



**КАРНАУХОВ**  
**Іван Михайлович** —  
академік НАН України,  
заступник генерального  
директора Національного  
наукового центру «Харківський  
фізико-технічний інститут»

## РЕЗУЛЬТАТИ ФІЗИЧНОГО ПУСКУ ТА ПРОГРАМА ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЯДЕРНОЇ ПІДКРИТИЧНОЇ УСТАНОВКИ «ДЖЕРЕЛО НЕЙТРОНІВ»

**Стенограма доповіді на засіданні  
Президії НАН України 12 травня 2021 року**

*У доповіді розглянуто результати виконаних робіт із завершення спорудження та початку проведення фізичного пуску ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів, засноване на підкритичній збірці, керованій прискорювачем електронів». Введення в дію цієї унікальної інноваційної установки відкриває перспективи для побудови в Україні безпечної, екологічно чистої ядерної енергетики майбутнього та сприятиме розвитку науково-технічного потенціалу держави.*

Вельмишановний Анатолію Глібовичу!  
Вельмишановні члени Президії!

Мою доповідь присвячено результатам уже виконаних робіт зі спорудження ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів, засноване на підкритичній збірці, керованій прискорювачем електронів» (ЯПУ «Джерело нейтронів») та проведенню завершального етапу робіт, пов'язаних з фізичним пуском установки.

Питання про створення в Україні найсучаснішої інноваційної ядерної установки на базі Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» постало у зв'язку з домовленостями Вашингтонського саміту, викладеними у спільній заяві президентів України та США у квітні 2010 р., і документом «Меморандум про взаєморозуміння між Урядом України та Урядом Сполучених Штатів Америки стосовно співробітництва з питань ядерної безпеки», підписаним 26 вересня 2011 р.

Роботи зі спорудження ЯПУ «Джерело нейтронів» ННЦ ХФТІ послідовно виконував спільно з Аргонською національ-

ною лабораторією (США), яка здійснювала розроблення і науковий супровід проєкту, під постійним наглядом за дотриманням норм та правил ядерної та радіаційної безпеки з боку Державної інспекції ядерного регулювання України. Замовником будівництва та експлуатуючою організацією є ННЦ ХФТІ. У проєкті також брали участь деякі дослідницькі, проєктні, конструкторські та виробничі організації України, США, Великої Британії, Німеччини, Франції, Швейцарії, Японії, Китаю, Росії. Більшість комплектуючих установки було виготовлено на підприємствах України, зокрема міста Харкова.

У 2014 р. повністю завершено основні будівельні роботи та монтаж обладнання і розпочато процедуру введення установки в експлуатацію. Цей процес складається з кількох етапів:

1) пуско-налагоджувальні роботи (індивідуальні та функціональні випробування систем, а також комплексні випробування систем та установки в цілому);

2) фізичний пуск установки;

3) дослідно-промислова експлуатація установки.

Зовнішній вигляд будівлі, в якій розміщено ЯПУ «Джерело нейтронів», наведено на рис. 1. Установка знаходиться у приміщенні на задньому плані фото, а в будівлі на передньому плані розташовано системи охолодження. На рис. 2 можна бачити експериментальний зал розміром  $30 \times 30$  м і саму ядерну підкритичну установку, а на рис. 3 — пультову, або центр керування установкою. ЯПУ «Джерело нейтронів» функціонуватиме переважно в автоматичному режимі, персонал у пультовому залі лише стежитиме за робочими параметрами та здійснюватиме вимірювання в рамках виконання науково-дослідних програм.

Інтерес до використання підкритичних збірок виник ще в середині 50-х років минулого століття. Тоді ця ідея була пов'язана з прагненням підвищити безпеку атомної енергетики, оскільки ядерний реактор працює в режимі керованого ядерного вибуху. Проте тривалий час практичне застосування підкритичних збірок було неможливим через відсутність по-



Рис. 1. Будівля установки «Джерело нейтронів» у ННЦ ХФТІ



Рис. 2. Ядерна підкритична установка «Джерело нейтронів»



Рис. 3. Приміщення пультової

тужних прискорювачів заряджених частинок. На нинішньому етапі технічного прогресу вже з'явилися відповідні технології, які дають змогу побудувати такі прискорювачі. Так, у деяких країнах уже діють підкритичні збірки, але на відміну від «Джерела нейтронів», вони мають нульову теплову потужність.

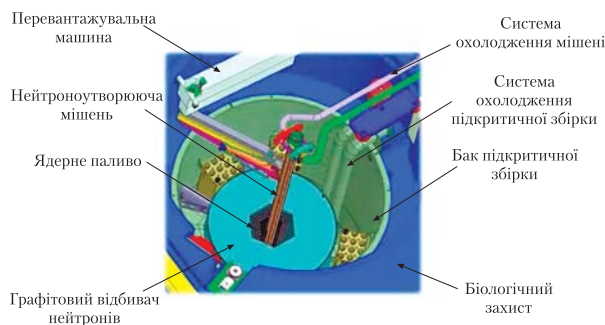


Рис. 4. Схема підкритичної збірки

Структурно ЯПУ «Джерело нейтронів» складається з таких основних систем та елементів:

- підкритична збірка на теплових нейтронах з низькозбагаченим паливом та комбінованим відбивачем нейтронів;
- лінійний прискорювач електронів (100 кВт), що працює в імпульсному режимі, з каналом транспортування пучка електронів до нейтронуютворюючої мішені;
- нейтронуютворююча мішень, розміщена всередині активної зони підкритичної збірки;
- системи охолодження нейтронуютворюючої мішені та активної зони підкритичної збірки;
- перевантажувальна машина;
- система біологічного захисту;
- автоматизована система контролю та керування роботою установки;
- басейн витримки відпрацьованого ядерного палива та опромінених нейтронуютворюючих мішеней;
- експериментальні нейтронні канали для проведення фундаментальних та прикладних досліджень;
- допоміжне обладнання;
- будівлі та споруди.

На рис. 4 наведено схему підкритичної збірки. Як можна бачити, в центрі розташована нейтронуютворююча мішень, навколо неї — активна зона, берилієво-графітовий відбивач нейтронів, системи охолодження мінералізованою водою та система біологічного захисту. Лінійний прискорювач з енергією пучка 100 кВт було розроблено в США, а виготовлено в Китаї.

Головною характеристикою будь-якої ядерної системи є ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів ( $k_{\text{еф}}$ ) — відношення числа нейтронів наступного покоління в результаті поділу ядер до числа нейтронів попереднього покоління в усьому об'ємі розмножувального середовища:  $k_{\text{еф}} = n_2/n_1$ . При внесенні в розмножувальне середовище зовнішнього джерела нейтронів результуюча швидкість утворення нейтронів визначається виразом:

$$N = N_0 / (1 - k_{\text{еф}}),$$

і, відповідно, величина створюваного потоку залежить від інтенсивності зовнішнього джерела нейтронів та ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів.

Іншою широкоживаною характеристикою ядерної системи є реактивність — безрозмірна величина, яка характеризує поведінку ланцюгової реакції поділу в активній зоні установки:  $\rho = (k_{\text{еф}} - 1) / k_{\text{еф}}$ . Якщо  $\rho = 0$ , то  $k_{\text{еф}} = 1$ , і нейтронна потужність системи не змінюється — такий стан системи називають критичним. Якщо  $\rho > 0$ ,  $k_{\text{еф}} > 1$ , то нейтронна потужність системи після згасання перехідних процесів збільшуватиметься, і такий стан системи називають надкритичним. Якщо  $\rho < 0$ ,  $k_{\text{еф}} < 1$ , то нейтронна потужність системи після згасання перехідних процесів зменшуватиметься, і такий стан системи називають підкритичним.

Основні проєктні параметри ЯПУ «Джерело нейтронів» такі:

- енергія пучка електронів — 100 МеВ;
- матеріал мішені — вольфрам, зараз розробляється мішень з урану;
- вихід нейтронів з мішені (U/W) —  $4,2 \cdot 10^{14} / 2,1 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- збагачення палива за  $U^{235}$  — 19,7%;
- загальна щільність потоку нейтронів в активній зоні / у зоні відбивача —  $2,4 \cdot 10^{13} / 2 \cdot 10^{13} \text{ н} \times \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- максимальна щільність потоку швидких нейтронів ( $E_n > 0,1 \text{ еВ}$ ) в активній зоні —  $1,3 \cdot 10^{13} \text{ н} \times \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Найбільше значення  $k_{\text{еф}}$ , дозволене регулятором, становить 0,96, тобто установка працюватиме лише в підкритичному режимі.

І найголовніше — ЯПУ «Джерело нейтронів» буде першою у світі установкою, заснованою на підкритичній збірці, яка має значну теплову потужність — 260–300 кВт.

Отже, як я зазначав вище, ми завершили необхідні пуско-налагоджувальні роботи і перейшли до етапу фізичного пуску ядерної підкритичної установки. Згідно з нормативними документами, фізичний пуск — це стадія введення установки в експлуатацію, що включає завантаження ядерного палива, досягнення встановленого в проєкті значення  $k_{\text{ef}}$  підкритичної збірки та виконання досліджень з підкритичного визначення нейтронно-фізичних характеристик установки з метою підтвердження її безпеки.

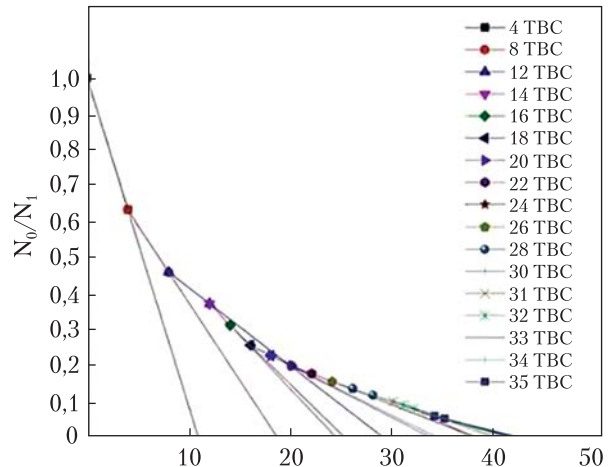
Зважаючи на особливості ліцензії, на проведення фізичного пуску установки ННЦ ХФТІ мав отримати від Держатомрегулювання України окремий дозвіл, який було видано 1 липня 2020 р., а вже 27 липня 2020 р. ми завантажили в активну зону першу тепловидільну збірку (рис. 5). До речі, перезавантажувальну машину, за допомогою якої відбувається встановлення збірок, ми розробили самі з урахуванням особливостей конструкції установки.

Створено також комп'ютерну модель, на основі якої ми можемо моделювати поведінку активної зони в разі завантаження різної кількості тепловидільних збірок. Після завантаження кожної серії збірок разом із представниками МАГАТЕ ми виконуємо повний цикл вимірювань реактивності установки та інших параметрів і порівнюємо їх значення з розрахованими.

Є кілька методів контролю реактивності підкритичної збірки: найбільш стандартний метод зворотної лічби, більш точний метод відношення площ і метод відношення щільності потоку нейтронів до току електронного пучка, який використовується для онлайн-контролю реактивності на будь-якому рівні потужності прискорювача.

На рис. 6 наведено криву, отриману методом зворотної лічби для різної кількості тепловидільних збірок. Як бачимо за апроксимацією цієї кривої, критичне значення  $N_0/N$  досяга-

**Рис. 5.** Процес завантаження першої тепловидільної збірки до активної зони ЯПУ «Джерело нейтронів». 27 липня 2020 р.



**Рис. 6.** Крива зворотної лічби, побудована в процесі завантаження тепловидільних збірок

ється в разі завантаження 42 збірок (у реальних умовах — 46).

На сьогодні до активної зони завантажено вже 35 тепловидільних збірок з 38 запланованих. Зараз очікуємо дозвіл від українського регулятора на встановлення решти збірок.

Після завершення процедури фізичного пуску установки і погодження з Держатомрегулюванням України звіту про її результати розпочнеться заключний етап — дослідно-промислова експлуатація, під час якої потрібно буде досягти проєктних параметрів установки



і отримати дозвіл регулятора на подальший перехід до її промислової експлуатації.

Зараз ми вже розробляємо програму фундаментальних і прикладних наукових досліджень, що плануються до виконання на базі ЯПУ «Джерело нейтронів» після введення її в експлуатацію. При цьому пріоритетними напрямками є такі:

- дослідження властивостей підкритичних систем;
- радіаційне матеріалознавство;
- виробництво медичних радіоізотопів;
- нейтронна дифрактометрія;

- ядерна фізика;
- нейтронно-активаційний аналіз.

Проте для забезпечення успішної та ефективної експлуатації установки необхідно вирішити ще багато проблем наукового, технічного, інформаційного та фінансового характеру. Серед них, мабуть, найбільш важливим питанням є відсутність підготовлених молодих фахівців у галузі ядерної фізики та ядерної медицини.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання  
підготувала О.О. Мележик*

*Ivan M. Karnaukhov*

National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

#### RESULTS OF PHYSICAL LAUNCH AND PROGRAM OF EXPERIMENTAL-INDUSTRIAL OPERATION OF NUCLEAR SUBCRITICAL FACILITY “NEUTRON SOURCE”

Transcript of the report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, May 12, 2021

The report considers the results of the work performed to complete the construction and start of the physical launch of the nuclear subcritical facility “Neutron source based on a subcritical assembly controlled by an electron accelerator.” The introduction of this unique innovative installation opens prospects for building a safe, environmentally friendly nuclear energy of the future in Ukraine and will contribute to the development of scientific and technical potential of the state.

**Keywords:** nuclear subcritical facility, neutron source, subcritical assembly.