

**ШКІЛЬНА БІБЛІОТЕКА  
УКРАЇНСЬКОЇ ТА СВІТОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

**Ольга ОЩИНСЬКА**

**ОСНОВИ  
АТОМНОЇ  
ЕНЕРГЕТИКИ**

Харків  
«ФОЛІО»  
2021

---

## Розділ 1

# Будова атомів, ядер та їхня стійкість. Ланцюгова реакція поділу ядер

Історія дослідження атома починається з учень давньогрецьких філософів, які заклали основи *атомістики*, тобто *загального вчення про будову речовини*. Гіпотеза про існування атомів як найменших неподільних частинок речовини була висунута понад 2500 років тому давньогрецькими ученими Левкіппом і Демокрітом. Вони висловили її, аналізуючи причини випаровування і конденсації води, зміни розмірів тіл у залежності від ступеня їх нагрівання, перемішування речовин тощо. Саме вони назвали **атомом** *дрібну неподільну частинку, що утворює речовину*. Тоді було вперше використане слово «**атом**» (від давньогрецького ἄτομος, що означає «неподільний»). А тих, хто вважав,



Демокріт

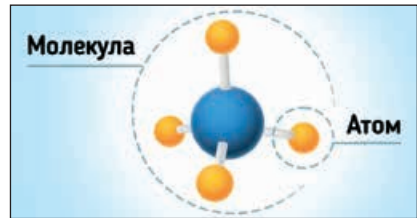


Левкіпп

що речовини утворюються внаслідок зіткнення атомів і появи зв'язку між ними, назвали «атомістами».

Пройшло багато століть з часів Демокріта, перш ніж вчені навчилися спостерігати явища, пов'язані з атомом. Завдяки багаторічній наполегливій праці видатних фізиків та хіміків різних країн світу було створено вчення про будову речовини, в основу якого покладено наукові поняття про атоми та **молекули**.

**Атом** — найменша хімічно неподільна, електрично нейтральна частинка матерії, що складається з позитивно зарядженого ядра й негативно заряджених електронів.



*Молекула та атом*

**Молекула** — здатна до самостійного існування, електрично нейтральна частинка речовини, що має притаманні їй основні хімічні властивості, які визначаються її складом та будовою. Молекула складається з атомів.

Ви вже знаєте, що світ, який оточує нас, складається з атомів різних **хімічних елементів**. На початку 20-х років минулого століття фізики вже не сумнівалися в тому, що **атомні ядра**, відкриті Е. Резерфордом у 1911 році, також як і самі атоми, мають складну структуру. У цьому їх переконували численні факти, накопичені до цього часу в результаті ряду експериментів: відкриття радіоактивності, дослідження розсіювання альфа-частинок, вимірювання відношення заряду електрона до його маси,  $\alpha$ -частки й для ядра атома водню, відкриття штучної радіоактивності і ядерних реакцій, вимірювання зарядів атомних ядер тощо.

Отже, самі ж атоми складаються з ядра і електронів, які обертаються навколо нього (*дивіться цікавий анімаційний ролик від «Цікава наука»: <https://youtu.be/J6sSMytU27E>*).

Тобто атом дещо схожий на Сонячну систему в мініатюрі: навколо крихітного ядра рухаються електрони, як навколо Сонця — планети. Твердо встановлено, що атомні ядра різних елементів складаються із часток двох видів — **протонів** і **нейтронів**.

**Протонами** називають частинки, що мають позитивний електричний заряд (+).

**Нейтронами** називають частинки, які є електрично нейтральними.

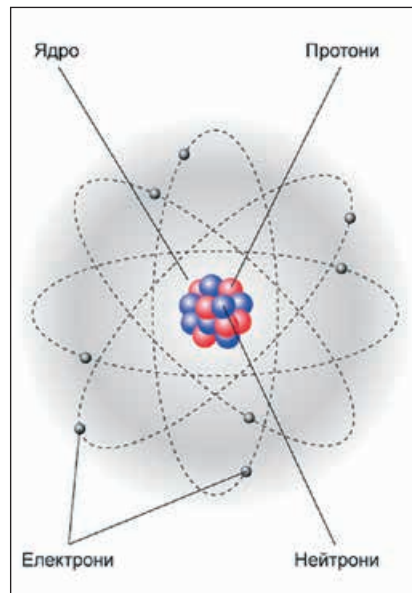
З протонів та нейтронів складається ядро атома, а тому вони отримали загальну назву **нуклони** (ядерні частинки).

**Електрони**, що обертаються навколо ядра, мають від'ємний заряд (-). Їх число дорівнює числу протонів, і тому в цілому **атом є електрично нейтральним**.

Атоми, які мають ядра з однаковим числом протонів, але відрізняються за числом нейтронів, належать до різновиду одного й того ж хімічного елемента і називаються **ізотопами** цього елемента.

Кожний хімічний елемент має свою кількість протонів та електронів, яка і робить його саме цим хімічним елементом. Ядра атомів, кількість нуклонів в яких більша ніж в ядрах заліза, здатні за певних умов до поділу. Їхнє ділення супроводжується виділенням великої кількості енергії, більша частина якої перетворюється на тепло.

Однак лише деякі хімічні елементи, наприклад, **уран**, можуть ділитися інтенсивно



Будова атома

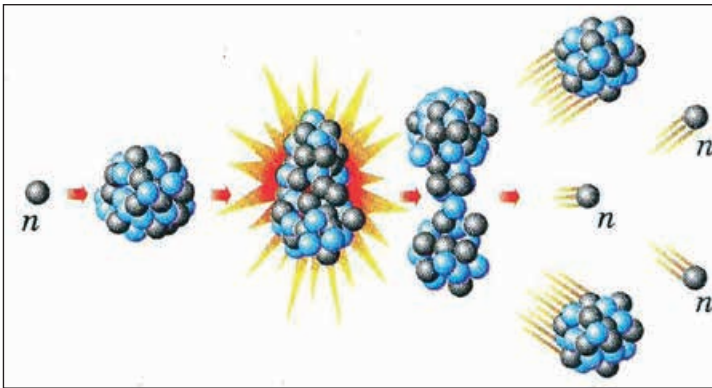
і виділяти велику кількість тепла. Саме тому такі хімічні елементи як уран використовуються як **ядерне паливо**.

### Уран. Ланцюгова реакція

**Атоми урану** мають два основних різновиди (ізотопи): **уран-238**, в ядрі якого 146 нейтронів, і **уран-235**, в ядрі якого 143 нейтрони.

Саме **уран-235** має унікальну властивість ділитися інтенсивно. Його ядра можуть ділитися на дві частини і при цьому випускати два або три нейтрони, які розлітаються в різні боки. Коли ж ці нейтрони зіштовхуються з іншими ядрами урану-235, то ті ядра під дією нейтронів також діляться і так само випускають два-три нейтрони. Новоутворені нейтрони знов зіштовхуються з іншими ядрами урану-235, і знов здійснюється черговий поділ ядер. Такий процес може йти досить довго і називається він **ланцюговою реакцією поділу ядер**. Якщо в якійсь установці розміщена велика кількість урану-235, то за короткий інтервал часу в ній відбуваються мільярди ядерних поділів з виділенням величезної кількості енергії.

Саме така енергія ланцюгової реакції поділу ядер урану використовується для нагрівання води і отримання пари



Ланцюгова ядерна реакція поділу

на атомних електростанціях — замість спалювання вугілля, природного газу або іншого органічного палива. І тому такі електростанції називаються атомними (АЕС).

Зверніть увагу: ядерна реакція відбувається в самому «серці» атомної електростанції — **ядерному реакторі**. Але безпосередньо електрику виробляє зовсім не він (у наступних розділах книги ви дізнаєтесь як саме це відбувається).

Отже, **атомна енергія** — це енергія, що виділяється під час перетворень атомних ядер. Ці перетворення можуть відбуватися спонтанно (цим зумовлюється природна радіоактивність) або керовано.

Фізичною основою ядерної (атомної) енергетики є реакція поділу важких ядер (наприклад, урану). Адже під час поділу ядра виділяється велика кількість тепла, тобто відбувається екзотермічна реакція.

Ланцюгова ядерна реакція, у тому числі в реакторі, відбувається таким чином: ядро урану під впливом нейтрона ділиться на два осколкових ядра. При цьому вивільняються нові нейтрони, які викликають поділ інших ядер урану. Керування ланцюговою реакцією дає можливість використовувати її тепло. Так, застосовуючи різні системи відведення тепла, енергію ядерного поділу використовують в ядерних реакторах.

### ✓ **Я вже знаю і поясню:**

1. З яких частинок складається атом? Атомне ядро?
2. Чому уран використовується як ядерне паливо?
3. Які умови необхідні для протікання ланцюгової ядерної реакції?

### **Це цікаво:**

#### **Чому саме уран?**

Тому, що один з ізотопів урану — **уран-235** добре ділиться повільними нейтронами і це єдиний ядерний

матеріал з такими властивостями, який зустрічається в природі. Подібні властивості мають ще **уран-233** та **плутоній-239**, але ці елементи можуть бути отримані лише штучно, їх немає в природі. Уран доволі поширений у природі — у гірських породах, ґрунтах та воді. Він належить до розсіяних елементів, а тому є не так багато місць, де він сконцентрований. Вміст урану в земній корі складає 0,00026 %, а це набагато більше, ніж золота, срібла, вісмуту та ртуті, і майже стільки ж, скільки свинцю і цинку.

### **Де розташовані уранові родовища у світі, скільки урану на них добувається?**

Сумарні світові запаси урану оцінюються величинами від 5 до 11 млн тонн. Перші місця в списку найбільш багатих ураном держав займають Австралія, Казахстан і ПАР. За ними йдуть Намібія, Канада, Нігерія, Узбекистан і США. За кількістю загальних запасів урану у світі виділяються Австралія, Казахстан і Канада (із запасами більш як 400 тис. тонн урану у кожній країні). На їх частку припадає 53 % світових загальних запасів урану. До групи країн із запасами більше 100 тис. тонн урану входять: ПАР, Бразилія, Намібія, Росія, США, Узбекистан. Основні країни-виробники урану: Канада, Австралія, Нігерія, США, Намібія.

Україна за ресурсами і запасами урану входить до першої десятки серед усіх країн світу і посідає одне з перших місць у Європі, але існують серйозні проблеми з інвестиціями в урановидобувну галузь. Переважна частина запасів урану розвідана до високих категорій вивченості, що визначає їх високу підготовленість до промислового освоєння.

Отже, наша країна має всі можливості повністю забезпечити власні потреби в природному урані. Державним





балансом запасів корисних копалин України враховано 22 родовища з промислово оціненими запасами, з яких розробляються чотири (Мічурінське, Центральне, Ватутінське і Новоколястинівське). Запаси Мічурінського, Східної зони Центрального і Ватутінського родовищ уже майже вичерпані. Найбільш перспективними для розробки залишаються Новоколястинівське, Західна зона Центрального, Северинське, Докучаєвське, Партизанське, а також гідрогенні Апрельське і Сафонівське. Розвідані і попередньо оцінені ресурси урану Кіровоградського уранорудного району складають понад 100 тис. т, з яких близько половини оцінюються як рентабельні. Прогнозні ресурси Кіровоградського району складають близько 200 тис. т. Новоколястинівське родовище за запасами урану входить до десятки найбільших родовищ світу.

Повний цикл робіт з видобутку (підземним способом) та переробки уранових руд в Україні здійснює Державне підприємство «Східний гірничо-збагачувальний комбінат». ДП «СхідГЗК» входить у десятку найбільших виробників урану (2 % від світового видобутку) і є єдиним в Україні підприємством, яке забезпечує видобуток уранової руди і виробництво концентрату природного урану. Підприємство забезпечує до 40 % потреби в урані українських атомних станцій. «СхідГЗК» сьогодні — це виробничі майданчики в Дніпропетровській і Кіровоградській областях, три уранові шахти, три заводи, близько 20 допоміжних підрозділів. Усе це дає можливість забезпечити повний цикл робіт з видобутку і переробки уранової руди. Переробка уранових руд і отримання уранового концентрату ( $U_3O_8$ ) здійснюється на гідрометалургійному заводі м. Жовті Води.

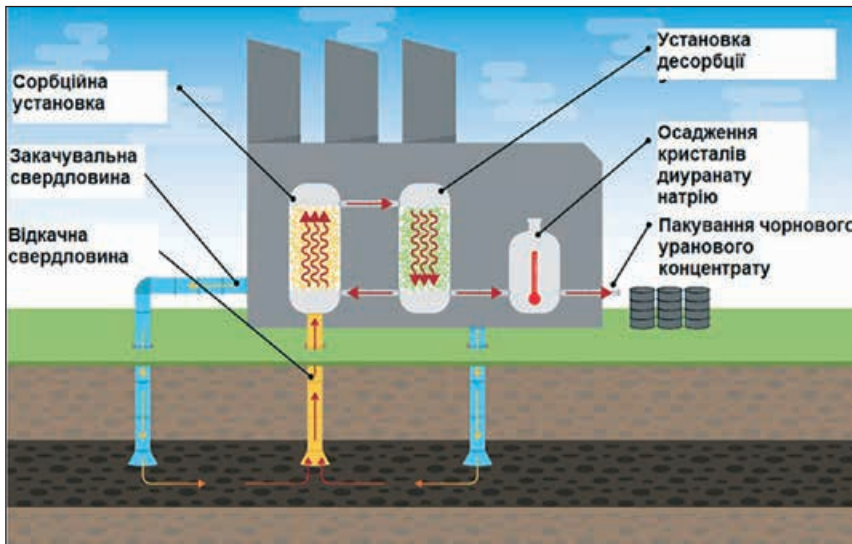
Наша країна має надійну сировинну базу у вигляді детально розвіданих 12 уранових родовищ із сумарними запасами, які можуть забезпечити потреби АЕС України

на період до 100 років. Найбільші з них, які можуть бути відпрацьовані тільки підземним способом, розташовані в Кіровоградському рудному районі. Ці родовища локалізовані в двох рудних вузлах — власне Кіровоградському та Новокосянтинівському.

### Як добувають уран?

Використовуються *три методи видобутку урану*. **Підземний** (шахтний) і **відкритий** (кар'єрний) методи видобутку урану є традиційними для гірничодобувної промисловості. Метод **свердловинного підземного вилуговування** використовується з 60-х років ХХ століття.

Вибір методу визначається, виходячи з конкретних особливостей родовища, яке розробляється. Відкритий метод може застосовуватися лише для невеликих глибин залягання руди (до 500 м). Шахтний метод може бути використаний при наявності виражених рудних жил у міцних гірських породах.



Підземне свердловинне вилуговування

Метод підземного вилуговування заснований на заповненні рудних порід розчинювальними хімічними реагентами та відкачці ураноутримуючих розчинів на поверхню. Він може бути використаний при мінералізації урану в пористих породах, розташованих між водонепроникними шарами. Переваги цього методу — відсутність наземних сховищ рудних відвалів і виділень радону при видобутку. Цей метод вважається найбільш екологічно чистим.

Слід зазначити, що при облаштуванні та експлуатації будь-якого уранового родовища розробляється і реалізується система заходів щодо забезпечення безпеки. Вона враховує геологічні та гідрологічні особливості об'єкта, розу вітрів, характеристики видобутої руди, сформовану інфраструктуру тощо. При дотриманні встановлених обмежень (зазвичай вони належать до сфери землекористування та водокористування) видобуток урану є безпечним для населення, що проживає поряд.

### **Збагачення урану**

Практичне здійснення ядерної ланцюгової реакції вимагає подолання певних труднощів. Адже природний уран є сумішшю двох ізотопів — урану-235 (0,7 %) та урану-238 (99,3 %). Ці ізотопи по-різному поведуть себе під дією нейтронів. Нейтрони, що звільнилися при поділі ядер урану-235, здатні викликати поділ лише ядер цього самого ізотопу, частка якого в природному урані дуже мала та виявляється недостатньою для початку ланцюгової реакції. Ця проблема долається завдяки **збагаченню** природного **урану** ізотопом урану-235 (до 5 % вмісту).

Отже, для того, щоб уран можна було використати як ядерне паливо, його необхідно збагатити по урану-235, тобто збільшити вміст урану-235. Точна величина збагачення залежить від типу реактора, в якому паливо буде

використовуватись. Наприклад, для водо-водяних енергетичних реакторів (ВВЕР), які використовуються на українських АЕС, необхідне збагачення по урану-235 до 1,6—5 %.

## Сповільнення нейтронів

Інша проблема — необхідність сповільнення нейтронів. Адже нейтрони, що утворюються в результаті поділу ядра урану-235, є занадто швидкими для їх ефективного захоплення (поглинання) іншим ядром урану-235 і, відповідно, для подальшого його поділу. Тому такі нейтрони й називають «швидкими». Процес поділу ядер урану відбувається набагато краще, коли утворені нейтрони мають меншу швидкість — теплову, через що їх називають «теповими».

Щоб сповільнити нейтрони до «теплової» швидкості, використовують спеціальні речовини. Найкращим **сповільнювачем** нейтронів є «**важка вода**» ( $D_2O$ ), молекули якої складаються з дейтерію (ізотопу водню з 1 додатковим нейтроном) та кисню. **Графіт** також є хорошим уповільнювачем нейтронів — ядра вуглецю, з якого складається графіт, слабо поглинають нейтрони теплових енергій. Добре уповільнює нейтрони й звичайна, «**легка вода**». Отже, при взаємодії з ядрами **дейтерію**, вуглецю або водню нейтрони сповільнюються до потрібних — «тепових» — швидкостей.

---

## Зміст

Вступне слово т. в. о. президента ДП «НАЕК «Енергоатом» .....	3
Звернення .....	7
Передмова .....	9
Як працювати з посібником.....	12
Розділ 1. Будова атомів, ядер та їхня стійкість. Ланцюгова реакція поділу ядер .....	13
Розділ 2. Ядерний реактор. Ядерне паливо .....	24
Розділ 3. Атомні електростанції. Будова та принцип роботи сучасної АЕС .....	35
Розділ 4. Безпека АЕС і системи її забезпечення. Культура безпеки .....	53
Розділ 5. Аварії на АЕС. Міжнародна шкала ядерних подій (INES) .....	69
Розділ 6. Радіоактивність. Природна та техногенна радіація. Вплив АЕС на довкілля .....	88
Розділ 7. Ядерний паливний цикл. Радіоактивні відходи. Відпрацьоване ядерне паливо .....	109

Розділ 8.

Атомна енергетика і проблеми зміни клімату.

Сучасний стан атомної енергетики у світі . . . . . 126

Епілог . . . . . 149

Глосарій . . . . . 152

Які вузи готують фахівців для атомної галузі

України . . . . . 186

Контактна інформація ДП «НАЕК «Енергоатом» . . . . . 188