



**ГРИЦИНА**

**Віктор Михайлович** – заступник директора з наукової роботи Науково-технічного комплексу «Ядерний паливний цикл» Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут»

## **СТВОРЕННЯ НЕЙТРОНО-ПОГЛИНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАХИСТУ АТОМНИХ РЕАКТОРІВ З ПІДВИЩЕНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІТЧИЗНЯНОЇ СИРОВИНИ І ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ**

**Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 14 січня 2026 року**

*У доповіді зазначено, що в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» активно розвиваються фундаментальні й прикладні дослідження в галузі ядерного матеріалознавства, конструювання й розроблення технологій виготовлення з вітчизняної сировини матеріалів зі збільшеною тривалістю експлуатації, зокрема нейтронопоглинальних матеріалів. Наведено результати робіт зі створення поглинальних елементів для систем управління та захисту ядерних реакторів різних типів, що дозволить забезпечити імпортозаміщення їх постачання з РФ і гарантуватиме безпеку функціонування атомної енергетики України.*

Шановний Анатолію Глібовичу!

Шановні члени Президії!

Нейтронопоглинальні матеріали є основною складовою конструкцій елементів систем регулювання і захисту ядерних реакторів. У реакторів водо-водяного типу (ВВЕР) ця конструкція має вигляд збірки поглинальних стрижнів (ПС) системи управління та захисту (СУЗ). Поглинальні матеріали не лише забезпечують можливість керування ланцюговою ядерною реакцією, що відбувається в ядерному паливі, а й виконують функції підтримання заданого розподілу нейтронів в об'ємі активної зони реактора з метою досягнення рівномірного і максимального вигорання палива. Тому нейтронопоглинальні матеріали поряд із ядерним паливом є основними і найважливішими елементами, від яких залежить безпека та економічність роботи атомних реакторів.



**Рис. 1.** Загальний вигляд тепловідільної збірки (ТВЗ) (а) та поглинальних стрижнів системи управління та захисту (ПС СУЗ) (б) і схема альтернативної конструкції порошкового варіанту поглинального елемента (ПЕЛ) для реактора ВВЕР-1000, розроблена в НТК ЯПЦ ННЦ ХФТІ (в)

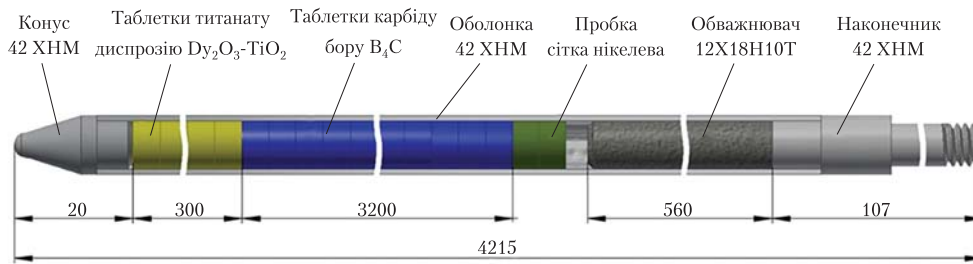
Сьогодні навіть складно уявити, яким був би стан нашої енергетики, якби своєчасно не було проведено роботи з диверсифікації постачання ядерного палива і тепловідільних стрижнів. До початку російсько-української війни єдиним постачальником ПС СУЗ для атомних станцій України з реакторами дизайну ВВЕР-1000 була російська компанія АТ «ТВЕЛ». Наразі ж в Україні триває впровадження власної розробленої технології виготовлення порошкового варіанту поглинальних елементів (ПЕЛ) та поглинальних стрижнів СУЗ для реакторів ВВЕР-1000, які за конструкцією і характеристиками матеріалів є зіставними зі штатними ПС СУЗ (рис. 1).

Два роки тому на засіданні Президії НАН України 24 січня 2024 р. заслуховували доповідь Володимира Семеновича Красноручького, в якій він тоді окреслив загальний стан робіт у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ ХФТІ) з розроблення нейтронопоглинальних матеріалів та ПЕЛів для ядерних установок. Сьогодні цей напрям активно розвивається, і ми продовжуємо науковий супровід експлуатації ядерних реакторів в Україні. З використанням наявного потенціалу ННЦ ХФТІ і НТК «Інститут монокристалів» за фінансової підтримки НАН України не лише було створено базу матеріалознавчих і технологічних розробок елементів

активної зони, а й забезпечено можливість виготовлення в Науково-технічному комплексі «Ядерний паливний цикл» (НТК ЯПЦ) ННЦ ХФТІ укрупнених партій ПЕЛів та ПС СУЗ доти, доки АТ «НАЕК «Енергоатом» не налагодить їх масове виробництво. Спільно з фахівцями філії «ВП «Атоменергомаш» АТ «НАЕК «Енергоатом» ми розробили технологічні схеми й виготовили дослідну партію ПС СУЗ для реакторів ВВЕР-1000, яка вже другий рік перебуває на етапі дослідно-промислової експлуатації і проходить випробування на четвертому блоці Рівненської АЕС.

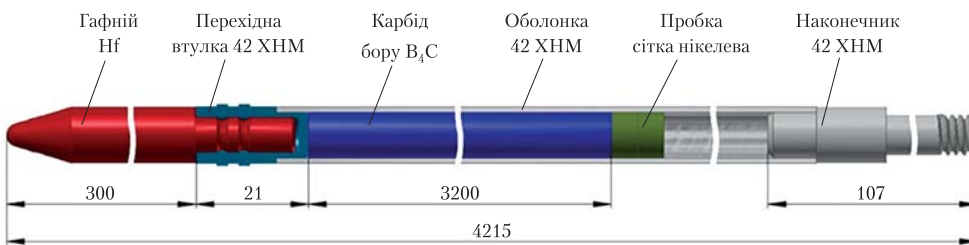
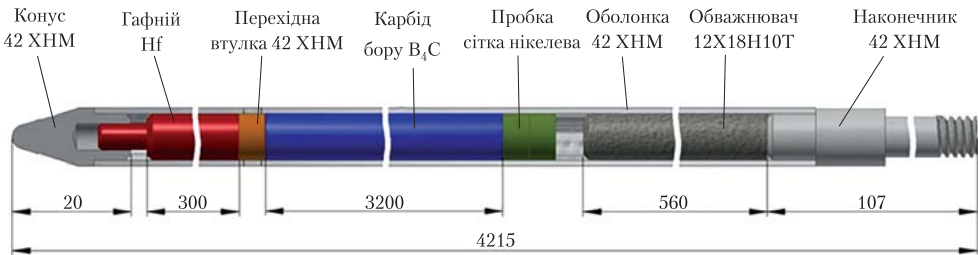
Завдяки підтримці НАН України і фінансуванню робіт за програмою 6541230 (проект «Розробка технологічних процесів виготовлення таблеткових варіантів ПЕЛ ПС СУЗ з підвищеними характеристиками терміну служби з використанням вітчизняної сировини і технологій виготовлення матеріалів, які освоєні на підприємствах України») проведено наукове обґрунтування вибору матеріалів і розроблення технологічних прийомів виготовлення нейтронопоглинальних матеріалів і таблеткового варіанту ПЕЛ ПС СУЗ реактора ВВЕР-1000.

Роботи було спрямовано на створення на основі власних науково-технічних розробок конструкцій ПЕЛ з характеристиками ресурсу та ефективності, які не лише перевершують характеристики штатної конструкції ПС СУЗ,



**Рис. 2.** Конструкція ПЕЛ з таблетковим поглиначем (як альтернативу таблеткам титанату диспрозію можна застосовувати таблетки гафнату диспрозію)

**Рис. 3.** Конструкція ПЕЛ з гафнієвим стрижнем, розміщеним в оболонці зі сплаву 42ХНМ, яка складається з двох секцій (нижньої та верхньої)



**Рис. 4.** Конструкція ПЕЛ із металевим гафнієвим стрижнем у відкритому вигляді і з перехідною втулкою (довжина гафнієвого стрижня 300—500 мм)

а й відкривають перспективи для застосувань в інших типах реакторів, у тому числі в малих модульних реакторах (ММР). Ці розробки ґрунтуються на використанні таблеткових нейтропоглинальних матеріалів, таких як карбід бору, титанат диспрозію, гафнат диспрозію. Це дає змогу збільшити вміст поглиначів нейтронів у ПЕЛі; забезпечити рівномірний розподіл матеріалу поглинача по висоті ПЕЛа; зменшити вплив поглинального матеріалу на деградацію оболонки в процесі експлуатації, а також автоматизувати процес збирання ПЕЛів.

Збільшити ресурс роботи ПЕЛів і ПС СУЗ реактора ВВЕР-1000 можна також завдяки оптимізації конструкцій ПЕЛів і ПС СУЗ.

Серед конструкційних матеріалів, які вже було застосовано або які є перспективними для створення вдосконалених конструкцій ПЕЛів, можна назвати такі:

- сплав 42ХНМ;
- нержавіюча сталь X18N10T (06X, 08X, 12X);
- цирконієві сплави.

Ми обґрунтували також вибір поглинальних матеріалів, які вже застосовуються або є перспективними для створення різних удосконалених конструкцій ПЕЛів, зокрема це:

- карбід бору ( $B_4C$ );
- карбід гафнію ( $HfC$ );
- титанат диспрозію ( $Dy_2TiO_5$ );
- гафнат диспрозію ( $Dy_2HfO_5$ );
- гафнат гадолінію ( $Gd_2HfO_5$ );
- диборид гафнію ( $HfB_2$ );
- гафній (ГФЕ-1).

Необхідність розроблення нових проектів реакторних установок, а також зміння умов експлуатації наявних реакторів ВВЕР-1000 (зокрема, їх робота в маневреному режимі) ставить завдання з переоцінки співвідношен-

ня частин з карбідом бору і  $\eta$ ,  $\gamma$ -поглиначем у конструкції ПЕЛів з урахуванням необхідності збереження ефективності та підвищення експлуатаційного ресурсу до 20—30 років.

У НТК ЯПЦ ННЦ ХФТІ розроблено і запатентовано<sup>1</sup> конструкції ПЕЛів з комбінованим використанням таблеток титанату диспрозію чи гафнату диспрозію з карбідом бору (рис. 2). У верхній частині оболонки розміщено таблетки карбіду бору, які взаємодіють з нейтронами за  $\eta$ ,  $\alpha$ -реакцією, а в нижній частині — таблетки титанату диспрозію або гафнату диспрозію, які взаємодіють з нейтронами за  $\eta$ ,  $\gamma$ -реакцією. Така конструкція є перспективною, оскільки для спорядження оболонки ПЕЛ таблетковий поглинач є більш технологічним порівняно з порошковими поглиначами. Таблетковий варіант дозволяє автоматизувати технологічний процес і зменшити час виготовлення ПЕЛів і ПС СУЗ. Крім того, істотною перевагою є більша густина поглинача в таблетковому вигляді, що впливає на подовження ресурсу роботи ПС СУЗ.

Конструкцію ПЕЛ із гафнієвим стрижнем, розміщеним в оболонці зі сплаву 42ХНМ, яка складається з двох секцій (нижньої та верхньої), наведено на рис. 3, а конструкцію ПЕЛ з металевим гафнієвим стрижнем у відкритому вигляді і перехідною втулкою — на рис. 4.

На етапі проведення науково-дослідних робіт було розроблено схему виготовлення таблеток карбіду бору методом холодного пресування і спікання, яка має такі стадії:

- 1) вхідний контроль порошку  $B_4C$ ;
- 2) змішування порошку з пластифікатором;
- 3) сушіння суміші;
- 4) пресування таблеток діаметром 7,6 мм;
- 5) відпалювання пластифікатору;
- 6) спікання таблеток у вакуумі;
- 7) шліфування таблеток;

<sup>1</sup> Патент України на винахід № 104325. Белаш М.М., Чернов І.О., Зігунов В.В., Ворожко В.В. Поглинаючий стрижневий елемент ядерного реактора. Опубл. 27.01.2014; Патент України на винахід № 98429. Белаш М.М., Чернов І.О., Куштим А.В. Поглинаючий стрижневий елемент ядерного реактора. Опубл. 10.05.2012.



Рис. 5. Зовнішній вигляд таблеток карбіду бору

8) вихідний контроль таблеток карбіду бору, паспортизація й пакування.

Комплексний аналіз отриманих результатів досліджень зумовив вибір параметрів технологічних процесів виготовлення таблеток  $B_4C$ , за яких досягнуто густини  $2,1 \pm 0,1$  г/см<sup>3</sup>, що дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики ПС СУЗ. На рис. 5 наведено зовнішній вигляд таблеток карбіду бору.

Розроблено також схему виготовлення таблеток титанату диспрозію ( $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$ ), яка охоплює такі стадії:

- 1) вхідний контроль порошків  $TiO_2$ ,  $Dy_2O_3$  та  $MoO_3$ ;
- 2) змішування порошків з пластифікатором;
- 3) сушіння суміші;
- 4) пресування таблеток діаметром 8,55 мм;
- 5) відпалювання пластифікатору;
- 6) спікання таблеток за температури 1650 °С в атмосфері повітря;
- 7) шліфування таблеток;
- 8) вихідний контроль таблеток титанату диспрозію, паспортизація й пакування.

Розроблено технологічні прийоми синтезу та визначено характеристики виготовлених таблеток титанату диспрозію. Досліджено вплив параметрів процесу виготовлення таблеток, наявності і кількості легувальних елементів на фазовий склад синтезованого титанату диспрозію та визначено характеристики таблеток для ПЕЛів реактора ВВЕР-1000. Встановлено, що використання нанорозмірного порошку  $TiO_2$  разом із  $MoO_3$  приводить до підвищення густини пече-



Рис. 6. Зовнішній вигляд таблеток титанату диспрозію

них таблеток титанату диспрозію до 7,0—7,1 г/см<sup>3</sup> і формування однофазної структури типу пірохлору. На рис. 6 показано зовнішній вигляд таблеток титанату диспрозію.

Відпрацьовано лабораторні процеси й оптимальні режими виготовлення таблеток гафнату диспрозію (Dy<sub>2</sub>HfO<sub>5</sub>) і гафнату гадолінію (Gd<sub>2</sub>HfO<sub>5</sub>) (схема 1), а також дибориду гафнію (HfB<sub>2</sub>) та карбіду гафнію (HfC) (схема 2).

Для виготовлення таблеток гафнату диспрозію з високою густиною й однофазною структурою розроблено технологічну схему 1, яка включає стадії попереднього синтезу Dy<sub>2</sub>HfO<sub>5</sub> і подальшої активації порошку. Використання нанопорошку HfO<sub>2</sub> з розміром частинок ~22 нм дає змогу отримувати таблетки з максимально високою густиною 8,2—8,6 г/см<sup>3</sup>. Для виготовлення таблеток гафнату гадолінію зі структурою типу флюориту також використано нанопорошок HfO<sub>2</sub> з розміром частинок ~22 нм, однак при цьому технологічну схему можна спростити до безпосереднього спікання таблетованої суміші вихідних оксидів, без операції попереднього синтезу.

Виготовлення таблеток дибориду гафнію з високою густиною та однофазною структурою реалізується за технологічною схемою 2, яка включає етапи попереднього синтезу HfB<sub>2</sub>, спікання у вакуумі ( $t = 1750$  °C) та подальшого гарячого пресування таблеток за температури

2150 °C, а таблетки карбіду гафнію отримують вакуумним спіканням за температури не нижче 2200 °C.

Для подальших досліджень і випробувань було виготовлено кілька дослідних партій зразків карбіду бору, титанату диспрозію, гафнату диспрозію (Dy<sub>2</sub>HfO<sub>5</sub>), гафнату гадолінію (Gd<sub>2</sub>HfO<sub>5</sub>), дибориду гафнію (HfB<sub>2</sub>) та карбіду гафнію (HfC), характеристики яких наведено в табл. 1. Проведено дослідження структурно-фазового стану отриманих матеріалів, визначено їх елементний склад та мікроструктуру.

Далі перед нами стояло завдання обґрунтувати працездатність і надійність розроблених конструкцій ПЕЛів. Сумісність поглинального матеріалу з оболонкою ПЕЛа є одним із важливих критеріїв працездатності та надійності ПС СУЗ водо-водяних енергетичних реакторів ВВЕР-1000.

Результати досліджень<sup>2</sup> сумісності сплаву 42ХНМ з карбідом бору за параметрів і умов роботи в реакторі (температура 350 °C протягом 3000 год) показали, що в разі контакту таблеток з оболонкою за температури 350 °C жодних структурних змін в оболонці виявлено не було. За температури 500 °C спостерігається слабкий поясок взаємодії, а помітна взаємодія оболонки зі сплавом 42ХНМ з V<sub>4</sub>C починається за температур 800—1200 °C (табл. 2). Це означає, що за штатних параметрів роботи ПЕЛів у реакторі ВВЕР-1000 сумісність карбіду бору в таблетковій формі з оболонкою зі сплаву 42ХНМ забезпечена на всьому часовому інтервалі їх експлуатації.

Інші експериментальні дослідження<sup>3,4</sup> в умовах реакторного опромінення підтвердили, що

<sup>2</sup> Фридман Р.С., Рисованый В.Д., Головченко Ю.М. Термические испытания облученных макетов и фрагментов ПЭЛ с V<sub>4</sub>C. В кн.: Сборник докладов 5-й межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. Т. 1. Ч. 2. Димитровград, 1998.

<sup>3</sup> Кондратьев В.П., Красина Т.А. Нержавеющая сталь 06X18H10T как оболочечный материал ПЭЛ для ПС СУЗ реактора ВВЭР-1000. Верификационный отчет. ФГУП ВНИИНМ. 2001.

<sup>4</sup> Рисованый В.Д., Захаров А.В., Муралева Е.М., Евсеев Л.А., Топорова В.Г., Пименов В.В. Продолжение работ по созданию высокоэффективного и радиаци-

Таблиця 1. Характеристики дослідних партій таблеток нейтронопоглинальних матеріалів

Матеріал, партія і склад композиції	Режим	Характеристики таблеток				Фазовий склад	Зовнішній вигляд
		До шліфування		Після шліфування			
		$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Відкрита пористість, %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Відкрита пористість, %		
Гафнат диспрозію; HD-3; Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / HfO <sub>2</sub> 50,0/50,0 мол. %	Схема 2: поперед. синтез (1650 °С, 3 год); спікання (1650 °С, 3 год); повітря	7,30—7,50	1,80—2,50	7,10—7,20	0,90—1,90	Dy <sub>2</sub> HfO <sub>5</sub> (100 %), a = 0,5258 нм	Колір світло-коричневий, багато сколів, тріщин
Гафнат диспрозію; HD-2(N); Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / HfO <sub>2</sub> 50,0/50,0 мол. %	Схема 2: поперед. синтез (1450 °С, 3 год); спікання (1650 °С, 3 год); повітря	8,22—8,62	0,07—0,34	8,45—8,50	0,15—0,30	Dy <sub>2</sub> HfO <sub>5</sub> (100 %), a = 0,5255 нм	Колір темно-коричневий, усадка рівномірна
Гафнат гадолінію; HG-1; Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / HfO <sub>2</sub> 50,0/50,0 мол. %	Схема 1: спікання (1650 °С, 3 год); повітря	7,64—7,74	0,75—1,50	7,68—7,73	0,95—1,40	Gd <sub>2</sub> HfO <sub>5</sub> -1 (84 %), a = 0,5306 нм; Gd <sub>2</sub> HfO <sub>5</sub> -2 (16 %), a = 0,5273 нм	Колір світло-коричневий, усадка рівномірна
Гафнат гадолінію; HG-2; Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / HfO <sub>2</sub> 50,0/50,0 мол. %	Схема 2: поперед. синтез (1450 °С, 3 год); спікання (1650 °С, 3 год); повітря	7,37—7,61	0,86—1,40	7,65—7,69	0,50—1,13	Gd <sub>2</sub> HfO <sub>5</sub> -1 (89 %), a = 0,531 нм; Gd <sub>2</sub> HfO <sub>5</sub> -2 (11 %), a = 0,5273 нм	Колір світло-коричневий, матовий, усадка рівномірна
Диборид гафнію; HB; HfO <sub>2</sub> / В 82,9/17,1 мас. % Карбід гафнію; HC-2; HfO <sub>2</sub> / С 85,4/14,6 мас. %	Схема 2: поперед. синтез (1750 °С, 3 год); спікання (2200 °С, 3 год); вакуум	7,19—7,25	4,70—4,90	—	—	HfB <sub>2</sub> (100 %), a = 0,3140 нм; c = 0,3472 нм	Колір сірий, усадка рівномірна
		9,89—10,30	1,30—2,01	—	—	HfC, a = 0,4639 нм	Колір сірий, усадка нерівномірна

Таблиця 2. Сумісність карбиду бору з хромонікелевим сплавом 42ХНМ (час випробувань 3000 год)

Матеріал оболонки	Максимальне вигорання <sup>10</sup> В, %	Сумісність за температур, °С				
		300—350	~500	~800	~1000	~1200
42ХНМ (ЕП-630У)	40±3	Сумісний	Сумісний	Початок інтенсивної взаємодії	Повне окрихчення оболонки	Наскрізне руйнування оболонки

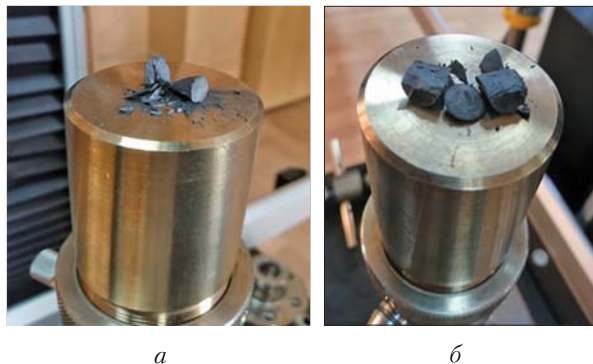


Рис. 7. Зовнішній вигляд таблеток карбіду бору після механічних випробувань: *а* — на осьове стискання; *б* — на діаметральне стискання

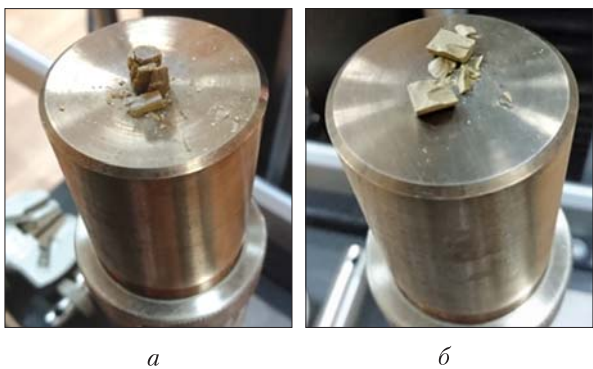


Рис. 8. Зовнішній вигляд таблеток титанату диспрозію після механічних випробувань: *а* — на осьове стискання; *б* — на діаметральне стискання

титанат диспрозію ( $Dy_2TiO_5$ ) і гафнат диспрозію ( $Dy_2HfO_5$ ) є сумісними з хромонікелевими та аустенітними сталями (42ХНМ, 06Х18Н10Т) за робочої температури 300—350 °С в реакторі ВВЕР-1000 протягом як мінімум 20 років.

Під час роботи реактора можуть виникати штатні ситуації, коли вмикається автоматичний захист і ПС СУЗ занурюються в напрямні канали тепловідільної збірки (ТВЗ) з максимальною швидкістю переміщення до 4 м/с. За таких динамічних навантажень головний удар припадає на голівку ПС СУЗ та голівку ТВЗ, на яких енергію частково гасять пружини.

онно стойкого поглощающего материала — гафната диспрозия. Годовой отчет НИИАР. 2007.

Для підтвердження запасу міцності таблеток з титанату диспрозію і карбіду бору необхідно було провести аналіз динамічних навантажень на таблетки поглиначи під час зіткнення голівки ПС СУЗ з голівкою ТВЗ і визначити механічні властивості досліджуваних таблеткових нейтронопоглинальних матеріалів.

Випробування на міцність таблеток карбіду бору і титанату диспрозію проводили на розривній машині Instron за методикою осьового стискання циліндричних зразків за кімнатної температури та за температури 350 °С (діаметр таблеток 7,60—7,65 мм, висота близько 10 мм). Густина таблеток з карбіду бору становила  $\sim 2$  г/см<sup>3</sup>, а таблеток з титанату диспрозію 7,1—7,2 г/см<sup>3</sup> для вихідних таблеток і 7,0 г/см<sup>3</sup> для виробів, що пройшли корозійні випробування протягом 5000 год. За підсумками проведених випробувань було отримано такі результати:

- межа міцності таблеток з карбіду бору у випробуваннях на осьове стискання у вихідному стані за 20 °С становить  $173 \pm 26$  МПа, а за 350 °С —  $211 \pm 22$  МПа;
- межа міцності таблеток карбіду бору на розтягування за 20 °С становить 35 МПа, а за 350 °С — 27 МПа;
- межа міцності таблеток з титанату диспрозію у випробуванні на осьове стискання у вихідному стані за 20 °С становить  $270 \pm 38$  МПа, а за 350 °С —  $323 \pm 35$  МПа;
- межа міцності таблеток з титанату диспрозію у випробуванні на осьове стискання після корозійних випробувань за 20 °С становить близько 200 МПа, а за 350 °С — 242 МПа.

Усі параметри випробувань на діаметральне стиснення таблеток з карбіду бору (температура, швидкість навантаження) були такими самими, як і у випробуваннях на осьове стиснення. На рис. 7 показано характер руйнування виробів — розлом на дрібні фрагменти з попереднім утворенням конусів розлому, характерних для випробувань на осьове стискання, і розкол по діаметру на дві частини (фугасний) за діаметрального стискання. Характер руйнування таблеток з титанату диспрозію показано на рис. 8.

Для підтвердження запасу міцності таблеток з титанату диспрозію і карбіду бору було

проведено оцінку динамічних навантажень на таблетки поглиначи під час зіткнення голівки ПС СУЗ з голівкою ТВЗ. Результати розрахунків свідчать, що коефіцієнт запасу міцності є достатнім для збереження цілісності таблеток.

При виготовленні віброущільненого варіанта ПЕЛа з карбіду бору технологічно складно досягти густини засипки понад  $1,7 \text{ г/см}^3$ , а для титанату диспрозію — більш як  $5,15 \text{ г/см}^3$ . Перехід від порошкового до таблеткового варіанта ПЕЛа дає змогу регулювати вміст нейтронопоглинального матеріалу в більш широких межах. Крім того, таблетковий варіант дозволяє використовувати автоматичні заповнювальні пристрої.

Більша густина таблетки  $\text{B}_4\text{C}$  ( $1,95 \text{ г/см}^3$ ) порівняно з порошковою засипкою ( $1,7 \text{ г/см}^3$ ) зумовлює підвищення ефективності поглинання нейтронів приблизно на 2 %, а зменшення діаметра осердя від 7,0 мм до 6,85 мм призводить до зниження ефективності поглинання нейтронів майже на таку саму величину.

Використання запропонованих нейтронопоглинальних матеріалів (титанату диспрозію з густиною  $7,0 \text{ г/см}^3$  та карбіду бору з густиною  $1,95 \text{ г/см}^3$ ) у таблетковому варіанті заповнення ПЕЛа (6,85 мм) дозволить збільшити висоту нижньої, найбільш навантаженої частини елемента з 30 до 60 см без зменшення загальної ефективності всіх ПС СУЗ. Інтегральна ефективність активної зони не зміниться, що є достатнім для забезпечення нейтронофізичних критеріїв працездатності ПЕЛ.

Збільшення висоти стовпа поглиначи  $\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$  дозволить вивести із зони щільного потоку нейтронів ( $n, \alpha$ ) поглинач  $\text{B}_4\text{C}$ , який має високий темп вигорання ізоотопу  $^{10}\text{B}$  та низьку радіаційну стійкість.

Збільшення висоти стовпа поглиначи  $\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$  до 60 см приводить до зменшення щільності потоку нейтронів у 1,27 раза порівняно зі щільністю потоку нейтронів на нижню частину поглинального стовпа  $\text{B}_4\text{C}$  штатного ПЕЛа (30 см) при 70 % його занурення (рис. 9).

Для обґрунтування поведінки дефектних ПЕЛів у середовищі першого контуру ВВЕР-1000 проведено корозійні випробуван-

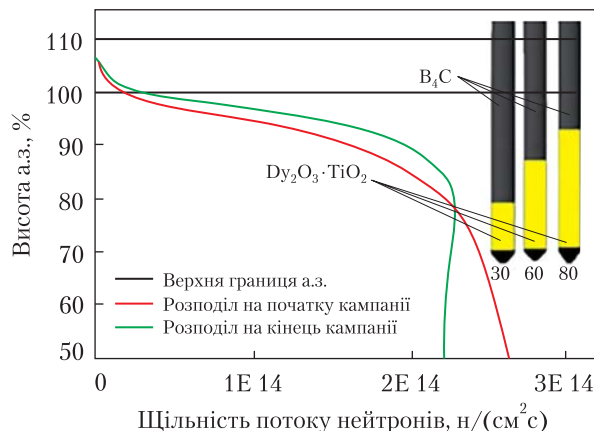


Рис. 9. Аксіальний розподіл щільності потоку нейтронів за висотою активної зони та схематичне положення ПЕЛів з різною висотою стовпа  $\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$  при 70 % занурення ОР СУЗ від низу активної зони

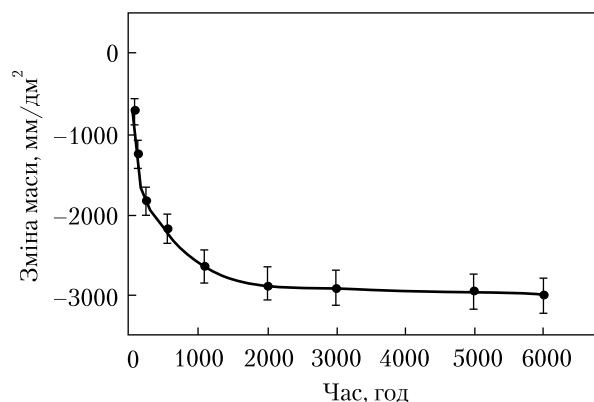


Рис. 10. Корозійна стійкість таблеток карбіду бору

ня таблеток карбіду бору і титанату диспрозію тривалістю 6100 год у статичному автоклаві та модельному теплоносії першого контуру ВВЕР-1000 ( $350 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $16,5 \pm 1,3 \text{ МПа}$ ).

У дослідженнях корозійної стійкості карбіду бору (рис. 10) було отримано такі результати:

- кінетика корозії карбіду бору характеризується втратою ваги і зумовлена переважно утворенням  $\text{B}_2\text{O}_3$  та переходом його в теплоносій, а також утворенням  $\text{CO}_2$ ;
- на втрату маси таблеток  $\text{B}_4\text{C}$  істотно впливають температура і тиск корозійного середовища.

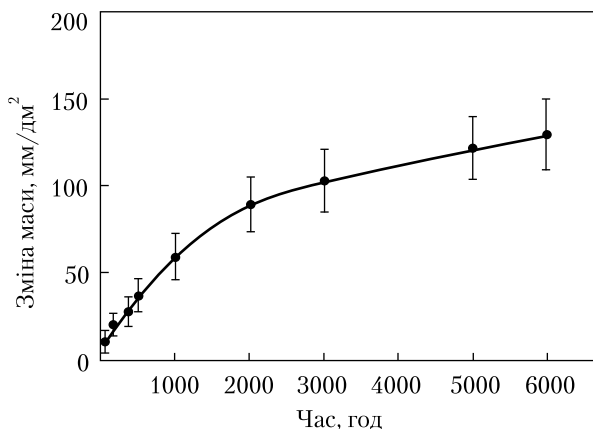


Рис. 11. Корозійна стійкість таблеток титанату диспрозію

Корозійні випробування таблеток титанату диспрозію дали такі результати (рис. 11):

- кінетика корозії таблеток титанату диспрозію характеризується збільшенням ваги;
- таблетки мають високий потенціал опору формозміні та руйнуванню завдяки кристалічним зв'язкам у твердій фазі та капілярним силам, прояв яких залежить від розміру й кількості пор, а також від ступеня їх заповнення водою.

Ґрунтуючись на результатах проведених досліджень і технологічних випробувань, було розроблено вимоги до таблеток з карбиду бору і титанату диспрозію, а саме:

- геометричні розміри: діаметр — 6,85—6,95 мм, висота — 8,0—11,0 мм;
- густина —  $\geq 1,95$  г/см<sup>3</sup> для  $V_4C_3$  і 6,6—7,2 г/см<sup>3</sup> для  $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$ ;
- види і розміри допустимих дефектів: сколи на торцевій поверхні таблеток (фаски) не повинні перевищувати 10 % площі торцевої поверхні; сколи на циліндричній поверхні таблеток не повинні перевищувати 5 % площі циліндричної поверхні; глибина окремого сколу має бути не більш як 1,0 мм; окремі тріщини не повинні перевищувати 90° по колу циліндричної поверхні;
- структурно-фазовий стан: для  $V_4C_3$  — ромбодрична ґратка; для  $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$  — структура флюориту або пірохлору, допускається присут-

ність ромбічної і гексагональної модифікацій, не допускаються вихідні оксиди;

- елементний склад: для  $V_4C_3$  — вміст  $V_{зар.}$  — 73—81 мас. %; збагачення за ізотопом  $^{10}B$  —  $19,9 \pm 0,3$  мас. %; домішки: Fe —  $\leq 1,0$  мас. %, Ca —  $\leq 0,3$  мас. %; для  $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$  — вміст Dy — 68—72 мас. %; вміст Ti — 9—13 мас. %; сумарна частка домішок Sm, Eu і Gd —  $\leq 0,1$  мас. %; частка Eu —  $\leq 0,01$  мас. %; частка Mo —  $\leq 3$  мас. %.

На основі розроблених вимог оформлено проекти технічних умов (ТУ) на таблетки з карбиду бору і титанату диспрозію.

Стратегія розвитку атомної енергетики України до 2050 року передбачає збільшення потужності виробництва електроенергії на АЕС удвічі і впровадження в структуру атомної енергетики нових типів реакторів. Тому створення й налагодження масового виробництва ПС СУЗ для ядерних блоків, оснований на вітчизняних розробках, є вкрай актуальним завданням. Його виконання потребує створення в ННЦ ХФТІ повноцінного комплексу науково-дослідного обладнання для розроблення і модернізації ПС СУЗ.

На сьогодні в ННЦ ХФТІ за підтримки Президії НАН України закладено лабораторну технологічну базу для виробництва елементів систем управління реакторами. Вже виготовлено дослідну партію ПС СУЗ. АТ «НАЕК «Енергоатом» зараз будує завод і закуповує промислове обладнання для виготовлення ПС СУЗ за розробленою нами технологією.

Для подальшого розвитку цього напрямку доцільно створити в ННЦ ХФТІ порошок лабораторію та кластер досліджень високотемпературних теплофізичних властивостей реакторних матеріалів, для чого необхідно придбати комплекс науково-дослідного обладнання.

Отже, за результатами проведених науково-дослідних робіт виконано комплекс матеріалознавчих досліджень та розроблено методи порошкової металургії для створення перспективних нейтронопоглинальних матеріалів у таблетковій формі з регульованими показниками густини та фазового стану.

Проведено науково-технічне обґрунтування працездатності конструкцій ПЕЛ ПС СУЗ

реактора ВВЕР-1000. Українські підприємства освоїли технології виготовлення складових таких конструкцій і можуть випускати продукцію як у воєнний, так і в повоєнний час.

Розроблено технології виготовлення таблеток карбіду бору з густиною до 84 % від теоретичної, а також таблеток титанату диспрозію та гафнату диспрозію з однорідним фазовим станом і густиною до 96 % від теоретичної. Визначено основні характеристики цих матеріалів, які забезпечують можливість їх застосування у складі ПЕЛів у реакторах водо-водяного типу.

Грунтуючись на результатах проведених науково-дослідних робіт, можна переходити до наступного етапу — виконання дослідно-конструкторських робіт з проектування ПЕЛів та ПС СУЗ для конкретних циклів роботи реакторів ВВЕР-1000 або реакторів інших типів. Од-

нак для цього необхідно придбати додаткове дослідницьке обладнання.

Роботи з розроблення порошкового і таблеткового варіантів ПС СУЗ є надзвичайно важливими для функціонування атомної енергетики України і забезпечення імпортозаміщення постачання поглинальних стрижнів із РФ. Подальше виконання проекту зі створення ПЕЛів і ПС СУЗ альтернативної конструкції і технологічної бази для їх виготовлення, а також проведення необхідних випробувань з подальшим ліцензуванням є першими кроками на шляху до впровадження таких ПС СУЗ на АЕС не лише в Україні, а й у тих країнах Європи, які й досі експлуатують радянські реактори ВВЕР-1000.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик*

Viktor M. Grytsyna

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4341-007X>

CREATION OF NEUTRON-ABSORBING MATERIALS FOR CONTROL AND PROTECTION SYSTEMS OF NUCLEAR REACTORS WITH INCREASED SERVICE LIFE CHARACTERISTICS USING DOMESTIC RAW MATERIALS AND TECHNOLOGIES

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, January 14, 2026

The report states that the National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology” is actively developing fundamental and applied research in the field of nuclear materials science, design and development of technologies for manufacturing materials with increased service life from domestic raw materials, in particular neutron-absorbing materials. The author presents the results of work on the creation of absorbing elements for control and protection systems of nuclear reactors of various types, which will allow ensuring import substitution of their supply from the Russian Federation and guarantee the safe functioning of the nuclear power industry of Ukraine.

**Cite this article:** Grytsyna V.M. Creation of neutron-absorbing materials for control and protection systems of nuclear reactors with increased service life characteristics using domestic raw materials and technologies (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, January 14, 2026). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2026. (3): 42—51. <https://doi.org/10.15407/visn2026.03.042>