

## РЕЦЕНЗІЯ

доктора ф.-м. наук, професора Малихіна С.В.

на дисертаційну роботу **Куштима Антона Володимировича**

**«Тепловидільні збірки з твелями стрижневого типу на основі діоксиду**

**урану для дослідницької ядерної установки «Джерело нейтронів»**

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали

### **1. Актуальність теми**

Дисертаційна робота Куштима А.В. присвячена розв'язанню науково-практичної задачі в галузі розвитку ядерно-промислового комплексу - створенню перспективних конструкцій та технологічних параметрів виготовлення тепловидільних збірок (ТВЗ) з тепловидільними елементами (твелями) стрижневого типу на основі діоксиду урану  $UO_2$  і дисперсійної паливної композиції  $UO_2-Al$  для дослідницької ядерної установки «Джерело нейтронів» (ДЯУ «ДН»). Так як існує можливість виконання даної задачі за рахунок наявності в Україні наукової і промислової бази, а також досвіду проектування і розробки твелів та ТВЗ, то виконання поставлених завдань є актуальним і важливим. Завданням є вдосконалення твелів і ТВЗ під умови експлуатації в активній зоні ДЯУ «ДН».

### **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Основні результати дисертаційної роботи отримані при виконанні проєктів науково-дослідницьких робіт молодих вчених НАН України:

1. «Розробка та дослідження характеристик палива дисперсійного типу для дослідницьких ядерних установок України» (2017-2018 рр., номер державної реєстрації №0117U003767);

2. «Дослідження характеристик міцності стрижневих твелів дисперсійного типу та тепловидільних збірок з їх використанням» (2019-2020 рр., номер державної реєстрації №0119U102436);

Також результати дисертації містять матеріали технічних проєктів:

3. УНТЦ Р515 «Розробка конструкції і технології виготовлення твелів і ТВЗ для підкритичної збірки, проведення їх випробувань в обґрунтування надійності і безпеки» (НТК ЯПЦ ННЦ ХФТІ, 2012-2015, Р515С);

4. «Матеріалознавчі дослідження та розрахункові обґрунтування застосування конструкційних, нейтроно-поглинаючих і ядерних матеріалів в перспективних ядерних циклах України, етап 5, 2020 р., шифр теми III-1-16 (НТК ЯПЦ), номер державної реєстрації №0116U007187.

### **3. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Робота Куштима А.В. є завершеною науковою роботою, містить дві анотації – українською та англійською мовами, вступ, п'ять розділів, висновки, список літератури і три додатки.

Дисертація присвячена вирішенню важливої прикладної задачі фізики, а саме дослідженню та відпрацюванню технологічних параметрів виготовлення твелів стрижневого типу на основі  $UO_2$  та конструктивних характеристик тепловидільних збірок з їх використанням.

Об'єктом дослідження є процеси та явища, що визначають фізико-технологічні параметри та характеристики створення паливних композицій на основі діоксиду урану, конструкцій ТВЗ, їх фізико-механічних властивостей (характеристик).

У роботі опрацьовано три конструкції тепловидільних збірок. Проведено обґрунтування вибору їх матеріалів, теплофізичні розрахунки обраних твелів та аналіз статичної міцності розроблених моделей збірок. В обґрунтування параметрів роботи твелів в дослідницької ядерної установки «Джерело нейтронів», розрахунками показано, що при максимальній глибині вигорання таблеток  $UO_2$  мінімальна величина діаметрального зазору між паливним сердечником і оболонкою твелу контейнерного варіанту в гарячому стані складає  $\sim 130$  мкм, а їх контактна взаємодія відсутня. При максимальному вигоранні  $10,5 \text{ МВт} \times \text{дїб/кг U}$  накопичення газоподібних продуктів поділу

(Xe+Kr) складає  $66,7 \text{ см}^3$ , а гелію  $0,04 \text{ см}^3$ . Концентрація газоподібних продуктів поділу під оболонкою твелу становить  $0,06-0,15\%$ .

У роботі виконано лабораторно – технологічні дослідження з оптимізації режимів виготовлення таблеткових матеріалів  $\text{UO}_2\text{-Al}$ , що складають:  $P_1=300-500 \text{ МПа}$ ,  $P_2=800-900 \text{ МПа}$ , режими спікання у вакуумі:  $t_1=400-600 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_2=600-630 \text{ }^\circ\text{C}$ , витримка 1-2 години. На відміну від найближчого аналога, пресування на другому етапі проводиться в прес-формі, внутрішній діаметр  $D_2$  якої зв'язаний з внутрішнім діаметром  $D_1$  першої прес-форми співвідношенням:  $1,03 \leq D_2/D_1 \leq 1,12$ . Збільшення різниці в діаметрах між прес-формами для першого та другого етапу пресування з  $0,2 \text{ мм}$  ( $D_2/D_1 \approx 1,02$ ) до величини  $D_2 \geq 1,03 \cdot D_1$ , сприяє підвищенню густини заготовки при однакових зусиллях пресування за рахунок збільшення ступеня радіальної деформації і дозволяє зменшити пористість до  $7-18\%$ , у порівнянні з  $25\%$  в аналога.

Відпрацьована лабораторна технологія виготовлення стрижневих твелів зчепленого варіанту із застосуванням операції газостатичного пресування. Встановлений режим газостатичного пресування макетів твелів з параметрами газостата показав задовільний контакт сердечника і оболонки. Максимальні значення міцності, отримані на з'єднаннях  $\text{Al-(Al+12\%Si)-Zr}$  і  $\text{Al-Cu-Zr}$ , відповідно, становили  $57,0 \text{ МПа}$  і  $55,3 \text{ МПа}$ .

Проведені експериментальні роботи з дослідження властивостей зразків палива та випробування макетів твелів і елементів ТВЗ: механічні, корозійні, температурні, матеріалознавчі і структурні. При механічних випробуваннях макетів твелів на розривній машині типу Р-10 при  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  значення межі міцності ( $\sigma_B$ ), межі плинності ( $\sigma_{0,2}$ ) та відносного подовження ( $\delta$ ) для матеріалу зі сплаву E110 у вихідному стані, відповідно, становить  $(346 \pm 30) \text{ МПа}$ ,  $(237 \pm 20) \text{ МПа}$  і  $(31 \pm 2)\%$ , що повинно задовольняти умовам натурального використання.

При корозійних випробуваннях алюмінієвих таблеток отримані дані свідчать, що в початковий момент (тривалістю до 100 годин) спостерігається значний приріст ваги зразків таблеток, а потім корозія йде по лінійному закону.

Оцінка швидкості корозії на лінійних ділянках показала, що зразки, виготовлені з прутка алюмінію, мають більш високу корозійну стійкість в порівнянні із зразками з порошоків алюмінію ПА. Їх швидкість корозії при температурі 100 °С, відповідно, дорівнювала  $10 \times 10^{-2}$  мг/дм<sup>2</sup>·год і  $42 \times 10^{-2}$  мг/дм<sup>2</sup>·год.

Матеріал алюмінієвої матриці має структуру з середнім розміром зерна ~ 25 мкм. Мікротвердість по Вікерсу алюмінієвої оболонки, матриці і часток композиції UO<sub>2</sub>-Al склала, відповідно, 500-559 МПа, 608-617 МПа і 696-742 МПа.

*Висновки*, сформульовані у роботі, висвітлюють результати дослідження як вирішення висунутих в дисертації завдань. В цілому висновки відповідають поставленим завданням і вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

*Список літератури* досить широко охоплює розглянутий напрямок дослідження, певною мірою відображає опрацювання автором значної кількості вітчизняних та іноземних джерел.

*Додатки* містять інформацію про практичне впровадження результатів дисертації.

#### **4. Наукова новизна одержаних результатів**

Здобувачем розроблені нові конструкції тепловидільної збірки для ядерної установки «Джерело нейтронів», що можуть бути застосовані як альтернативні до закордонних аналогів та забезпечать енергетичну незалежність України. Для розміщення твелів у верхній опорній решітці виконані заглиблення зі сторони бокової поверхні, а кожне із заглиблень виконано у вигляді паза, що переходить у отвір, причому поперечний розмір паза менший за поперечний розмір отвору.

Удосконалено технологію виготовлення паливних таблеток UO<sub>2</sub>-Al, яка дозволяє отримувати вироби з густиною 95-98% від теоретичної, заданими геометричними характеристиками та структурою. Удосконалення способу здійснювалося шляхом застосування інших режимів пресування та спікання

заготовки (на першому етапі тиск пресування склав 300...500 МПа, а на другому етапі 800...900 МПа, вакуумне спікання при температурах від 580 °С до 630 °С), а також вибором параметрів прес-форми, внутрішній діаметр  $D_2$  якої зв'язаний з внутрішнім діаметром  $D_1$  першої прес-форми співвідношенням:  $1,03 \leq D_2/D_1 \leq 1,12$ . Використання наведених параметрів виготовлення паливної композиції забезпечує високу густину та суцільність.

Визначено деформацію і зміщення при статичних навантаженнях запропонованих конструкцій ТВЗ до зусиль, рівних умовній межі плинності, шляхом комп'ютерного моделювання їх тривимірних моделей і проведення механічних випробувань зразків і макетів на розривній машині.

Обґрунтована працездатність запропонованої конструкції ТВЗ шляхом дослідження швидкості корозії зразків дисперсійної паливної композиції  $UO_2$ -Al (без оболонки) в модельних умовах, що імітують склад і параметри теплоносія ЯПУ «Джерело нейтронів», яка склала  $\sim 500$  мг/дм<sup>2</sup> протягом 1000 годин випробувань.

#### **5. Достовірність отриманих результатів та висновків**

Достовірність отриманих результатів зумовлено науково обґрунтованими поставленими завданнями, а також використанням апробованого спектру сучасних методик дослідження.

#### **6. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання**

Запропонована лабораторна технологія виготовлення паливних композицій на основі  $UO_2$  і  $UO_2$ -Al та тепловидільних збірок з їх використанням є перспективною для створення ядерного палива для дослідницької ядерної установки «Джерело нейтронів». Теоретичні та практичні матеріали можуть бути успішно використані при виготовленні стрижневих твелів і ТВЗ для інших типів дослідницьких реакторів, в тому числі ВВР-М. Запропоновані методики лабораторні технології можуть знайти використання в заводських умовах для виготовлення стрижневих твелів і ТВЗ на основі діоксиду урану для оптимізації і вдосконалення технологічних

процесів. Результати дисертаційної роботи використані в технологічному процесі виготовлення ТВЗ-Х і в навчальному процесі в НТУ «ХП».

#### **7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Дисертація виконана з дотримання вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Основні ідеї автора та результати дослідження викладено у шести фахових наукових статтях, трьох патентах України та матеріалах міжнародних конференцій, де була проведена апробація ідей, що викладено у дисертаційному дослідженні.

#### **8. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

1. Дослідження впливу механізмів взаємодії на границях розділу розглянутих з'єднань твелів зчепленого варіанту потребує більш поглибленого аналізу.

2. Роботу можна доповнити вивченням впливу на структуру матричного матеріалу домішок, які стабілізують структуру і підвищують її фізико-механічні характеристики.

3. Представлення експериментальних результатів щодо рентгеноструктурних досліджень потребує більш детальних уточнень та обговорень.

Тематика потребує подальших досліджень як для подолання зауважень та недоліків, представлених вище, так і через загальну перспективність напрямку. Існуючі недоліки не роблять роботу менш значущою, менш оригінальною та не знижують цінність наукового дослідження.

#### **9. Висновки**

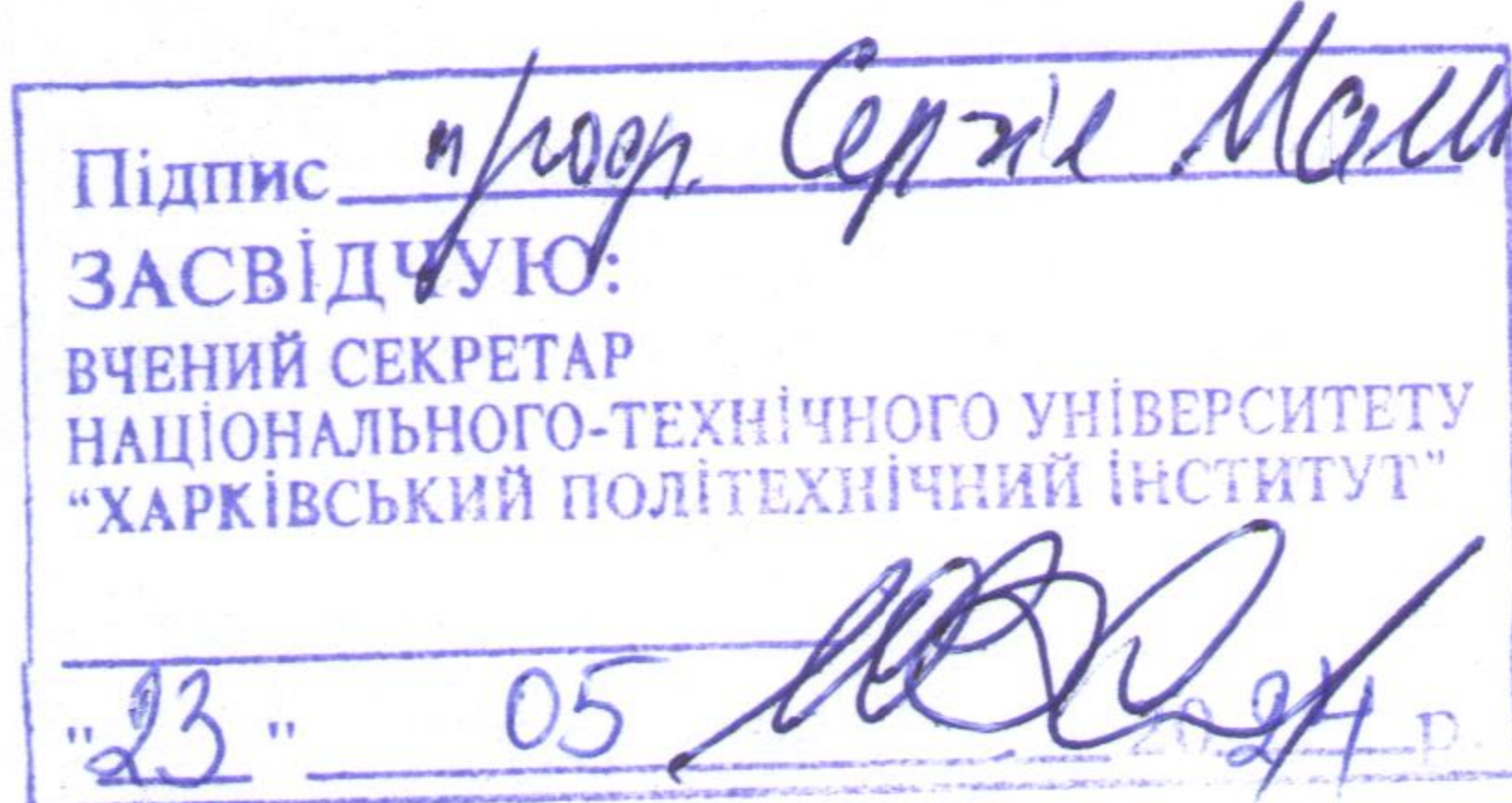
Дисертаційна робота Куштима А.В. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та

має перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 10 – «Природничі науки» та спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали»

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та певну практичну значущість роботи вважаю, що дисертаційна робота Куштима Антона Володимировича «Тепловидільні збірки з твелями стрижневого типу на основі діоксиду урану для дослідницької ядерної установки Джерело нейтронів» відповідає вимогам 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам автор, Куштим Антон Володимирович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Рецензент – доктор фізико-математичних наук, професор,  
завідувач кафедри фізики металів та напівпровідників  
Національного технічного університету  
«Харківський Політехнічний Інститут»

Сергій МАЛИХІН



ЗАЙЦЕВ Ю.І.