



АТОМНА ЕНЕРГІЯ (АЕ) — це внутрішня енергія атомного ядра (АЯ), що, згідно з законом відносності Айнштейна, залежить від маси (M) і дорівнює $E = Mc^2$, де c — швидкість світла у вакуумі. Інша назва — ядерна енергія. Маса АЯ складає 99,95 % маси **атома**. Таким чином, основна енергія Всесвіту знаходиться в АЯ. Звичайно під АЕ розуміють енергію, яка вивільняється при ядер. розпадах або перетвореннях. АЯ складаються з елементар. частинок — позитивно заряджених *протонів* та нейтральних *нейтронів*, заг. назва яких — нуклони. Між нуклонами діють найбільші з відомих сьогодні сил — *ядерні сили* притягання (ЯС). Крім того, між протонами діють також кулонівські сили відштовхування. При утворенні АЯ вивільняється енергія зв'язку нуклонів. Внаслідок цього маса нуклонів в ядрі стає меншою, ніж маса вільних нуклонів, а це означає, що маса ядра (M) менша, ніж маса нуклонів, що його утворюють. Різниця мас нуклонів і ядра називається дефектом маси $\Delta M = \sum m_n - M$. Очевидно, що енергія зв'язку АЯ — $E_{\text{зв.}} = \Delta M c^2$. Завдяки величезним ЯС енергія, що вивільняється (або поглинається) в ядерних процесах, значно перевищує енергію хім. процесів. Саме тому ядерні процеси стали джерелом енергії для людства. ЯС — це сили короткодійчі (радіус їх дії дорівнює приблизно 10^{-13} см). Крім того, їм притаманна властивість насичуватись. Таким чином, нуклони взаємодіють лише з тими нуклонами, які їх безпосередньо оточують. Внаслідок цих властивостей ЯС енергія зв'язку АЯ виявляється пропорційною кількості нуклонів у ядрі, тобто масовому числу A , а середня енергія зв'язку нуклонів приблизно постійна. Виняток складають найлегші і найважчі АЯ. Це пояснюється тим, що у найлегших ядрах ЯС ще не насичені, а у важких ядрах енергія зв'язку зменшується за рахунок кулонівського відштовхування, енергія якого пропорційна Z^2 , де Z — заряд ядра. Саме завдяки кулонівському відштовхуванню, починаючи від ^{209}Bi , ядра перестають бути стабільними. Внаслідок зменшення енергії зв'язку у легких та найважчих ядрах в процесах синтезу та поділу утворюються міцніше зв'язані ядра. Це означає, що в обох процесах вивільняється енергія. Але у звичай. умовах цим процесам перешкоджають кулонівські сили, які утворюють кулонівський бар'єр, для подолання якого АЯ необхідно надати додаткову енергію. Існує декілька видів нестабільності АЯ. Для стабільності АЯ необхідно мати певне співвідношення у них між кількістю нейтронів і протонів. При відхиленні від оптимального співвідношення АЯ стає β -радіоактивним і випромінює електрони або позитрони і *нейтрино*. АЯ, що утворюються після β -розпаду, можуть перебувати у т.

зв. збудженому стані, тобто мати деякий надлишок енергії. При переході в осн. стан вони будуть випромінювати γ -кванти. У важких ядрах крім β -розпаду, можуть виникнути розпади, пов'язані з деструктивним впливом кулонівських сил. При цьому будуть випромінюватись α -частинки та важчі фрагменти або виникне поділ ядра. Радіоактивні ядра використовуються для створення малопотуж. джерел струму, принцип дії яких дуже простий: якщо взяти дві паралел. пластини і на одну з них помістити радіоактивні АЯ, то при радіоактив. розпаді заряд пластини, на якій знаходяться радіоактивні ядра, буде зменшуватись (якщо випромінена частина не буде рухатись у бік цієї пластини), а на другій пластині почне нагромаджуватись заряд іншого знака. Між пластинами виникне різниця потенціалів, тобто утвориться батарея. Така батарея буде діяти, доки ядра розпадатимуться. Час, за який розпадається половина ядер (період напіврозпаду), може складати тисячі років. Протягом цього часу ядерна батарея не потребує підзарядки. Потужність батареї залежить від кількості радіоактив. ядер і їхнього періоду напіврозпаду. Існують також інші можливості використання розпаду радіоактив. ядер. Основне використання АЕ пов'язане з поділом важких і синтезом легких ядер. Енергія, що вивільняється в обох цих процесах, складає приблизно 10^{11} Дж. на 1 г речовини. Для порівняння: при згоранні 1 г бензину виділяється лише $4,5 \times 10^4$ Дж. Спонтан. поділ важких ядер відбувається дуже повільно і для одержання енергії непридатний. Так, напр., напівперіод спонтан. поділу ^{235}U складає 3×10^{17} років. Стимулювати поділ ядер можна наданням ззовні додатк. енергії. Існує багато способів передачі АЯ додатк. енергії. Надзвичайно важливим виявився процес передачі енергії за рахунок опромінення нейтронами малих енергій (повільними). При захопленні нейтрона в АЯ вноситься енергія його зв'язку (щоб вилучити з ядра нейтрон, треба затратити енергію, рівну енергії його зв'язку). При захопленні нейтрона навіть нульової енергії ^{235}U ділиться миттєво. Дуже важливим є те, що при цьому випромінюється декілька нових нейтронів, що створює можливість перебігу ланцюгової реакції. Продукти поділу ядер рухаються з великою кінетич. енергією, що може бути використана для тих чи інших потреб. Якщо взяти чистий ^{235}U достатньої (т. зв. критичної) маси, щоб нейтрони, які з'являються внаслідок поділу, майже не виходили за межі урану, а в основному викликали поділ ін. ядер, то відбувається ланцюгова реакція, в якій кількість ядер, що діляться, невпинно зростає, а це призводить до потужного вибуху. В цьому випадку ланцюгова реакція є неконтрольованою, це і є атомна

бомба. В атом. бомбі початк. маса ^{235}U розділена на декілька частин, кожна з яких не є критичною. За рахунок потужного вибуху звичайної вибухівки окремі частини з'єднуються і утворюють критичну чи більшу масу, яка і створює атом. вибух. Контроль за перебігом ланцюг. реакції здійснюється в атомних реакторах (АР). Перший АР було побудовано під керівництвом італ. фізика Е. Фермі в Чикаго, його пуск відбувся 2 грудня 1942.

Існує багато типів АР, всі вони мають т. зв. активну зону, в якій розміщується ядерне «пальне», що входить в конструкцію тепловідільних елементів (ТВЕЛ), уповільнювач та система регулювання. Через активну зону прокачується теплоносій, який відводить з неї тепло і циркулює в замкненому контурі. Тепло радіо-актив. води першого контуру передається воді другого контуру, яка перетворюється на пару і приводить в дію турбіну, з'єдану з електрогенератором. За таким принципом працює [Атомна електростанція](#). Як пальне для АР використовують уран, збагачений ізотопом ^{235}U (природна суміш складається з ^{234}U (0,0055 %), ^{235}U (0,72 %) та ^{238}U (99,274 %), або штучно отримані ^{233}U та ^{239}Pu . Уповільнювач потрібний для того, аби зменшити швидкість нейтронів, які вилітають при поділі, оскільки повільні, або теплові, нейтрони з більшою вірогідністю захоплюються «пальним». Як уповільнювач використовують воду, важку воду D_2O та графіт. Воду і важку воду також застосовують як теплоносії. Система регулювання (що відповідає також за безпеку) призначена для підтримання оптимальної потужності АР. Конструктивно вона становить собою рухомі вертикальні стрижні, які вміщують бор або кадмій, що легко поглинають нейтрони. Якщо стрижні повністю ввести в активну зону, то АР зупиниться. Пуск АР здійснюють, поступово виводячи стрижні з активної зони. Під час поділу ^{235}U випромінюється в середньому 2,5 нейтрона. Один із них витрачається на підтримання потужності АР, деяка частина поглинається в елементах конструкції, деяка виходить за межі активної зони і поглинається в потужному захисті АР, а деяку захоплює ^{238}U , який складає осн. частину урану. Це є дуже важливим, оскільки при захопленні нейтрона ^{238}U перетворюється на ^{239}U , який після двох β -розпадів стає ^{239}Pu . ^{239}Pu є атомним «пальним», навіть кращим, ніж ^{235}U . Це означає, що відбувається відтворення атомного «пального» і природ. уран можна використовувати значно більше, ніж на 0,72 %. У звичай. реакторах частка нейтронів, які захоплює ^{238}U , досягає всього 0,3–0,6, тому перетворити в ^{239}Pu можна лише частину ^{238}U .

Видат. укр. фізик [О. Лейпунський](#) теоретично довів, що можна створити АР, у якому коефіцієнт відтворення буде перевищувати одиницю. Таким чином, «пального» ^{239}Pu буде нагромаджуватись більше, ніж буде «спалюватись» ^{235}U або ^{239}Pu . У таких АР поділ повинен відбуватися під дією швидких нейтронів, для яких

середня кількість вторин. нейтронів, що супроводжують поділ, може досягати величини 2,9, а для ^{239}Pu навіть більше. Для розрахунку таких реакторів необхідно було знати константи взаємодії швидких нейтронів з ядрами як «пального», так і конструкц. матеріалів. Для одержання цих констант О. Лейпунський в 1944 в Інституті фізики АН УРСР, дир. якого він був, створив і очолив відділ ядер. фізики, чим започаткував розвиток ядер. фізики в Києві. Пізніше О. Лейпунський переїхав у Фіз.-енергет. інститут у м. Обнінськ (Росія) і там очолив розробку серії реакторів на швидких нейтронах. АР на швидких нейтронах значно складніші, ніж на теплових. Щоб одержати високий коефіцієнт вторин. нейтронів, у них нейтрони не повинні уповільнюватись, і тому вода як теплоносій непридатна — у таких реакторах використовують рідкий натрій. Натрій хімічно дуже активний, тому застосовують триконтурну систему відводу тепла, і вода циркулює лише в третьому контурі. У таких АР активна зона компактніша, ніж у АР на теплових нейтронах, і тому більше енергонапружена. Це потребує використання складнішої системи регулювання.

Під керівництвом О. Лейпунського побудовано АЕС з АР БН-350 у м. Шевченко та БН-600 на Уралі. АЕС у м. Шевченко має електропотужність 350 тис. кВт, а також може опріснювати 120 тис. т води за добу і виробляти електроенергію при потуж. 150 тис. кВт.

Поряд з розвитком АЕ інтенсивні роботи ведуться і в галузі використання енергії синтезу. Найперспективнішою є реакція дейтерію з тритієм ($\text{D}+\text{T}$). Синтезу D і T перешкоджає їхнє кулонівське відштовхування. Для його подолання D чи T необхідно надати додаткову енергію. Найпростіше було б прискорити одну з частинок до необхідної енергії. Але виявляється, що затрати енергії на прискорення частинок помітно перевищують енергію, що вивільнюється в реакціях, хоча енергія на нуклон у цьому разі більш ніж утричі перевищує енергію на нуклон, що виділяється при поділі. Крім того, в цьому випадку не розвивається ланцюг. реакція, без якої енергет. виграш взагалі неможливий. Ланцюг. реакція синтезу принципово відрізняється від реакції поділу. В ній подальший синтез викликається нагрівом суміші, а не нейтронами, що з'являються. Підвищити початк. енергію частинок можна також шляхом їх нагрівання (в термоядер. бомбі це досягається за рахунок вибуху атом. бомби). При т-рах у сотні мільйонів градусів частинки стають спроможними подолати кулонівське відштовхування. Але нагрів частинок до високих т-р ще не забезпечує перебігу ланцюг. реакції синтезу. Для цього необхідні також ще достатні концентрація D - T суміші та час утримання високої температури. Згідно з критерієм Лоусона для одержання ланцюг. реакції необхідно, щоб концентрація суміші була бл. 10^{14} см^{-3} , час утримання понад 1 сек. і температура понад 100 млн градусів. При високих т-рах D - T суміш існує у ви-

гляді повністю іонізов. атомів і електронів — плазми. Нагрівання плазми відбувається в спец. складних установках за допомогою потуж. магніт. полів, які індукують у плазмі струм. Магнітні поля запобігають також охолодженню плазми за рахунок контактів зі стінками камери, яка найчастіше має вигляд пустотілого тора. Між плазмою і стінками камери створюється вакуумна термоізоляція. Існує декілька типів термоядер. установок (Токамак, стеларатор та ін.), але в жодній з них критерій Лоусона ще не досягнутий. Спеціалісти сподіваються на успіх у масштабніших установках, тому нині деякі країни розробляють спільний проект Токамака вартістю бл. 5 млрд дол. Термоядер. метод не є єдиним напрямком синтезу. В методі «Confinement Inertial Fusion» невелика таблетка з D-T-сумішшю з усіх боків стискається за допомогою лазер. випромінювання або пучків важких іонів, і цим долається кулонівське відштовхування. Розробляється ще метод μ -каталізу, в якому у D- або T-атома електрон замінюється μ -мезоном, і вони перетворюються в μ -атоми, у яких кулонівське відштовхування зменшується настільки, що синтез стає можливим при низькій т-рі. Запасів органіч. палива, яке нині є осн. джерелом енергії, вистачить на 100–150 р., запасів урану і торію — в кілька разів більше, а запаси D і T

практично безмежні. Важка вода складає 0,02 % від усієї води, а кількість ${}^7\text{Li}$, з якого одержують T, досягає $6,5 \times 10^{-3}$ % ваги земної кори.

Рекомендована література

1. Шпольський Е. В. Атомна фізика. Т. 2. К., 1953;
2. R. E. Lapp. Atoms and people. New York, 1956;
3. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. К., 1975;
4. Максимов М. В. Диагностика и управление технологическим процессом перегрузки ядерного топлива на энергетических реакторах. О., 1996;
5. Самойлов А. Г., Волков В. С., Солонин М. И. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов: Учеб. для студ. вузов, обучающихся по спец. «Физика металлов», «Ядерные реакторы и энергетические установки». Москва, 1996;
6. Широков С. В. Ядерные энергетические реакторы. К., 1997;
7. Його ж. Физика атомных реакторов. К., 1998;
8. Ядерне законодавство: Зб. нормат.-правових актів (станом на 10 черв. 1999 р.): У 2 т. К., 1999.

О. Ф. Німець

Бібліографічний опис:

Атомна енергія / О. Ф. Німець // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. — К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2001. — Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-44609>

2001-2025 © Ця енциклопедична стаття захищена авторським правом згідно з чинним законодавством України (докладніше).