



КАРНАУХОВ
Іван Михайлович —
академік НАН України,
заступник генерального
директора ННЦ «Харківський
фізико-технічний інститут»
НАН України

ПРО СПОРУДЖЕННЯ ЯДЕРНОЇ ПІДКРИТИЧНОЇ УСТАНОВКИ «ДЖЕРЕЛО НЕЙТРОНІВ»

За матеріалами наукової доповіді
на засіданні Президії НАН України
2 липня 2014 року

Розглянуто стан проекту спорудження ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів». Передбачається, що реалізація проекту та введення в експлуатацію зазначеної установки закладе основи для побудови в Україні безпечної, екологічно чистої ядерної енергетики майбутнього і сприятиме розвитку науково-технічного потенціалу держави.

Ключові слова: ядерна підкритична установка, джерело нейтронів, підкритична збірка.

Вступ

Відповідно до положень Меморандуму про взаєморозуміння між Урядом Сполучених Штатів Америки та Урядом України щодо співробітництва з питань ядерної безпеки, упродовж останніх років у ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України спільно з Аргонською національною лабораторією (США) послідовно виконуються роботи зі спорудження новітньої ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів, засноване на підкритичній збірці, що керується лінійним прискорювачем електронів» (далі — ЯПУ «Джерело нейтронів»). Успішне введення в експлуатацію цієї установки є запорукою створення в Україні сучасної експериментальної бази для проведення досліджень з нейтронами в галузі радіаційного матеріалознавства, радіаційної медицини, виробництва ізотопів, ядерної фізики та енергетики. Крім того, сама установка стане об'єктом досліджень як прообраз нових безпечних джерел енергії на основі підкритичних систем.

Переваги і недоліки ядерної енергетики

Сучасна Україна має розвинену ядерну електроенергетику, яка відіграє велику роль у енергетичному балансі держави. Понад половину всієї електроенергії в країні генерують на ядерних реакторах водо-водяного типу ВВЕР російського виробництва. Крім відносно низької собівартості продукції перевагами таких систем порівняно з іншими традиційними та нетрадиційними джерелами енергії є менший вплив на навколишнє середовище, стабільність енергопостачання, наявність значного запасу первинних ресурсів (природного урану та ін.).

Однак, поряд з високими економічними показниками, ядерна енергетика має ряд істотних недоліків, які спричиняють її глибоке неприйняття суспільством. До них насамперед належать:

- низький коефіцієнт використання уранового палива;
- напрацювання та невикористання трансуранових елементів;
- небезпека переходу ланцюгової реакції поділу ядер палива в неконтрольовану фазу і теоретична можливість ядерних аварій.

Точний сценарій розвитку майбутньої ядерної енергетики важко передбачити, однак можна спрогнозувати такі етапи:

- екологічні проблеми зумовляють перехід до замкнутого ядерного циклу з переробленням відпрацьованого ядерного палива. Виділені уран і трансуранові елементи використовуватимуть як ядерне паливо, а найнебезпечніші радіонукліди — продукти поділу ^{235}U — мають трансмутуватися;
- необхідність спалювання трансуранових елементів, трансмутації небезпечних радіонуклідів неминуче спричинить розроблення реакторів з важкорідкометалевим сповільнювачем (Pb, Bi). Це особливо важливо для країн з розвиненою ядерною енергетикою (Франція, Україна, Японія, Росія, США);
- дефіцит дешевого ^{235}U призведе до розроблення бридерних ядерних систем, заснованих на реакторах на швидких нейтронах;

- надмірне зростання цін на рідке паливо для двигунів внутрішнього згоряння вимагатиме якнайшвидшого створення високотемпературних реакторів з газовим охолодженням для напрацювання водню;

- обмеження тривалості використання ядерного палива, спричинене надмірним поглинанням нейтронів продуктами поділу, потребує розроблення рідкосольових реакторів, у яких можна безперервно видаляти небажані продукти поділу і вводити необхідні домішки для здійснення бридерного режиму.

Усі ці системи, так звані ядерні системи 4-го покоління, на відміну від реакторів типу ВВЕР, мають внутрішню природну безпеку і вирішують проблеми нерозповсюдження ядерної зброї, оскільки не потребують збагачення урану і виділення чистого (збройного) плутонію. Електроенергетичні установки, засновані на підкритичних збірках, що керуються прискорювачами заряджених частинок, дадуть змогу розв'язати екологічні проблеми ядерної енергетики.

Безпека підкритичних збірок

У підкритичних збірках, що керуються прискорювачами заряджених частинок, для генерації первинних нейтронів використовують фото-ядерні реакції, індуковані жорстким електромагнітним випромінюванням, що виникає при гальмуванні пучка частинок у мішені з важкого елемента (нейтроноутворюючій мішені).

Для збільшення потоку первинних нейтронів застосовують розмножувальне середовище з актиноїдів, ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів у якому $k_{\text{ef}} < 1$. Тому в установках такого типу виникнення самопідтримної ланцюгової реакції поділу ядер палива є неможливим. Максимальна величина нейтронного потоку залежить від параметрів пучка прискорених частинок (частоти посилок, їх тривалості й амплітуди), ефективності виходу нейтронів з нейтроноутворюючої мішені та характеристик підкритичної збірки. Величину нейтронного потоку регулюють струмом пучка частинок, тому нейтронне поле в активній зоні підкритичної збірки зникає після вимикання пучка.

Ядерні підкритичні установки, що вже працюють у світі

Пропозиції щодо використання підкритичних збірок у ядерній енергетиці висловлювалися ще в середині 50-х років минулого століття з метою підвищення безпеки ядерної енергетики. Проте впродовж тривалого часу застосування таких систем стримувалося через відсутність потужних прискорювачів заряджених частинок. Нині науковці багатьох країн світу активно розробляють технології, пов'язані з підкритичними збірками.

Так, у Республіці Білорусь уже діють дві уран-поліетиленові підкритичні збірки нульової потужності — «Ялина-Теплова» і «Ялина-Бустер».

У Франції протягом 2000—2005 рр. проводили експерименти з вивчення фізики підкритичних систем. Критичну збірку MASURCA на уран-плутонієвому паливі було розвантажено до рівня підкритичності 0,98. Як зовнішнє джерело нейтронів використовували імпульсний генератор нейтронів GENEPI.

Підкритичну збірку VENUS-1 побудовано в Китаї для вивчення фізики і кінетики систем, керованих прискорювачами. Конструкція установки досить подібна до конструкції збірки «Ялина-Теплова», а зовнішнім джерелом нейтронів також є генератор нейтронів.

Для експериментального підтвердження можливості реалізації технологій трансмутації

в підкритичних системах, керованих прискорювачами, у Бельгії реконструювали критичний реактор на теплових нейтронах VENUS у підкритичний реактор на швидких нейтронах VENUS-F. Завантаження уран-плутонієвого палива в активну зону відбулося наприкінці 2009 р. На першому етапі як джерело нейтронів використовували реконструйований генератор нейтронів GENEPI-3C, який перевезли з Гренобля (Франція), а надалі — прискорювач протонів з енергією 200 MeV. Так було створено першу підкритичну установку GUINEVERE для демонстрації можливостей технологій трансмутації та виробництва енергії. Аналогічні проекти здійснюють у США, Італії, Японії, Китаї, Росії, Індії. Країни Європейського Союзу розробляють проект такої установки, розрахованої на теплову потужність 50—100 МВт, яку планують запустити у Бельгії в 2024 р.

Порівняльний аналіз наявних у світі підкритичних систем (табл. 1) свідчить, що ЯПУ «Джерело нейтронів» буде першою у світі установкою, яка заснована на підкритичній збірці і має значну теплову потужність.

Основні етапи спорудження установки

Як замовник будівництва та експлуатуюча організація ННЦ ХФТІ пройшов усі етапи спорудження ЯПУ «Джерело нейтронів», починаючи від заяви про наміри спорудження і за-

Таблиця 1. Порівняння ЯПУ «Джерело нейтронів» з іншими установками

Установка	Режим роботи	Потужність, кВт	Спектр нейтронів
ЯПУ «Джерело нейтронів»	Підкритичний $k_{\text{ef}} \leq 0,98$	250	Теплові та холодні нейтрони
Підкритична збірка «Ялина-Теплова» (Білорусь)	Підкритичний $k_{\text{ef}} < 0,98$	0	Теплові нейтрони
Підкритична збірка «Ялина-Бустер» (Білорусь)	Підкритичний бустерна зона — $k_{\text{ef}} = 0,60$ теплова зона — $k_{\text{ef}} = 0,95$	0	Швидкі та теплові нейтрони
Підкритична збірка VENUS-1 (Китай)	Підкритичний $k_{\text{ef}} = 0,90—0,98$	0	Теплові нейтрони
Підкритичний стенд GUINEVERE (Бельгія)	Критичний або підкритичний $k_{\text{ef}} < 1$	0	Швидкі нейтрони
Підкритична збірка, що керується генератором нейтронів (Індія)	Підкритичний $k_{\text{ef}} = 0,873$	0	Теплові нейтрони



Рис. 1. Загальний вигляд майданчика ЯПУ «Джерело нейтронів»

вершуючи затвердженням проекту установки Кабінетом Міністрів України та одержанням ліцензії Держатомрегулювання України на право провадження діяльності з будівництва та введення в експлуатацію установки.

У 2014 р. реалізація проекту спорудження ЯПУ «Джерело нейтронів» перейшла у фінальну стадію – на майданчику установки завершено всі будівельні роботи, здійснюється монтаж, виконуються пусконаладжувальні роботи з основним обладнанням, відбувається підготовка до заключного етапу введення установки в експлуатацію, а саме: комплексні випробування всього устаткування та фізичний пуск установки.

Загальний вигляд майданчика з комплексом будівель і споруд для розміщення основного та допоміжного технологічного обладнання ЯПУ «Джерело нейтронів» наведено на рис. 1.

Основні технічні параметри установки

Функціонально структура ЯПУ «Джерело нейтронів» містить такі основні системи та елементи:

- підкритична збірка на теплових нейтронах;
- нейтроноутворююча мішень для одержання первинних (зовнішніх) нейтронів, розміщена всередині активної зони підкритичної збірки;
- лінійний прискорювач електронів, що працює в імпульсному режимі; канал транспортування пучка електронів до нейтроноутворюючої мішені та сканувальний пристрій з радіаційним захистом;
- перевантажувальна машина;
- автоматизована система контролю та керування роботою установки;
- перші контури систем охолодження активної зони підкритичної збірки та нейтроноутворюючої мішені;
- автономні градирні – другі контури систем охолодження;
- сховище відпрацьованого ядерного палива та опромінених нейтроноутворюючих мішеней (басейн витримки);
- баки збирання рідких радіоактивних відходів;
- сховище твердих радіоактивних відходів;
- експериментальні нейтронні канали з радіаційним захистом;

- комплекс експериментального обладнання та апаратури для проведення прикладних і фундаментальних наукових досліджень;

- системи інженерно-технічного забезпечення роботи установки в цілому.

Джерелом первинних нейтронів є нейтроноутворююча мішень з металевого вольфраму або природного урану, яка розміщується в центрі активної зони підкритичної збірки та опромінюється пучком електронів з енергією 100 МеВ, середнім струмом 1 мА і потужністю пучка 100 кВт.

Як ядерне паливо на ЯПУ «Джерело нейтронів» використовуватимуть односекційні паливні збірки типу ВВР-М2 зі збагаченням 19,7% за ізотопом ^{235}U (рис. 2). Основні нейтронно-фізичні характеристики установки наведено в табл. 2.

Програма наукових досліджень

Наукові програми на експериментальних каналах ЯПУ «Джерело нейтронів» передбачають такі базові для цього типу установок напрями фундаментальних і прикладних досліджень:

- дослідження властивостей підкритичних систем як прообразів нових безпечних джерел енергії;

- напрацювання медичних радіоізотопів та проведення медичних досліджень з нейтронної терапії;

- дослідження з ядерної фізики та енергетики;

- застосування методів дифракції нейтронів у дослідженнях з фізики радіаційного матеріалознавства і фізики конденсованих середовищ;

- дослідження малокутового розсіювання холодних нейтронів тощо.

Крім того, ЯПУ «Джерело нейтронів» використовуватимуть як базу для підготовки кадрів вищої кваліфікації та стажування спеціалістів, що працюють у галузі ядерної енергетики, а також для проведення занять зі студентами профільних університетів для набуття практичних навичок і культури безпеки в процесі роботи на ядерних установках.

Перспективи міжнародної співпраці

Крім широкого кола спеціалістів з України до складу команди, яка була задіяна у створенні ЯПУ «Джерело нейтронів», входили фахівці із США, Росії, Китаю, Франції, Німеччини. Це свідчить про значний інтерес міжнародного наукового співтовариства до виконання цього проекту.

Спорудження ЯПУ «Джерело нейтронів» має стати вагомим внеском у розвиток науко-

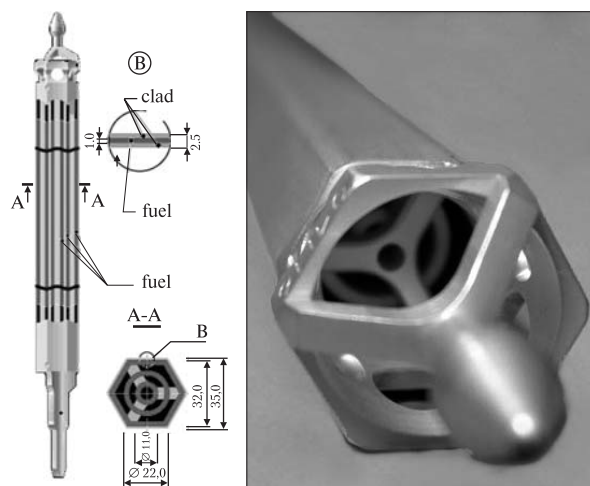


Рис. 2. Паливна збірка типу ВВР-М2

Таблиця 2. Нейтронно-фізичні характеристики установки

Параметр	Значення, нейтр. · см ⁻² · с ⁻¹
Максимальна інтегральна щільність потоку нейтронів в активній зоні	$2,4 \cdot 10^{13}$
Максимальна інтегральна щільність потоку нейтронів на внутрішній межі радіального відбивача	$2 \cdot 10^{13}$
Максимальна щільність потоку нейтронів в активній зоні в спектральному інтервалі $E_n \leq 0,1$ МеВ	$1,5 \cdot 10^{13}$
Максимальна щільність потоку швидких нейтронів ($E_n > 0,1$ еВ) в активній зоні	$1,3 \cdot 10^{13}$
Максимальна інтегральна щільність потоку нейтронів на зовнішній межі радіального відбивача	$1,6 \cdot 10^{12}$

во-технічного потенціалу України, а результати, які планується одержати під час експлуатації установки, сприятимуть подальшому розвитку багатьох програм міжнародного співробітництва з вивчення таких систем, як підкритичні збірки, що керуються прискорювачами заряджених частинок.

Заключні зауваження

Для сталого розвитку сучасної ядерної енергетики потрібні нові сучасні ядерні технології,

серед яких чільне місце можуть посісти системи на основі підкритичних збірок, що керуються прискорювачами.

Необхідно також визнати, що в найближчі сто років Україна не обійдеться без ядерної енергетики. Успішна реалізація проекту спорудження та введення в експлуатацію ЯПУ «Джерело нейтронів» створить умови для розвитку безпечних ядерно-енергетичних систем наступних поколінь та уможливить їх послідовне впровадження в ядерну енергетику майбутнього.

И.М. Карнаухов

ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины
ул. Академическая, 1, Харьков, 61108, Украина

О СООРУЖЕНИИ ЯДЕРНОЙ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ «ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ»

Рассмотрено состояние проекта сооружения ядерной подкритической установки «Источник нейтронов». Предполагается, что успешная реализация проекта указанной установки заложит основы для строительства в Украине безопасной, экологически чистой ядерной энергетики будущего и поспособствует развитию научно-технического потенциала страны.

Ключевые слова: ядерная подкритическая установка, источник нейтронов, подкритическая сборка.

I.M. Karnaukhov

NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology» of NAS of Ukraine
1 Academichna St., Kharkov, 61108, Ukraine

ON CONSTRUCTION OF THE SUBCRITICAL NUCLEAR FACILITY «NEUTRON SOURCE»

The state of the construction project of the Subcritical Nuclear Facility «Neutron Source» is presented. It is assumed that the successful implementation of the project will be the basis for the construction of safe and ecologically clean nuclear energy in Ukraine and contribute to the future development of scientific and technical potential of the country.

Keywords: nuclear sub-critical facility, neutron source, sub-critical assembly.