихід, зазвичай вказується в круглих дужках, наприклад: G (Ce³⁺) – продукт утворюється; і G (-ClO₄⁻) – розкладається. Розраховують G за формулою:

$$G = \frac{N}{D} \times 100 \quad (6.3)$$

де N – число молекул продукту в даному об'ємі середовища;

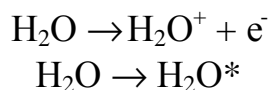
D – поглинута доза в даному об'ємі, еВ.

Радіоліз води. Радіаційна хімія води й водних розчинів, як наука, виникла у відповідь на потребу атомної промисловості знати, що відбувається під час дії випромінювання з теплоносіями ядерних реакторів і з водними розчинами – реагентами в технології виділення матеріалів, що діляться, з опроміненого ядерного палива.

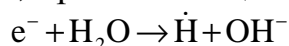
Особливості фізико-хімічних процесів енергії реакторного випромінювання, що відбуваються у результаті поглинання водою γ -квантів, β - і α -частинок, нейтронів, ще є предметом обговорення серед учених, що працюють у цій галузі.

У результаті дії випромінювання на воду утворюються хімічно-активні частки – збуджені молекули та йони, радикали та йони-радикали, взаємодією між якими та іншими розчиненими речовинами визначаються макрозміни, що відбуваються з водою під час опромінення – виділення радіолітичних газів (водню й кисню), утворення гідроген пероксиду, оксидативно-відновні процеси за участю розчинених речовин і т.д.

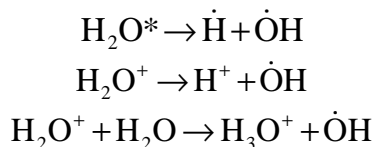
Йонізуюче випромінювання здійснює йонізацію молекул води та їхнє збудження:



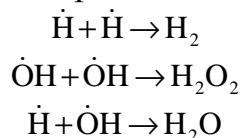
Вибиті електрони після сповільнення приєднуються до йонізованих випромінюванням молекул води з утворенням збудженої молекули (теорія Самуеля – Магі) або сольватуються й потім взаємодіють із водою з утворенням атомарного гідрогену (теорія Лі, Грея й Платцмана):



Вторинні реакції йонів і збуджених молекул води призводять до утворення радикалів $\dot{\text{H}}$ і $\dot{\text{OH}}$:

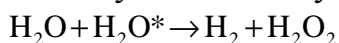


У місцях високої концентрації радикалів відбувається їхня рекомбінація:

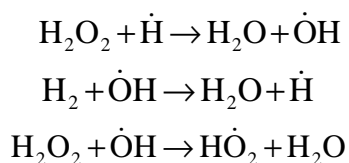


Ці реакції найбільш імовірні для тих видів випромінювань, які дають, більшу густину йонізації, наприклад для α -частинок. Вихід водню у результаті опромінення α -частинками максимальний.

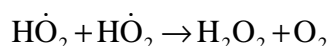
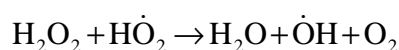
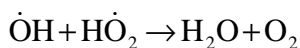
Можлива також реакція молекул води зі збудженими молекулами води:



Крім того, якщо концентрація продуктів радіолізу велика, відбувається їхня взаємодія між собою:



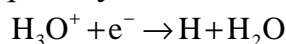
Радикал $\dot{\text{H}}\text{O}_2$ піддається ряду перетворень, результатом яких є виділення кисню:



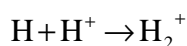
3. Радіоліз розведених водних розчинів неорганічних та органічних сполук

Радіоліз розведених водних розчинів неорганічних сполук зазвичай пояснюють взаємодією радикалів H і $\dot{\text{O}}\text{H}$ з розчиненими сполуками. Радіаційно-хімічний вихід у цих випадках залежить від концентрації розчину, його рН та наявності різних домішок.

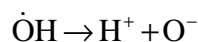
Сольватований електрон проявляє відновні властивості; у кислих розчинах він відновлює йон гідрогену:



Атом гідрогену, як правило, є відновником, його відновні властивості зростають зі збільшенням рН розчину. Але іноді атоми гідрогену проявляють оксидаційні властивості, утворюючи йон H_2^+ :



Радикали $\dot{\text{O}}\text{H}$ є зазвичай оксидантами, але в присутності сильних оксидантів, наприклад калій перманганату, можуть стати відновниками. За рН > 9 радикал $\dot{\text{O}}\text{H}$ реагує як оксидант із утворенням O^- за реакцією:



Радикал $\dot{\text{H}}\text{O}_2$ дисоціює на йони H^+ і O_2^- . У сильнокислому середовищі $\dot{\text{H}}\text{O}_2$ перебуває в недисоційованому стані, а в лужному середовищі переходить в O_2^- . Радикал $\dot{\text{H}}\text{O}_2$ – сильний оксидант, у той час як йон O_2^- – слабкий відновник. Таким чином, залежно від кислотності розчину й характеру розчиненої речовини радикал $\dot{\text{H}}\text{O}_2$ проявляє оксидаційні або відновні властивості.

Встановлення всієї сукупності радіаційно-хімічних перетворень у органічних рідинах, що призводять до нагромадження кінцевих продуктів, уявляє собою досить складне завдання через велику різноманітність реакцій за участю активних проміжних часток – йонів, електронів і збуджених молекул. У результаті радіолізу навіть найпростіших органічних сполук, таких як CH_4 , C_2H_6 та ін., уже за низьких ступенів конверсії утвориться більше десяти сполук. Загальна картина радіолізу може ускладнюватися тим, що деякі первинні стабільні продукти мають більш високу реакційну здатність відносно активних проміжних частинок, ніж вихідні молекули. Ці продукти будуть вступати в так звані «третинні» реакції.

Аналіз накопиченого до теперішнього часу великого експериментального матеріалу з радіолізу органічних речовин показує, що якісна й кількісна сполука продуктів радіаційно-хімічних реакцій залежить від типу випромінювання, природи й будови органічних сполук, їхнього агрегатного стану.

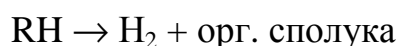
Під час радіолізу органічних сполук відбувається розрив зв'язків $\text{C} - \text{C}$, $\text{C} - \text{H}$ і зв'язків карбону з функціональними групами, у результаті чого з'являється

велика кількість різноманітних радикалів, за умови взаємодії яких поряд з воднем утворюються сполуки як з меншим, так і з більшим числом карбонових атомів, ніж у вихідній молекулі. Крім того, відбувається дегідрування з утворенням подвійного зв'язку або гідрування подвійного зв'язку ненасичених вуглеводнів.

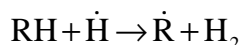
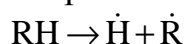
Найбільше радіаційно стійким класом органічних сполук є вуглеводні: за стійкістю вони розташовуються в наступний ряд: ароматичні > насичені > ненасичені.

Основним газовим продуктом радіолізу органічних сполук, і особливо алканів, є водень, при чому будова вуглеводню не грає істотної ролі.

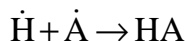
Існує два шляхи утворення водню – незалежний від присутності акцептора радикалів:



і пов'язаний з утворенням атомарного водню:



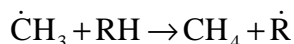
У присутності акцептора радикалів А йде реакція



і ймовірність утворення водню зменшується.

Вихід водню в присутності акцептора радикалів не падає до нуля. Це показує, що реакція йде за участю «гарячих» атомів гідрогену.

Другий обов'язковий продукт радіолізу – метан, вихід якого зменшується зі збільшенням довжини ланцюга вуглеводню, утворюється з кінцевих метильних груп:



Внаслідок цього в ізосполуках у порівнянні з нормальними зростає вихід метану й падає вихід водню.

Багато сполук, особливо ненасичені, під дією радіації полімеризуються. Тому виникла область використання радіоактивних випромінювань: радіаційний синтез.

Радіоліз полімерів складається, як правило, з таких процесів:

- зшивання молекулярних ланцюгів;
- деструкція макромолекул;
- оксидативні реакції (в присутності кисню);
- зміна концентрації та характеру подвійних зв'язків;
- газовиділення.

Високою радіаційною стійкістю володіють полістирен, полівінілкарбазол, аніліно-формальдегідна смола і полівінілхлорид, який широко використовується в атомній техніці; мінімальною радіаційною стійкістю володіють поліформальдегід, політетрафторетилен. Високу чутливість до дії радіації мають синтетичні йонообмінні смоли (іоніти). Як правило, катіоніти більш стійкі до дії радіації, ніж аніоніти. Основним наслідком радіолізу іонітів є зниження їх ємності.

У результаті дії випромінювань на полімери змінюються також фізичні властивості.

4. Особливості радіаційних перетворень у твердих речовинах.

Радіоліз металів, стопів і твердих неорганічних речовин доволі складний. Певною мірою процеси, що відбуваються в цих речовинах, можна звести до виникнення дефектів кристалічної ґратки, наслідком утворення яких будуть зміни хімічних та фізичних властивостей: реакційної здатності, питомої ваги, пружності, крихкості і т.д. Ці зміни особливо помітні на різних деталях ядерних реакторів, які довгий час працюють у потужному полі радіації. Отже, дослідження в цій галузі мають велике значення для реакторобудування.

Йонізуюче випромінювання діє на молекули твердих речовин подібно до його дії на рідкі й газові речовини, але у випадку твердих речовин вплив випромінювання носить «колективний» характер. Енергія, поглинена однією молекулою, швидко перерозподіляється – передається навколишнім молекулам, у результаті чого радіаційний вихід знижується. Підвищується можливість рекомбінації фрагментів розкладу молекули всередині зони їхнього утворення в результаті передачі енергії пружними зіткненнями навколишнім молекулам.

У неорганічних (йонних) кристалах, крім описаної дії йонізуючих випромінювань, мають місце процеси порушення кристалічної ґратки – утворення дефектів: аніонних і катіонних вакансій, вкорінених атомів, дислокацій різного роду, клинів зсуву.

На утворення дефектів витрачається невелика частка енергії первинно вибитого йонізуючим випромінюванням атома. Інша частина його енергії передається сусіднім атомам. У результаті цього відбувається швидкий розігрів локальної області кристала, що включає близько 6000 атомів, до температур порядку 4000К. Протягом 10^{-12} с ця локальна область уявляє собою середовище, більше схоже на рідину, ніж на тверде тіло. У результаті затвердіння зони розігріву утворюється зона механічних напруг, що призводить до утворення дислокацій.

Висновки.

Елементарні частинки, які утворюються під час радіоактивного розпаду, вступають у взаємодію із речовиною середовища. Ця взаємодія закінчується або розсіюванням енергії частинок з відповідним їх перетворенням, або захопленням їх ядрами речовини середовища, в результаті чого проходить ядерна реакція. У залежності від природи розсіюючого середовища йонізація елементарними частинками та електромагнітним випромінюванням може призводити до хімічних змін.

Вивчення хімічних перетворень в системах під дією на них йонізуючого випромінювання є предметом радіаційної хімії. **Радіоліз** – це хімічні перетворення під дією йонізуючого випромінювання. **Авторадіоліз** – це радіоліз радіоактивних речовин під дією власного випромінювання. Основною характеристикою радіаційно-хімічних реакцій (радіолізу) є **радіаційно-хімічний вихід (G)**, який дорівнює числу молекул, атомів, йонів, вільних радикалів і т. д., що утворюються (або витрачаються) під час поглинання системою енергії йонізуючого випромінювання 100 еВ.

Література.

1. Мідак Л.Я., Кравець І.В. Основи радіохімії. – Івано-Франківськ: пп Голіней, 2013. – 160 с.
2. Краткий курс радиохимии/ Под. ред. А.В. Николаева. - М., 1969.
3. Несмеянов В.Н. Радиохимия. - 2изд. - М., 1978.
4. Нефедов В.Д., Текстер Е.Н., Торолова М.А. Радиохимия. - М., 1987.
5. Несмеянов А.Н. Прошлое и настоящее радиохимии - Л., «Химия». - 1985.
6. Руководство к практическим занятиям по радиохимии/ Под ред. А.Н. Несмеянова. - М., 1980.
7. Хенли Э., Джонсон Э. Радиационная химия/ Пер. з англ. В.Н. Лисцова. – М.: Атомиздат, 1974.

Запитання для самоперевірки.

1. Які перетворення відбуваються в речовині під час взаємодії з α -, β -, та γ -частинками?
2. Назвіть приклади хімічних перетворень в речовині під дією елементарних частинок.
3. Що таке радіоліз? Поясніть його механізм на прикладі води.
4. Дайте означення основній кількісній характеристиці радіолізу.
5. Вкажіть особливості радіолізу у водних розчинах неорганічних сполук?
6. Які основні механізми радіолізу можна виділити для водних розчинів органічних сполук?
7. Як змінюються властивості органічних речовин внаслідок радіолізу?
8. У чому полягає особливість дії йонізуючого випромінювання на молекули твердих речовин?