

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

**ПОНТКОВСЬКИЙ ЮРІЙ ФЕДОРОВИЧ**



УДК 621.039.51

**Відновлення енергорозподілу по об'єму активної зони ВВЕР-  
1000 на основі сигналів детекторів прямого заряду**

01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Каденко Ігор Миколайович**,  
завідувач кафедри ядерної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук,  
**Сахно Віктор Іванович**,  
головний науковий співробітник відділу структури ядра ІЯД НАН України

доктор технічних наук, доцент  
**Маслов Олег Вікторович**,  
завідувач кафедри фізики Навчально-наукового інституту комп'ютерних систем Одеського національного політехнічного університету

Захист відбудеться 17 вересня 2020 р. о 14<sup>45</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.167.01 Інституту ядерних досліджень НАН України за адресою: 03028, м. Київ, проспект Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту ядерних досліджень НАН України, 03028, м. Київ, проспект Науки, 47.

Автореферат розісланий «11» серпня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 26.167.01  
кандидат фізико-математичних наук



Хоменков В.П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На даний час в Україні атомна енергетика є однією з найважливіших складових енергозабезпечення: частка атомних електростанцій (АЕС) у загальному виробництві електроенергії в Україні за 2019 рік склала 53%. У той же час частка гідроелектростанцій від загального виробництва становить 7%, а на теплові електростанції (ТЕС) припадає 36%. При цьому для роботи ТЕС потрібне паливо (вугілля, природний газ, мазут), що в сучасних умовах призводить до збільшення енергозалежності країни від зовнішніх чинників. Тому безпечне та надійне функціонування АЕС є однією з найнеобхідніших умов забезпечення енергонезалежності та стабільності економіки країни.

Сьогодні в Україні знаходяться в експлуатації 4 АЕС, на яких діють 15 енергоблоків з реакторами водо-водяного енергетичного типу (ВВЕР) загальною встановленою потужністю 13835 МВт. Більшість енергоблоків працюють в понадпроектні строки експлуатації (30 років – для ВВЕР-1000 та ВВЕР-440). Для подальшої експлуатації цих блоків потрібне обґрунтування їх безпечної експлуатації в понадпроектні строки та вдосконалення систем моніторингу стану реакторної установки (РУ) з урахуванням накопиченого досвіду для РУ з ВВЕР та на основі розвитку комплексів нейтронно-фізичних розрахунків. Одним з основних критеріїв надійності та економічно обґрунтованої роботи ядерного палива ВВЕР є лінійне енерговиділення (ЛЕВ) твелів. На основі ЛЕВ (Вт/см) визначається об'ємне енерговиділення в паливі та щільність теплового потоку на поверхні твелів. Ці параметри використовуються для встановлення критичного теплового потоку в задачах «запасу до кризи теплообміну», а також при визначенні температури палива та оболонки твелу – важливих критеріїв безпеки.

У зв'язку з впровадженням «нових» видів палива при формуванні паливних завантажень від різних виробників (Westinghouse, АТ ТВЭЛ) та планів роботи ВВЕР-1000 в маневрених режимах, задача відновлення ЛЕВ набуває особливої актуальності. Для запобігання в майбутньому ситуацій щодо виникнення проблем в експлуатації АЕС, в Україні вкрай необхідно є розробка вітчизняного програмного забезпечення для роботи системи внутрішнього реакторного контролю (СВРК), однією з функцій якої є визначення ЛЕВ твелів, що входять до складу тепловидільних збірок (ТВЗ). У СВРК важливим критерієм надійності при відновленні ЛЕВ є відповідність між сигналами детекторів прямого заряду (ДПЗ) та результатами нейтронно-фізичних розрахунків. Тому коректна інтерпретація сигналів ДПЗ є визначальною у визначенні ЛЕВ, а точність цих даних безпосередньо впливає на безпеку використання ядерного палива в РУ.

На даному етапі розвитку систем детектування ядерних випромінювань як для вирішення фундаментальних, так і прикладних задач, в т.ч. з інтенсивним використанням обчислювальних методів і алгоритмів для визначення перехідних функцій від струму ДПЗ до ЛЕВ, стає можливим зменшити похибки та підвищити точність розрахунків ЛЕВ та врахувати залежності перехідних функцій від різних параметрів активної зони (АкЗ), чому і присвячено дану дисертаційну роботу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні наукові дослідження дисертаційної роботи виконано у відповідності з наступними національними та галузевими програмами: «Енергетична стратегія України на

період до 2035 року» та «Комплексна «зведена» програма підвищення безпеки енергоблоків АЕС України» (пп. КзППБ № 13502, 14402).

Результати дисертаційної роботи використано при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи в ІІБ АЕС НАН України: «Розробка методів та засобів контролю коефіцієнтів реактивності ядерного реактора (РК 0112U004544, 2012-2016 рр.)», а також при виконанні договору між ДП «НАЕК «Енергоатом» та Міжнародним Центром ядерної безпеки Київського національного університету імені Тараса Шевченка за № 3407-1/18-НАЕК від 11.10.2013 р. на надання послуг на тему: «Послуги щодо надання професійної та технічної допомоги та консультаційні, не введені в інші угруповання.» (Обґрунтування впровадження палива ТВЗА-12 на енергоблоці № 4 Рівненської АЕС з коригуванням глав ОЗАБ).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є вдосконалення системи детектування потоків нейтронного випромінювання в АкЗ ядерної установки шляхом підвищення точності визначення параметрів енерговиділення на основі сигналів ДПЗ СВРК для забезпечення експлуатації ядерного палива ВВЕР-1000.

Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи було поставлено та вирішено наведені нижче завдання наукового дослідження:

1. аналіз та вибір сучасних розрахункових кодів, що використовуються для нейтронно-фізичних розрахунків АкЗ реакторних установок, в тому числі порівняння результатів розрахунку даних кодів на базі експериментів з «критичними установками»;
2. розробка розрахункових моделей частини АкЗ реактору ВВЕР-1000 для дослідження формування сигналу ДПЗ;
3. дослідження локальної чутливості ДПЗ та впливу параметрів АкЗ на сигнал ДПЗ;
4. розробка розрахункової моделі для уточнення функції вигорання ДПЗ;
5. дослідження ДПЗ альтернативної конструкції;
6. розробка розрахункової моделі АкЗ дослідницького реактора ВВР-М ІЯД НАНУ, з метою визначення оптимального місця розташування збірки експериментальних ДПЗ вітчизняного виробництва в АкЗ дослідницького реактора.

**Об'єкт дослідження:** нейтронно-фізичні процеси в активній зоні ВВЕР-1000.

**Предмет дослідження:** моделі, методи та засоби визначення енерговиділення в активній зоні ВВЕР-1000.

**Методи дослідження:**

- побудова ядерно-фізичної моделі системи детектування нейтронного випромінювання в АкЗ ядерної установки;
- чисельне моделювання та розрахунок нейтронно-фізичних характеристик АкЗ ВВЕР-1000 в кодах MCNP, SERPENT та SCALE;
- ймовірнісні методи визначення параметрів формування сигналів ДПЗ;

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше розроблено розрахункову модель формування сигналу ДПЗ, що дозволяє коректно фіксувати вплив основних параметрів АкЗ (таких як:

температура, концентрація борної кислоти в теплоносії, положення ДПЗ за висотою АкЗ та положення органів регулювання системи управління та захисту (СУЗ)), на значення параметрів сигналу ДПЗ, які використовуються при відновленні ЛЕВ в АкЗ;

- вперше досліджено локальну чутливість ДПЗ до твелів ТВЗ, до якої його встановлено, та до твелів сусідніх ТВЗ, і вперше встановлено залежності значень локальної чутливості ДПЗ від значень параметрів АкЗ;
- вперше побудовано функцію, що враховує вигорання ДПЗ та надає можливість аналізувати ефект нерівномірності вигорання емітера родієвого детектора по радіусу та розташування ДПЗ за висотою АкЗ;
- вперше досліджено процес формування сигналу ДПЗ альтернативної конструкції (з трьома емітерами), що дозволяє знизити собівартість детектора при використанні тієї ж кількості матеріалу емітера, що і в стандартних ДПЗ, або збільшити величину вихідного сигналу детектора;
- виконано дослідження щодо вибору практично ідентичного відносно жорсткості спектру нейтронів за енергією у реакторі типу ВВЕР-1000, місця розташування збірки з ДПЗ вітчизняного виробництва ДП «НАЕК Енергоатом» в АкЗ дослідницького ядерного реактора ВВР-М ІЯД НАНУ, та розраховано прогнозовані параметри вихідного сигналу ДПЗ у даній збірці.

**Обґрунтованість та достовірність** отриманих наукових результатів досягається використанням апробованих методів дослідження; застосуванням дозволених для роботи Державним підприємством «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» та ліцензованих сучасних обчислювальних комп'ютерних кодів; якісним порівнянням результатів, отриманих як при використанні різних розрахункових комп'ютерних кодів, так і іншими авторами.

#### **Практична цінність отриманих результатів:**

- розроблено розрахункові моделі формування сигналу ДПЗ, що надають можливість знизити невизначеність при відновленні ЛЕВ в АкЗ у СВРК, які наразі використовуються на АЕС України з реакторами типу ВВЕР-1000;
- результати використано при розробці прикладного програмного забезпечення модернізованої системи внутрішньореакторного контролю (СВРК-М2);
- результати використовувалися для виконання процедури вибору і обґрунтування відповідного місця розташування збірки ДПЗ в АкЗ дослідницького ядерного реактора ВВР-М.

Практичне використання результатів дисертації підтверджено актами впровадження.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Основні положення та результати дисертаційної роботи автором було отримано самостійно. Автор брав безпосередню участь у проведенні наукових досліджень на всіх етапах виконання дисертаційної роботи, а саме:

- у формуванні мети та постановці завдань наукового дослідження;
- у розробці ядерно-фізичних моделей формування сигналу ДПЗ в АкЗ реактору типу ВВЕР-1000;
- при проведенні аналізу та систематизації результатів досліджень;
- у розробці розрахункових моделей для дослідження явища вигорання ДПЗ;
- у розробці розрахункової моделі АкЗ дослідницького реактора ВВР-М ІЯД НАНУ;
- при визначенні практично ідентичного щодо жорсткості спектру нейтронів за енергією у реакторі типу ВВЕР-1000, місця для опромінення в АкЗ реактору ВВР-М дослідницької збірки з ДПЗ вітчизняного виробництва.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати роботи доповідалися і обговорювалися на наступних конференціях:

- 13-та щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 1-5 лютого 2016 р., ІЯД НАНУ;
- 5-та Міжнародна наукова практична конференція «Безпека та ефективність атомної енергетики, Одеса, 5-9 вересня 2016 р., ОНПУ;
- 14-та щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 10-13 квітня 2017 р., ІЯД НАНУ;
- 15-та щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 16-20 квітня 2018 р., ІЯД НАНУ;
- 6-та Міжнародна наукова практична конференція «Безпека та ефективність атомної енергетики, Одеса, 4-6 вересня 2018 р., ОНПУ;
- 16-та щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 8-12 квітня 2019 р., ІЯД НАНУ.

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 6 статей – у провідних фахових виданнях (2 з яких входять до бази цитування SCOPUS) та 6 – у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та додатків. Робота викладена на 176 сторінках, містить 71 рисунок, 28 таблиць і список використаних джерел, що включає 112 найменування на 11 сторінках, а також Додатки (1 – 5) на 15 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**Вступ** містить обґрунтування актуальності досліджень та вибору теми дисертаційної роботи. Також у вступі сформульовано основну мету, завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, наведено наукову новизну та практичну цінність роботи. У вступі міститься перелік публікацій, виступів на конференціях та семінарах за темою дисертаційного дослідження.

У **першому розділі** зроблено огляд детекторних систем, що використовуються для контролю потужності та відновлення енерговиділення в ядерних реакторах різних типів. Наведено систематизацію детекторів за діапазоном щільності

нейтронного потоку, при якому їх використовують (пуск, проміжний і робочий діапазони), та за місцем їхнього розташування в РУ (в середині корпусу реактора та поза корпусом). Основну увагу приділено пропорційним лічильникам, камерам поділу, аеробольним системам та детекторам прямого заряду. Виділено їхні основні характеристики, переваги та недоліки.

Відзначено, що одним з основних критеріїв надійності та економічно обґрунтованої роботи ВВЕР є ЛЕВ твелів ( $Q, \text{Вт/см}$ ), вираз (1). Значення ЛЕВ визначає також об'ємне енерговиділення в паливі та щільність теплового потоку на поверхні твелів. При відновленні ЛЕВ використовують внутрішньо зонні детектори, а саме, ДПЗ внаслідок їхньої мініатюрності та мінімального спотворення просторового розподілу нейтронного потоку; можливості дискримінації сигналу та високої чутливості до щільності нейтронного потоку.

$$Q = S \cdot M \cdot K_{ad} \cdot f(Y) \cdot J_n, \quad (1)$$

де  $S$  – перехідна функція від струму ДПЗ до ЛЕВ ТВЗ,  $M$  – число твелів у ТВЗ,  $K_{ad}$  – адаптаційний коефіцієнт (значення його є близьким до одиниці),  $f(Y)$  – функція, що враховує вигорання ДПЗ через інтегральний заряд, зібраний на детекторі  $Y$ ,  $J_n$  – корисний струм ДПЗ.

Оскільки ДПЗ з родієвим емітером мають найкращі та збалансовані характеристики щодо чутливості до щільності нейтронного потоку, інерційності сигналу та вигорання матеріалу емітера, їх переважно і використовують на АЕС як у світі, так, зокрема, і в Україні. Тому особливу увагу приділено саме особливостям роботи родієвих ДПЗ, а саме: як відбувається дискримінація гамма складової компоненти з сигналу детекторів, як вдається зробити усунення інерційності сигналу тощо.

Відзначається, що перехідна функція ДПЗ –  $S$  – залежить від низки чинників (характеристики АкЗ, вигорання палива, положення поглинаючих елементів та ін.) і на даний момент при відновленні ЛЕВ на АЕС має наступний вигляд:

$$S = P_1 \cdot (1 + P_2 \cdot W + P_3 \cdot W^2 + P_4 \cdot W^3 + P_5 \cdot W^4 + P_6 \cdot W^5 + P_7 \cdot W^6) \cdot (1 + P_8 \cdot (1 + P_9 \cdot W) \cdot (R - R_0)) \cdot (1 + P_{10} \cdot (1 + P_{11} \cdot W) \cdot (C_B - C_0)) \cdot (1 + P_{12} \cdot (1 + P_{13} \cdot W) \cdot (q/q_0 - 1)) \cdot (1 + P_{14} \cdot (N - 4)) \cdot N_{fuel} \cdot KA \cdot (LE \cdot KC \cdot (1 - \eta \cdot I_{SPND}))^{-1} \cdot TS, \quad (2)$$

де:

- $W$  – вигорання палива в місці розташування ДПЗ ( $\frac{\text{МВт} \cdot \text{доба}}{\text{кг}}$ );
- $R_0, R$  – густина теплоносія у момент початку відліку часу та в даний момент ( $\frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$ );
- $C_0, C_B$  – концентрація бору в теплоносії на початку паливної кампанії та в даний момент часу ( $\frac{\text{г (борної кислоти)}}{\text{кг (теплоносія)}}$ );

- $q_0, q$  – енерговиділення на початку паливної кампанії та в даний момент часу в місці розташування ДПЗ ( $\text{кВт}$ );

- $N$  – номер шару ДПЗ по висоті активної зони: від 1 до 7;
- $KC$  – коефіцієнт навантаження центральних твелів ТВЗ;
- $N_{fuel}$  – кількість твелів у ТВЗ (зазвичай 312);
- $KA$  – коефіцієнт врахування неактивної складової струму ДПЗ;
- $LE$  – довжина емітера ДПЗ ( $\text{см}$ );

- $I_{SPND}$  – сумарний заряд, що був зібраним у ДПЗ ( $\text{Кл}$ );
- $\eta, \beta$  – коефіцієнти, що залежать від початкового збагачення палива ТВЗ, в якій розташовано даний ДПЗ;

- $TS$  – мультиплікативна поправка для розрахунку коефіцієнту чутливості;
- $P_1 - P_{14}$  – коефіцієнти апроксимації.

Проте, коефіцієнти, що входять до перехідної функції (2) визначаються тільки для 6-ти центральних твелів, котрі безпосередньо оточують ДПЗ. Сучасний розвиток обчислювальної техніки та математичних методів дозволяє уточнити перехідну функцію ДПЗ і розраховувати її на основі більшої кількості твелів у ТВЗ, зменшивши систематичну похибку самої перехідної функції.

Завершує розділ постановка задач дослідження.

У **другому розділі** представлено результати валідаційної перевірки модельного підходу для розрахунку параметрів АкЗ ВВЕР-1000 на базі критичних експериментів (установка SF-9), розрахунку критичності для відпрацьованих ТВЗ ВВЕР-1000 у контейнерах для зберігання відпрацьованого ядерного палива та порівняльного аналізу результатів, отриманих у Монте-Карло кодах MCNP, SERPENT та SCALE. Загалом було виконано валідаційну перевірку моделей на 3 тестових задачах.

Одним із основних завдань під час обґрунтування ядерної безпеки систем поводження з ядерним паливом є підтвердження необхідного рівня підкритичності для всіх операцій з ядерним паливом на етапах його доставки та поводження на АЕС, в т.ч. при всіх операціях із відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) як на АЕС, так і у сховищах ВЯП.

Для підтвердження консерватизму прийнятих припущень при проведенні аналізу з ядерної безпеки систем поводження з ВЯП необхідно обґрунтовано підтвердити виконання вимог щодо забезпечення підкритичності в системі поводження з ВЯП за нормальних умов експлуатації, у разі порушення нормальних умов експлуатації та при проектних аваріях. У тому числі це стосується й задачі визначення максимальної похибки розрахунку ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів  $k_{\text{eff}}$  в обраних для аналізу ядерної безпеки розрахункових кодах.

Для розрахунку критичності у наш час використовують спеціалізовані розрахункові коди, яких на сьогодні є чимало. Тому постає питання обґрунтованого вибору таких кодів для проведення надійних розрахунків.

Як першу задачу для валідації моделі та верифікації розрахункових кодів було використано дані експериментів, проведених у національному науковому центрі РФ «Курчатовський інститут» на установці SF-9, що експлуатувалась у 1966–1987 рр. Суть експериментів полягала у визначенні висоти сповільнювача як функції числа



паливних стрижнів – твелів. Паливний стовп мав довжину 1250 мм, а стрижні розташовувались у трикутній решітці з кроком 12,7 мм, що відповідає кроку розташування твелів у ТВЗ ВВЕР-1000. Збагачення за  $^{235}\text{U}$  становило 3,5 % мас. Усього в серії критичних експериментів було досліджено 12 різних конфігурацій. Паливні стрижні розміщуються всередині циліндричного резервуара, виготовленого з нержавіючої сталі (12X18H10T). Резервуар відкрито у верхній частині. Внутрішній діаметр ємності складає 2040 мм, висота 3700 мм, а товщина стінки 4 мм. Резервуар заповнюється водою до критичного рівня  $H_{кр}$  для забезпечення критичності обраного паливного завантаження. Схематично структуру установки SF-9, вид збоку, показано на рис. 1, а вид зверху – на рис. 2.

Відповідно до опису установки в кодах MCNP та SCALE було створено по 12 моделей із різною кількістю паливних стрижнів і різною висотою сповільнювача  $H_{кр}$ .

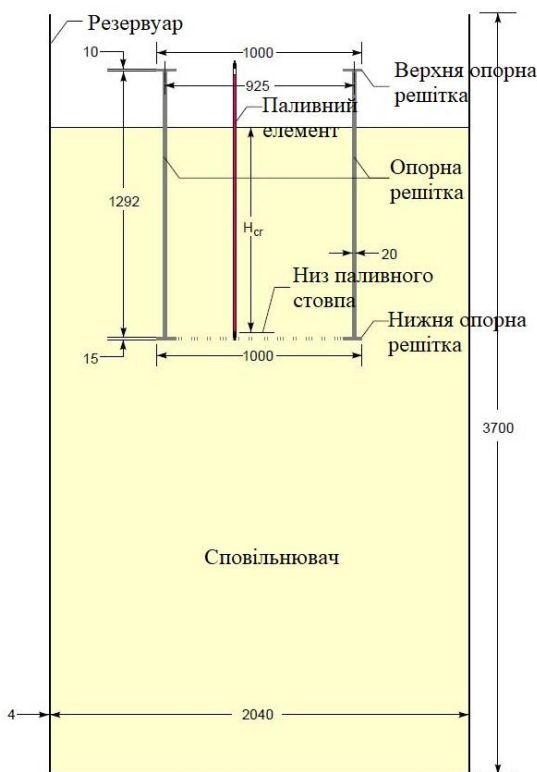


Рис. 1 Вертикальний розріз експериментальної установки SF-9

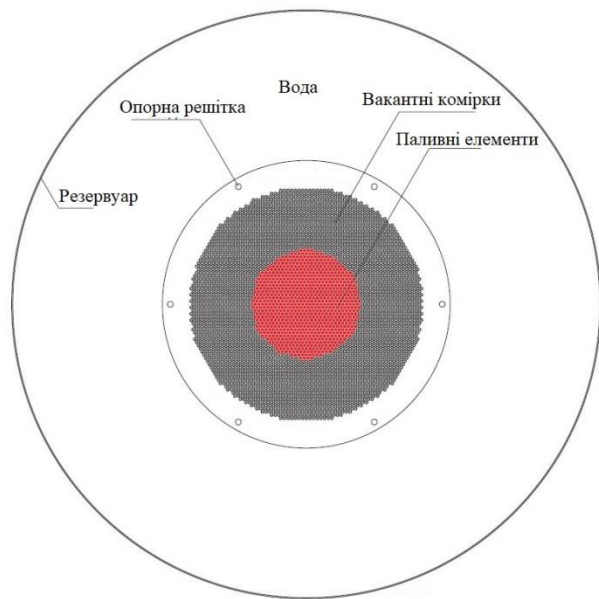


Рис. 2 Горизонтальний розріз експериментальної установки SF-9

Отримані значення розрахунків  $k_{эф}$  у кодах MCNP та SCALE наведено в таблиці 1, де СКВ – середнє квадратичне відхилення розрахункового результату.

Таблиця 1 Розрахункові значення  $k_{эф}$  у кодах SCALE і MCNP та експериментальні значення  $k_{эф}$  для 12 критичних експериментів

№	Кількість твелів	$H_{кр}$ , см	SCALE	СКВ, $\sigma_{SCALE}$	MCNP	СКВ, $\sigma_{MCNP}$	Експеримент
1	1897	30,68	1,01000	0,00100	1,00115	0,00038	1,0024
2	1495	35,31	1,01167	0,00087	1,00203	0,00039	1,0024

№	Кількість твелів	$H_{кр}$ , см	SCALE	СКВ, $\sigma_{SCALE}$	MCNP	СКВ, $\sigma_{MCNP}$	Експеримент
3	1357	37,88	1,01350	0,00110	1,00127	0,00038	1,0024
4	1141	43,81	1,01146	0,00097	1,00257	0,00038	1,0024
5	931	55,15	1,00700	0,00120	1,00135	0,00046	1,0024
6	823	67,23	1,00510	0,00100	1,00089	0,00039	1,0024
7	793	72,52	1,00403	0,00093	1,00096	0,00034	1,0024
8	769	78,03	1,00420	0,00080	1,00015	0,00033	1,0024
9	745	85,66	1,00590	0,00110	1,00051	0,00035	1,0024
10	727	94,00	1,00460	0,00100	1,00116	0,00031	1,0024
11	709	104,6	1,00453	0,00098	1,00226	0,00044	1,0024
12	691	117,89	1,00292	0,00090	1,00048	0,00031	1,0024

Результати проведеного аналізу з визначення похибки  $k_{эф}$  для критичних бенчмарковських експериментів у програмних кодах SCALE і MCNP дозволяють обґрунтовано підтвердити можливість їхнього використання для проведення аналізу з ядерної безпеки систем зберігання ядерного палива реакторів типу ВВЕР-1000. При цьому значення розрахованих  $k_{эф}$  в MCNP коді є ближчими до експериментальних величин. Максимальне значення СКВ визначення  $k_{эф}$  становить для коду SCALE – 0,0012, а для коду MCNP – 0,00046.

Другою задачею валідаційної перевірки було моделювання системи зберігання ядерного палива – багатоцільового контейнера (БЦК), на предмет виконання умов підкритичності для різних консервативних допусків, а також порівняння отриманих результатів з даними виробника БЦК. Для обґрунтування ядерної безпеки обрано найбільш консервативну модель, в якій необхідно довести, що навіть при завантаженні в багатоцільовий контейнер відпрацьованої ТВЗ (ВТВЗ) із найбільш можливими розмножуючими властивостями (прийняте помилкове завантаження свіжих ТВЗ, максимально збагачених за  $^{235}\text{U}$ ), за умов нормальної експлуатації, порушеннях нормальної експлуатації та при проектних аваріях забезпечується критерій не перевищення значення 0,95 ефективним коефіцієнтом розмноження нейтронів  $k_{эф}$ .

Розрахунками було отримано, в межах проектних допусків на розміри паливної таблетки, найбільш консервативні умови по досягненню максимального значення  $k_{эф}$ , що будуть мати місце при максимально допустимому відхиленні внутрішнього діаметра паливної таблетки в більшу сторону, а зовнішнього діаметра паливної таблетки - в меншу сторону. За межами проектних допусків на геометричні розміри паливної таблетки максимальні значення  $k_{эф}$  будуть досягатися при  $D_{внутр} = 1,9$  мм, а  $D_{зовн} = 6,9$  мм.

З огляду на те, що ТВЗ ВВЕР є «недосповільненими», може спостерігатися ефект збільшення розмножувальних властивостей ТВЗ у разі відсутності декількох твелів у складі самої ТВЗ. Результати даного дослідження представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 Вплив на розмножувальні властивості ТВЗ ВВЕР-1000 і БЦК-31 в разі відсутності декількох твелів в ТВЗ

Конфігурація ТВЗ		$k_{\text{эф.}}$ одна ТВЗ	$k_{\text{эф.}}$ 31 ТВЗ в БЦК
Проектна		$0,7477 \pm 0,0021$	$0,9141 \pm 0,0019$
Ряд 1	Без 1	$0,7497 \pm 0,0019$	-
	Без 3	$0,7515 \pm 0,0022$	$0,9161 \pm 0,0019$
Ряд 4	Без 3	$0,7544 \pm 0,0019$	$0,9195 \pm 0,0017$
	Без 6	$0,7552 \pm 0,0023$	-
Ряд 8	Без 3	$0,7514 \pm 0,0018$	-
	Без 6	$0,7521 \pm 0,0017$	-
Ряд 4, Ряд 8	Без 3 + 6	$0,7553 \pm 0,0017$	$0,9208 \pm 0,0019$

Отримані результати для БЦК вказують на те, що при обґрунтуванні ядерної безпеки для випадків зберігання в БЦК пошкоджених ВТВЗ з геометричними параметрами ВТВЗ, що перевищують розглянуті межі проектних значень, в основному, за рахунок збільшення кроку розташування твелів, у випадках пошкодження чи зміщення дистанціюючих решіток ТВЗ можуть вимагати додаткові проектні рішення, такі як: збільшення концентрації поглинача в матеріалі Metamic-NT, застосування неповного завантаження БЦК, використання кредиту вигорання тощо.

Також наведено результати валідаційної перевірки в кодах MCNP та SERPENT розрахункової моделі формування сигналу ДПЗ. У цих кодах було розроблено моделі, що представляють собою сім ТВЗ ВВЕР-1000, що знаходяться в теплоносії, параметри якого змінювалися для різних розрахункових станів (температура та концентрація борної кислоти). Метою розрахунків на даних моделях є дослідження впливу параметрів теплоносія на процес активації родієвого емітера під впливом нейтронного потоку.

Результати розрахунків наведено в таблиці 3, де вказано відносний внесок до сигналу ДПЗ від ТВЗ, до якої встановлено ДПЗ, а також від сусідніх ТВЗ.

Таблиця 3 Порівняння результатів внеску (%) від ТВЗ до сигналу ДПЗ в кодах MCNP та SERPENT. T (°C) – температура теплоносія, C (г/кг) – концентрація борної кислоти в теплоносії

ТВЗ	Параметри теплоносія				
	T = 290 C = 0	T = 290 C = 5	T = 320 C = 0	T = 320 C = 5	
Центральна ТВЗ	$69,1 \pm 0,8$	$72,0 \pm 0,8$	$67,9 \pm 0,9$	$69,2 \pm 0,9$	SERPENT
Сусідні ТВЗ	$30,1 \pm 0,8$	$28,0 \pm 0,8$	$32,1 \pm 0,9$	$30,8 \pm 0,9$	

ТВЗ	Параметри теплоносія				MCNP
	T = 290 C = 0	T = 290 C = 5	T = 320 C = 0	T = 320 C = 5	
Центральна ТВЗ	68,6 ± 0,5	70,1 ± 0,5	66,5 ± 0,5	67,9 ± 0,5	
Сусідні ТВЗ	31,4 ± 0,5	29,9 ± 0,5	33,5 ± 0,5	32,1 ± 0,5	

Аналіз результатів показав, що розрахункова модель є коректною, дозволяє відслідковувати зміни параметрів теплоносія, а також те, що сигнал ДПЗ, в основному, формується ТВЗ, до якої його встановлено (~70%).

**Розділ 3** присвячено аналізу роботи СВРК, її функціям, а особливо, функції відновлення ЛЕВ на базі сигналів ДПЗ. Представлено розрахункову модель, що дозволяє досліджувати формування сигналу ДПЗ та вплив різних чинників, зокрема, положення органів регулювання, концентрації борної кислоти в сповільнювачі та температури теплоносія.

Визначено зону чутливості ДПЗ до нейтронів, що генеруються в оточуючих твелах. По висоті ТВЗ було умовно розділено на 5 зон по 250 мм (висота емітера ДПЗ) для визначення диференціального внеску до сигналу ДПЗ від кожної зони. Нумерація зон була наступною: 0 – зона навпроти ДПЗ; -1 та 1 – зони знизу та зверху ДПЗ; -2 та 2 – зони знизу та зверху ДПЗ на відстані 500 мм. Відзначено, що основний внесок буде зумовлено зоною – 0 (~78%). Відносний внесок даних зон до сигналу представлено в таблиці 4 для різних параметрів теплоносія. Як видно з таблиці 4, для дослідження формування сигналу ДПЗ достатньо обмежитися частиною ТВЗ з висотою 750 мм.

Проведений аналіз чутливості моделі формування струму ДПЗ по відношенню до досліджуваних факторів впливу, а саме концентрації борної кислоти в теплоносії та температури теплоносія, показав, що модель дозволяє надійно «фіксувати» вплив на струм ДПЗ зміни температури теплоносія на ~1 °С, а концентрації борної кислоти – на 0,1 г/кг. Таким чином, один із найважливіших висновків аналізу результатів моделювання є таким: геометричний і спектральний чинники залежать від місця розташування ДПЗ у каналі нейтронних вимірювань (КНВ) (верх, низ).

Таблиця 4 Внесок (%) зон ТВЗ до сигналу ДПЗ

Температура теплоносія, °С	Концентрація борної кислоти, г/кг	Зона 0	Зона (-1 + 1)	Зона (-2 + 2)
290	0	77,81	21,91	0,28
290	5	78,70	21,03	0,26
320	0	77,04	22,63	0,33
320	5	77,83	21,86	0,31

Також визначено по-твельний внесок до сигналу ДПЗ для різних температур теплоносія та концентрацій борної кислоти в ньому. На рис. 3 та 4 показано

відносний внесок до сигналу ДПЗ кожного твелу з 60° сектору симетрії ТВЗ, в якій розміщується детектор (ряд, в якому 1 твел – є центральним біля ДПЗ, а в якому 10 твелів – є периферійним).

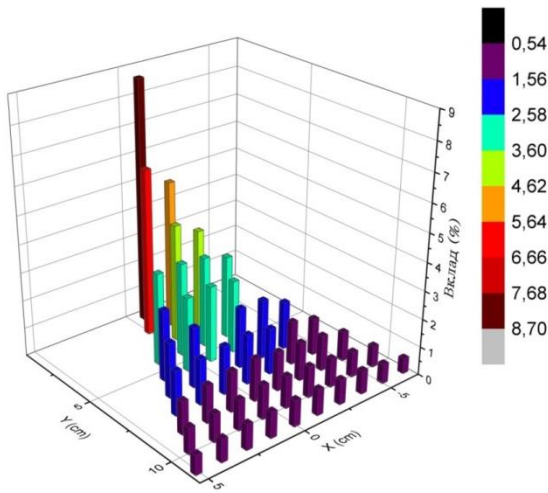


Рис. 3. Внесок до сигналу ДПЗ від твелів ТВЗ-1 для стану: температура теплоносія 290 °С, концентрація борної кислоти 0 г/кг.

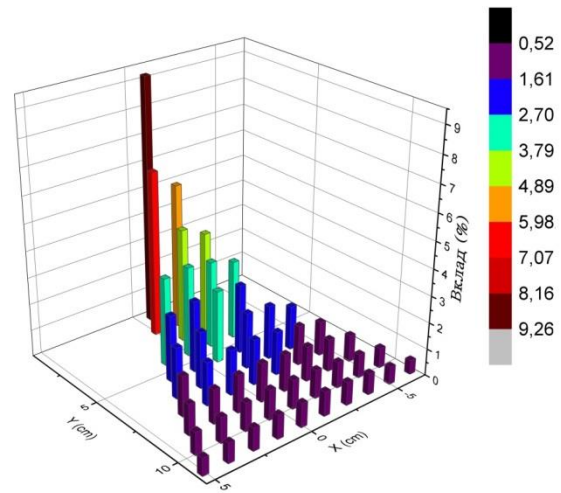


Рис. 4. Внесок до сигналу ДПЗ від твелів ТВЗ-1 для стану: температура теплоносія 290 °С, концентрація борної кислоти 5 г/кг.

Основний внесок у сигнал зумовлюватимуть твели з перших 6-ти рядів (108 од.): так, для температури 290 °С і концентрацій борної кислоти 0 і 5 г/кг він становитиме  $61,14 \pm 0,02$  % та  $62,30 \pm 0,05$  %, відповідно, а для тих же концентрацій, але температури теплоносія 320 °С, матимемо  $60,18 \pm 0,03$  % та  $61,32 \pm 0,02$  %. Від сусідніх ТВЗ відносний внесок до сигналу не буде більшим 33% у залежності від параметрів теплоносія, при цьому основний внесок із сусідніх ТВЗ зумовлено найближчими 10 рядами твелів, від інших рядів внесок не перевищуватиме 4%. Результати вказують на те, що при відновленні ЛЕВ потрібно і можливо враховувати не тільки ряд твелів, що оточують КНВ (6 од. навколо центрального каналу), але й інші сусідні твели.

Окрім зміни параметрів теплоносія нами враховано також вплив положення органів регулювання на формування сигналу ДПЗ. Продемонстровано, що наявність поглинаючих елементів (органів регулювання СУЗ) у ТВЗ, у порівнянні зі зміною параметрів теплоносія, вносить суттєвий внесок у формування сигналу ДПЗ. Так, внесок від сусідньої ТВЗ дорівнює  $2,6 \pm 0,3$  %, а при наявності борної кислоти він падає до  $1,9 \pm 0,4$  %. Проте, якщо взяти до уваги абсолютні величини, то швидкість реакції радіаційного поглинання в одному см<sup>3</sup> родієвого емітера при введенні до теплоносія борної кислоти (концентрація 5 г/кг) падає на 30%, а при введенні поглинаючих елементів до сусідніх ТВЗ швидкість реакції падає на 4%. Це пов'язано з тим, що наявність борної кислоти у теплоносії напряму впливає і на центральну ТВЗ. Отримані значення демонструють, що дані фактори необхідно враховувати при відновленні ЛЕВ, а використання коду MCNP дозволяє це зробити з високою точністю.

В розділі 4 висвітлено проблему врахування вигорання емітера ДПЗ при відновленні ЛЕВ в АкЗ. Розроблено розрахункову модель, що дозволяє визначати

вигорання емітера в залежності від його місця розташування в АкЗ ядерного реактора.

Для визначення нерівномірності вигорання ядер родію по глибині емітер ДПЗ було рівномірно розділено на 10 шарів по радіусу. В кожному шарі емітера визначалась  $k_1$  – кількість реакцій радіаційного поглинання за одиницю часу (швидкість реакції) та розраховувалась ймовірність досягнення колектору електронами, що виникають при бета розпаді ядер  $^{104}\text{Rh}$ , від кожного шару. Для кожного шару емітера отримано частку електронів –  $k_2$ , що попадають на колектор ДПЗ при вильоті одного електрона, усередненого по спектру і області, з якої вилітають електрони (табл. 5).

Таблиця 5 Значення  $k_2$  в залежності від номера шару емітера

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k_2$	0,0081	0,0243	0,0403	0,0577	0,0754	0,0944	0,1175	0,1441	0,1783	0,2599

Отримані значення дозволяють більш точно врахувати вигорання ДПЗ протягом паливної компанії. На рис. 5 представлено дані залежності вигорання емітера (інтегрально) від величини згенерованого ним заряду, отримані за нашою моделлю, і по моделям Цимбалова та Курченкова, що використовуються на даний момент при відновленні ЛЕВ у СВРК для врахування вигорання емітера.

На рис. 6 показано вигорання кожного шару емітера в залежності від величини заряду, що було знято з детектора. Як видно, периферійні шари вигорають набагато швидше за центральні, а, оскільки ефективність у формуванні сигналу центральних шарів є меншою від периферійних, це призводитиме до нелінійного зниження сигналу ДПЗ з часом.

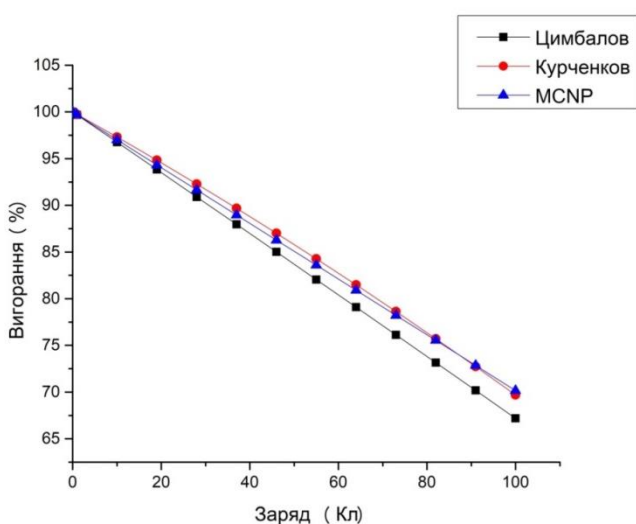


Рис. 5. Залежність вигорання емітера ДПЗ від величини згенерованого ним заряду по новій моделі та за моделями Цимбалова і Курченкова.

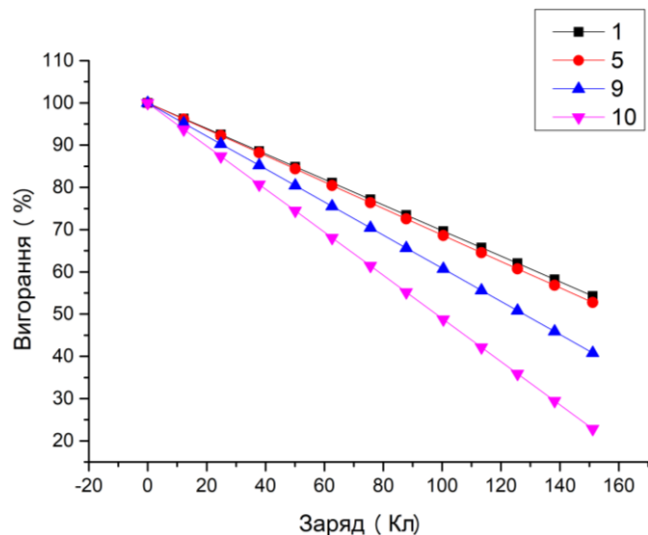


Рис. 6. Залежність вигорання кожного шару емітера ДПЗ від величини згенерованого ним заряду для номера шару (1-10).

Також нами було розраховано величину струму ДПЗ, що буде сформованим кожним шаром емітера в залежності від параметрів теплоносія, в якому працює детектор. У табл. 6 наведено значення заряду (Кл), що був згенерованим кожним шаром емітера при роботі реактора типу ВВЕР-1000 на повній потужності протягом 4 паливних кампаній (1200 ефективних діб).

Таблиця 6 Заряд (Кл), згенерований емітером ДПЗ у залежності від його місця розташування в КНВ

Т, °С	Еф. діб							
	0	100	300	500	700	900	1100	1200
290	0,0	11,9	36,9	61,1	85,8	110,8	135,0	147,8
305	0,0	12,1	37,5	62,0	87,0	112,4	136,9	149,8
320	0,0	12,3	37,8	62,6	87,9	113,4	138,2	151,2

Як видно, для трьох ДПЗ (нижнього, середнього та верхнього по місцю розташування за висотою АкЗ) через 300 діб роботи реактора на потужності величини вигорання будуть відрізнятися на ~1 %, а під кінець кампанії реактора - вже на ~5 %. Врахування даного фактору дозволить знизити невизначеність при відновленні ЛЕВ на противагу методам, що використовуються у поточних алгоритмах СВРК на АЕС України.

Відмічено, що при великих величинах заряду, згенерованого емітером ДПЗ, відмінності в значеннях вигорання емітера для різних моделей становлять більше 5 %, що істотно позначиться на точності відновлення полів енерговиділення в СВРК. Розрахункова модель в MCNP дозволяє врахувати індивідуальні поправки на вигорання для кожного ДПЗ, що на даний момент взагалі не здійснюється в СВРК.

Також запропоновано ДПЗ «альтернативної» конструкції, що дозволяє зменшити собівартість детектора без зменшення, або навіть покращення його чутливості до детектування нейтронів. Даний ДПЗ пропонується у складі з 3-х окремих емітерів меншого діаметру в порівнянні з діаметром 0,048 см стандартного емітера серійного ДПЗ-1М. Емітери розташовано в кутах рівностороннього трикутника, а відстань між центрами емітерів складає 0,0433 см. Простір до внутрішньої оболонки сталевого колектора радіусом 0,05 см заповнено ізолятором  $Al_2O_3$ , зовнішній радіус колектора складає 0,065 см, висота детектора 250 мм, що є аналогічними стандартному ДПЗ-1М. Інтегральна ефективність моделі ДПЗ з 3-ма емітерами є більшою, ніж у моделі ДПЗ з одним емітером, на величину ~ 22 %. Маса родію в моделі ДПЗ з 3-ма емітерами дорівнює масі родію в стандартному ДПЗ з одним емітером. Таким чином, може бути запропонованою більш ефективна за чутливістю до нейтронів конструкція ДПЗ, у складі якої, до того ж, може використовуватися менша кількість родію.

У **п'ятому розділі** представлено результати розрахунків параметрів нейтронного поля в дослідницькому каналі, що виготовлено для виконання випробувань ДПЗ (вітчизняного виробництва) з метою вдосконалення його конструкції, в АкЗ дослідницького реактора ВВР-М ІЯД НАН України.



У ВВР-М можливими є два місця розташування збірки з 5-ми ДПЗ – по центру Ак3 (біля органів управління дослідницьким реактором) та в каналі, що оточений берилієвими витискувачами. Для визначення, в якому з цих каналів умови опромінення будуть майже ідентичними до Ак3 ВВЕР-1000, було розроблену чисельну модель Ак3 дослідницького реактора ВВР-М у кодї MCNP, включно з каналом в центрі Ак3 (канал 1 ) та каналом за шаром берилієвих витискувачів (канал 2).

Було встановлено розподіл щільності потоку нейтронів по висоті вимірювальних каналів (рис. 7) та енергетичний спектр нейтронів (рис. 8), де червона крива відповідає 2-му, а чорна – 1-му каналу. По вертикальним осям відкладено відносну щільність потоку нейтронів.

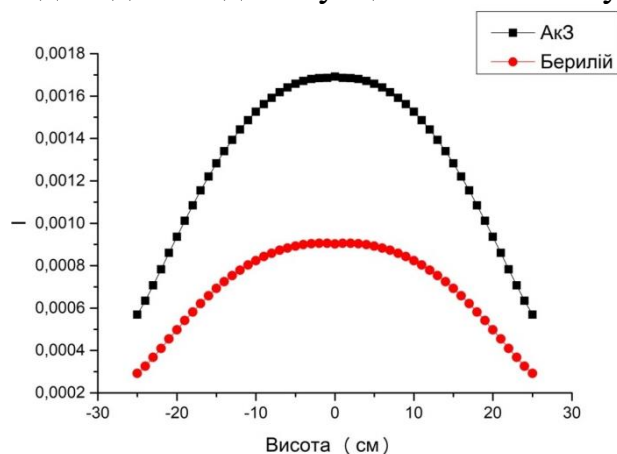


Рис. 7. Залежність щільності потоку нейтронів по висоті вимірювальних каналів

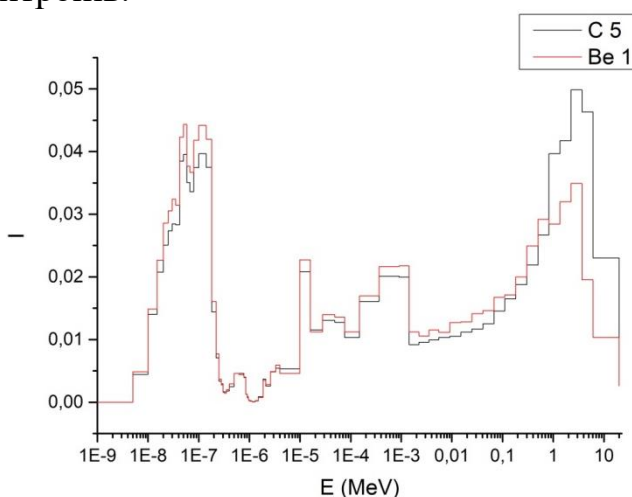


Рис. 8. Енергетичний спектр нейтронів у вимірювальних каналах ВВР-М

З рис. 8 видно, що у каналі 2 щільність потоку нейтронів у тепловому діапазоні енергії буде вищим, ніж у каналі 1, де максимум інтенсивності щільності потоку нейтронів досягається в області швидких нейтронів. Відповідно, жорсткість спектру в каналі 1 буде вищою (0,284) у порівнянні з каналом 2 (0,161), тобто спектр нейтронів у каналі, що знаходиться за берилієвими витискувачами, є м'якшим. Саме тому для проведення експерименту було рекомендовано використовувати канал 2 для опромінення ДПЗ, оскільки характеристики нейтронного поля в ньому є близькими до умов Ак3 ВВЕР-1000.

Також було розраховано значення сигналу, який має генеруватися в кожному з 5-ти ДПЗ у збірці ДПЗ для обох каналів при роботі ВВР-М на потужності 4 МВт, та проведено порівняння з експериментальними даними для збірки з 3-ох ДПЗ (табл.7).

Таблиця 7 Вихідний сигнал ДПЗ у ВВР-М, при роботі реактора на потужності 4 МВт

№ каналу	№ ДПЗ	Сигнал ДПЗ (експеримент), А	Сигнал ДПЗ (MCNP), А	Відносна похибка, %
1-й	1	-	$0,58 \times 10^{-6}$	0,08
	2	-	$0,58 \times 10^{-6}$	0,08



№ каналу	№ ДПЗ	Сигнал ДПЗ (експеримент), А	Сигнал ДПЗ (MCNP), А	Відносна похибка, %
	3	-	$0,58 \times 10^{-6}$	0,08
	4	-	$0,58 \times 10^{-6}$	0,08
	5	-	$0,58 \times 10^{-6}$	0,08
2-й	1	$1,32 \times 10^{-6}$	$0,97 \times 10^{-6}$	0,1
	2	-	$0,96 \times 10^{-6}$	0,1
	3	-	$0,98 \times 10^{-6}$	0,1
	4	$1,27 \times 10^{-6}$	$0,99 \times 10^{-6}$	0,1
	5	$1,32 \times 10^{-6}$	$0,97 \times 10^{-6}$	0,1

З аналізу даних табл. 7 випливає, що за величиною сигнали ДПЗ, що знаходяться в каналі 2 (в оточенні берилієвих витискувачів) є більшими, аніж в каналі 1, що, з першого погляду, може здаватися дивним, оскільки щільність потоку нейтронів у каналі 1 є вищою, ніж у каналі 2. Проте при проведенні розрахунку величини сигналу ДПЗ враховується спектральна залежність перерізу поглинання нейтронів на ядрах емітера ( $^{103}\text{Rh}$ ), то ж з її врахуванням стає зрозумілим, що сигнал ДПЗ у каналі 2 є більшим, тому що до даного каналу нейтрони потрапляють у спектрі з максимальними значеннями у епітепловому та тепловому діапазонах енергії. В той же час переріз поглинання нейтронів  $^{103}\text{Rh}$  в епітепловій області має резонанс (при енергії – 1,257 еВ) і в тепловій області переріз зростає за порядком величини до сотень барн (а для швидких нейтронів – лише до одиниць мб).

Як також видно з табл.7, результати, отримані експериментально, та розраховані в MCNP, узгоджуються між собою, особливо в тому, що сигнал у ДПЗ дослідницької збірки є практично однаковим для кожного детектора (різниця в сигналах експериментальних значень не перевищує 4 %). Невелика розбіжність в амплітуді сигналу між експериментальними даними та розрахованими величинами зумовлена тим, що в чисельних розрахунках не враховано вигорання палива, яке знаходиться в АкЗ ВВР-М (при проведенні експерименту використовували не «свіжі» паливні елементи, в той час у проведеному розрахунку всі паливні елементи були «свіжими», тож щільність потоку нейтронів в експерименті була більшою, ніж за результатами розрахунку при встановленій потужності). Також в експерименті використовувалися ДПЗ з іншим типом ізолятора між колектором та емітером (в чисельній моделі ізолятором слугував оксид алюмінію, в експерименті – оксид кремнію, а дані типи ізоляторів мають різну електронну густину та, відповідно, різні ймовірності досягнення електронами колектора).

## ВИСНОВКИ:

- Проаналізовано загальноприйняті підходи, що застосовуються при відновленні ЛЕВ у ВВЕР-1000 на основі сигналів ДПЗ, та особливості роботи детекторів контролю нейтронного потоку різної конструкції. На підставі проведеного

аналізу розроблено розрахункові модель і засоби аналізу формування сигналу детектора прямого заряду в АкЗ реактора ВВЕР-1000 в кодах MCNP та SERPENT, що дозволяє враховувати положення ДПЗ в АкЗ та розраховувати для кожного детектора індивідуальні перехідні функції від струму ДПЗ до лінійного енерговиділення ТВЗ.

- Проведено валідацію моделі для розрахунку параметрів АкЗ ВВЕР-1000 на базі критичних експериментів та шляхом порівняння результатів розрахунків у кодах MCNP та SERPENT, що показали коректність моделі та підтвердили точність розрахунків.
- Досліджено вплив на формування сигналу ДПЗ температури теплоносія, концентрації борної кислоти в ньому та положення органів регулювання СУЗ. Результати дозволяють підвищити точність визначення геометричного та спектрального факторів, що суттєво впливають на точність відновлення ЛЕВ у ТВЗ. Врахування місцеположення ДПЗ в КНВ дозволить зменшити похибку визначення ЛЕВ на 2-3 %.
- Вперше визначено залежність глибини вигорання емітера по його внутрішнім шарам від спектральних характеристик нейтронного поля.
- Для отримання більш точних результатів у задачі відновлення лінійного енерговиділення у СВРК необхідно враховувати індивідуальні параметри вигорання для кожного ДПЗ. Врахування вигорання (по шарам ДПЗ) дозволяє зменшити похибку у визначенні величини струму ДПЗ з 5-7 % до 2-3 % при вигоранні емітера до ~30 %.
- Запропоновано ДПЗ «альтернативної» конструкції. Дослідження на моделі ДПЗ «альтернативної» конструкції показує принципово нову можливість розробки більш чутливих до нейтронного потоку ДПЗ при зниженні кількості матеріалу ДПЗ - родію. Очікується підвищення чутливості до нейтронного потоку "нової моделі" ДПЗ з трьома емітерами на 22 %.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**1. Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації**

1. Борисенко В.И., **Пионтковский Ю.Ф.**, Горанчук В.В. Модель формування сигналу внутризонного детектора нейтронів // Ядерна фізика та енергетика. 2016. Т. 17. №. 4. С. 364–373.

*Здобувачу особисто належить аналіз технічної документації, підготовка даних, аналіз отриманих результатів.*

2. Борисенко В.И., Горанчук В.В., **Пионтковский Ю.Ф.**, Сапон Н.Н. Выбор консервативных допущений при обосновании ядерной безопасности систем хранения отработанного ядерного топлива // Ядерна та радіаційна безпека. 2017. №2 (74). С. 69–73.

*Здобувачу особисто належить постановка задачі, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.*

3. Борисенко В.И., Горанчук В.В., **Пионтковский Ю.Ф.** Визначення консервативних припущень при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання ВТВЗ ВВЕР-440 // Науково-виробничий журнал «Ядерна енергетика та довкілля» № 1 (9). 2017. С. 13–17.

*Здобувачу особисто належить проведення розрахунків, аналіз результатів.*

4. Борисенко В.И., **Пионтковский Ю.Ф.**, Горанчук В.В. Исследование моделей родиевого эмиттера детектора прямого заряда // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, вип. 28, науково-технічний збірник, м.Чорнобиль. 2017. С. 25–33.

*Здобувачу особисто належить аналіз технічної документації, підготовка даних, аналіз отриманих результатів.*

5. Борисенко В.И., **Пионтковский Ю.Ф.**, Порівняльний аналіз результатів числового моделювання в Монте-Карло кодах формування сигналу ДПЗ у ВВЕР-1000 // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, вип.31. С. 41–17.

*Здобувачу особисто належить розробка моделі, проведення розрахунків, аналіз результатів.*

6. Борисенко В.И., Горанчук В.В., **Пионтковский Ю.Ф.**, Тітімець І.О., Результати валідації розрахункових кодів SCALE і MCNP на даних критичних бенчмарк-експериментів на установці SF-9 // Науково-виробничий журнал «Ядерна енергетика та довкілля» № 1 (13). 2019. С. 18–22.

*Здобувачу особисто належить розробка моделі, проведення розрахунків, аналіз результатів.*

## 2. Опубліковані праці апробаційного характеру

7. **Піонтковський Ю.Ф.**, Борисенко В.І. Вплив параметрів активної зони ВВЕР-1000 на формування сигналу ДПЗ // Тези доповідей. XXIII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 01–05 лютого 2016. С. 104–105.  
*Здобувачу особисто належить розробка моделі, проведення розрахунків, аналіз результатів.*
8. **Піонтковський Ю.Ф.**, Борисенко В.І., Врахування вигорання ДПЗ в задачі відновлення енергорозподілу по активній зоні ВВЕР-1000 // Збірник доповідей. П'ята міжнародна науково-практична конференція «Безпека та ефективність атомної енергетики». Одеса, Україна. 5–9 вересня 2016. С. 121-125.  
*Здобувачу особисто належить розробка моделі, проведення розрахунків, аналіз результатів.*
9. **Піонтковський Ю.Ф.**, Борисенко В.І. Модель вигорання ДПЗ в задачі відновлення енергорозподілу по активній зоні ВВЕР-1000 // Тези доповідей. XXIV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 10–13 квітня 2017. С. 124–125.  
*Здобувачу особисто належить розробка моделі, проведення розрахунків, аналіз результатів.*
10. Борисенко В.І., **Горанчук В.В.**, Піонтковський Ю.Ф., Сапон М.М. Аналіз ядерної безпеки систем зберігання відпрацьованого ядерного палива ВВЕР // Тези доповідей. XXIV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 10–13 квітня 2017. С. 112–113.  
*Здобувачу особисто належить проведення розрахунків, аналіз результатів.*
11. **Піонтковський Ю.Ф.**, Борисенко В.І. Порівняння результатів формування сигналу ДПЗ у кодах SERPENT та MCNP. // Тези доповідей. XXV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 16–20 квітня 2018. С. 105–106.  
*Здобувачу особисто належить розробка моделі, проведення розрахунків, аналіз результатів.*
12. **Піонтковський Ю.Ф.**, Борисенко В.І. Дослідження параметрів нейтронного поля в дослідницькому каналі ВВР-М // Тези доповідей. XXVI щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 8 – 12 квітня 2019 р. С. 86-87.  
*Здобувачу особисто належить розробка моделі, проведення розрахунків, аналіз результатів.*

## АНОТАЦІЯ

*Піонтковський Ю.Ф.* Відновлення енергорозподілу по об'єму активної зони ВВЕР-1000 на основі сигналів детекторів прямого заряду. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.16 «фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій». Робота виконана на кафедрі ядерної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Захист відбудеться у спеціалізованій вченій раді ІЯД НАН України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання: підвищенню безпеки експлуатації ядерного палива у ВВЕР-1000 шляхом поліпшення точності визначення параметрів енерговиділення по об'єму активної зони на основі сигналів детекторів прямого заряду, що входять до складу системи внутрішньо реакторного контролю (СВРК).

У роботі проведено систематизацію та аналіз роботи систем і детекторів, що використовуються на АЕС для відновлення енерговиділення в АкЗ, розглянуто особливості їх роботи, основні переваги та недоліки. Основну увагу було приділено ДПЗ, що використовуються в СВРК на АЕС України. На основі даного аналізу виконано розробку чисельних моделей і засобів, що дозволяють підвищити точність перехідної функції від струму ДПЗ до лінійного енерговиділення ТВЗ.

Розраховано локальну чутливість родієвих ДПЗ в АкЗ ВВЕР-1000, також визначено внесок до сигналу ДПЗ від твелів сусідніх ТВЗ та внесок від твелів ТВЗ, до якої його встановлено. Показано, що розроблена модель дозволяє враховувати при відновленні ЛЕВ більшу кількість твелів для розрахунку перехідної функції на противагу тим методам, що зараз використовуються на АЕС.

Проведено розрахунки для визначення впливу параметрів АкЗ (температура теплоносія, концентрація борної кислоти в теплоносії та положення поглинаючих елементів) на формування сигналу ДПЗ.

Розв'язано задачу врахування вигорання ДПЗ під час відновлення ЛЕВ з урахуванням нерівномірності вигорання ДПЗ по радіусу родієвого емітера, самоекранування внутрішніх шарів та характеристик нейтронного поля, в якому працює детектор. Показано, що для підвищення точності ЛЕВ потрібно розраховувати індивідуальні функції вигорання для кожного ДПЗ, що залежать від місця розташування детекторів по об'єму АкЗ.

Проведено валідаційну перевірку розрахункових моделей. Усі розроблені моделі є прийнятними для їх застосування при вирішенні розглянутих задач.

Представлено модель АкЗ дослідницького реактору ВВР-М ІЯД НАН України для дослідження характеристик нейтронного поля і визначення найоптимальніших умов опромінення тестової збірки з ДПЗ вітчизняного виробництва. Визначено оптимальне місце в АкЗ дослідницького реактора ВВР-М для роботи тестової збірки ДПЗ і розраховано вихідний сигнал даних детекторів, проведено порівняння з експериментальними величинами.

**Ключові слова:** детектор прямого заряду, лінійне енерговиділення, система внутрішньо реакторного контролю, перехідна функція ДПЗ, тепловидільна збірка, вигорання, щільність потоку нейтронів.

#### ABSTRACT

*Piontkovskyi Yu.F.* Unfolding of energy distribution in VVER-1000 reactor core based on the signals from self-powered neutron in-core monitors. – Qualification scientific manuscript.

Thesis for candidate (Philosophy doctor) degree (technical sciences) by specialty 01.04.16 – Nuclear, Particle and High Energy Physics. This work has been accomplished at Department of Nuclear Physics, Faculty of Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv. The defense will take place at Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

This thesis is dedicated to solving an actual scientific-technical task: enhancement of an operational safety of nuclear fuel at VVER-1000 nuclear power reactor by means of lowering the uncertainties of power distribution parameters within the reactor core based on the signals from self-powered neutron detectors, being installed under the in-core instrumentation system (ICIS).

The systematization and analysis were performed of systems and detectors that are being used at NPPs worldwide to unfolding the power distribution in a reactor core. Their operational features, main advantages and drawbacks are considered. Major attention was paid to self-powered rhodium neutron detectors that are currently installed at Ukrainian NPPs under ICIS. Based on the results of analysis conducted, the development of numerical models and means was accomplished to enhance a precision of the transition function from in-core self-powered neutron detector current to the linear heat rate of a fuel assembly.

The local sensitivity of rhodium in-core self-powered neutron detectors to neutron flux in VVER-1000 reactor core was computed. Also a contribution into rhodium detector signals from neighboring fuel assemblies as well as a contribution from fuel rods of a fuel assembly with installed rhodium detector and neighboring fuel rods are determined. It was shown that the numerical model of the core developed for unfolding of the linear heat rate does allow to take into account greater amount of fuel pins for computation of the transition function contrary to other methods that are being used at Ukrainian NPPs nowadays.

The calculations were done to determine the influence of reactor core parameters (coolant temperature, boric acid concentration and positions of neutron adsorption elements of control rods) at signal parameters formation from the rhodium self-powered neutron detector.

The task for accounting of rhodium detectors burnup was solved for linear heat rate unfolding, taking into account non-uniform rhodium material burnup across the radius of rhodium detector emitter, self-screening of rhodium material internal layers and parameters of the neutron field, in which the rhodium detectors operate. It is presented that for linear heat rate precision enhancement it is necessary to compute the individual burnup functions for each rhodium detector depending on its location in the reactor core volume.

The validation checkout of calculational models was accomplished. All the models developed are recognized as acceptable ones for their application in solving all scientific and technical tasks under this research.

The reactor core model of the research reactor VVR-M at Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine was developed and presented. This model is dedicated to investigate reactor core neutron field parameters and to determine the most optimal conditions for irradiation of the test assembly with the rhodium self-powered neutron detectors of domestic production. The in-core optimal location to install and operate the test assembly with the rhodium self-powered neutron detectors is suggested and justified. The output signal from this assembly was calculated and compared with experimental values.

**Key words:** self-powered rhodium neutron detector; linear heat rate; in-core instrumentation system; transition function of self-powered rhodium neutron detector; fuel assembly; burnup; neutron flux density.