

**УРАХУВАННЯ ВИГОРЯННЯ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ПРИ ОБҐРУНТУВАННІ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА РВПК-1000**

© 2010 В. В. Гальченко<sup>1</sup>, В. І. Макодим<sup>1</sup>, В. В. Соловйов<sup>1</sup>, В. В. Ількович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «КПІ», Київ

<sup>2</sup>Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Проведено аналіз урахування вигорання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) для обґрунтування ядерної безпеки транспортного контейнера ТК-8 та сховища відпрацьованого ядерного палива басейнового типу СВЯП-1 з паливом РВПК-1000 з урахуванням 100-річного терміну зберігання ВЯП. При розрахунках цих критичних систем урахувалися лише актиноїди. Було проаналізовано два підходи до врахування вигорання, в яких розглядалася система без урахування розподілу ізотопів по висоті тепловиділяючої збірки (ТВЗ) та з урахуванням. Розрахунки проводилися з використанням комп'ютерних кодів SCALE і MCNP. Показано, що врахування вигорання суттєво збільшує запас підкритичності, а розрахунки необхідно виконувати з урахуванням розподілу ізотопів по висоті ТВЗ.

*Ключові слова:* відпрацьоване ядерне паливо, сховище відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1, транспортний контейнер ТК-8, підхід «Burnup credit».

**Вступ**

При аналізі ядерної безпеки систем зберігання та транспортування ВЯП існуючі нормативні документи вимагають проведення розрахунків з обґрунтування підкритичності таких систем [1, 2]. ВЯП повинно розглядатися як свіже, якщо коефіцієнт розмноження нейтронів ( $k_{\text{eff}}$ ) при вигоранні зменшується, за винятком тих випадків, коли глибина вигорання використовується як параметр ядерної безпеки. Але після перебування палива в реакторі та його витримки в приреакторному басейні витримки реактивність палива значно знижується за рахунок вигорання й напрацювання актиноїдів і продуктів поділу, що поглинають нейтрони. Тобто зменшення реактивності з вигоранням палива відбувається за рахунок зменшення концентрації нуклідів, що діляться, і напрацювання актиноїдів і продуктів поділу, які є поглиначами нейтронів.

Консервативний підхід при розрахунку ВЯП призводить до суттєвого збільшення геометричних характеристик такої системи і, як наслідок, збільшення вартості зберігання та транспортування.

Роботи [3, 4], що проводяться в різних країнах, спрямовані на використання точніших і реалістичніших оцінок  $k_{\text{eff}}$  для систем зберігання та транспортування ВЯП із застосуванням підходу «Burnup credit», який дозволяє визначити зменшення реактивності ВЯП за рахунок урахування вигорання палива.

Урахування вигорання палива при обґрунтуванні ядерної безпеки сховищ з ВЯП дасть змогу збільшити об'єм палива, що завантажується, і завдяки цьому суттєво зменшити вартість технологій транспортування та зберігання ВЯП.

Аналіз критичності з використанням підходу «Burnup credit» вимагає виконання двох окремих розрахунків: розрахунку концентрації нуклідів у ВЯП; розрахунку  $k_{\text{eff}}$  з використанням концентрації нуклідів, що отримані в першому розрахунку.

На сьогодні існують два підходи щодо врахування ізотопного складу у ВЯП: урахування тільки актиноїдів; повне врахування ізотопного складу, з урахуванням часу витримки палива, але без урахування самарію.

У представленій роботі проведено аналіз урахування вигорання ВЯП РВПК-1000 тільки з включенням актиноїдів. Розглянуто дві системи: контейнер ТК-8 для транспортування відпрацьованих ТВЗ та сховище відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1. Розглядався вклад актиноїдів  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ . Ці розрахунки виконувалися як без урахування профілювання вигорання палива по висоті ТВЗ, так і з урахуванням.

**Розрахунок ізотопного складу відпрацьованого ядерного палива**

Для розрахунку ізотопного складу ВЯП з урахуванням витримки палива було використано модулі SAS2H та ORIGEN-S програмного пакета SCALE4.4 [5, 6] з використанням 44-групової бібліотеки нейтронно-фізичних констант, що створена на базі ENDF-B/IV та ENDF-B/V. Модуль SAS2H застосовувався для розрахунку вигорання палива РВПК-1000 та підготовки бібліотек макроскопічних констант залежно від глибини вигорання. Отримана бібліотека використовувалась модулем ORIGEN-S для корекції вигорання та розрахунку концентрації ізотопів при подальшій витримці палива. Ізотопний склад був

Розрахункові схеми контейнера ТК-8 та басейну зберігання СВЯП-1 для кодів SCALE та MCNP наведено на рис. 2 та 3.

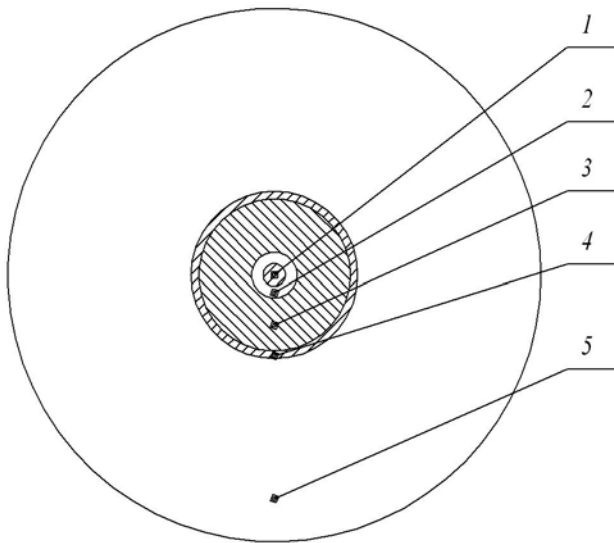


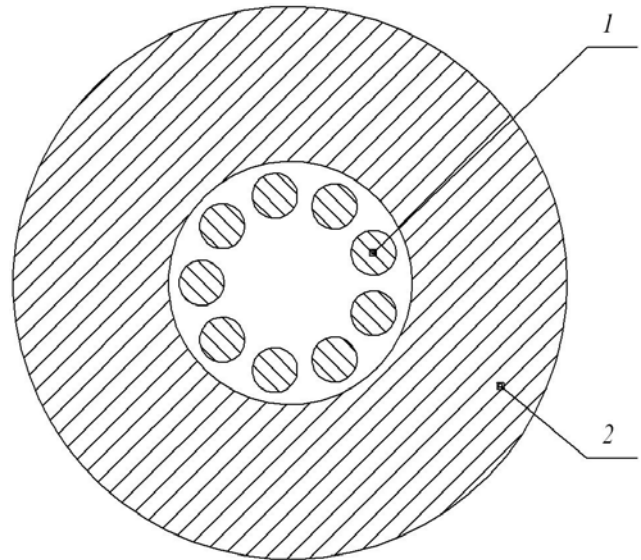
Рис. 1. Розрахункова схема чарунки РВПК-1000 для визначення ізотопного складу: 1 – несучий стрижень; 2 – теплоносій; 3 – гомогенізована суміш палива з водою; 4 – труба каналу; 5 – уповільнювач.

**Розрахункова схема контейнера ТК-8 та басейну збігання СВЯП-1 для кодів MCNP та SCALE**

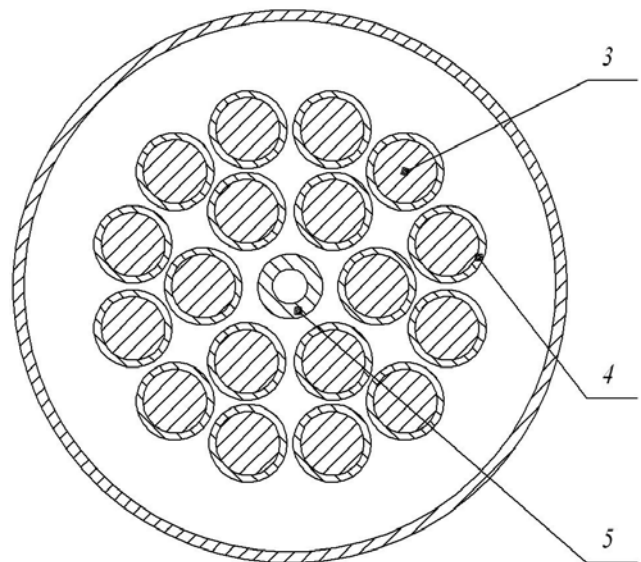
Розрахунки критичності зазначених систем проводились з використанням двох комп'ютерних кодів, що базуються на використанні методу Монте-Карло: модуль KENO-VI [7] програмного засобу SCALE-5 [8] з використанням 238-групової бібліотеки нейтронно-фізичних констант, створеної на базі ENDF-B/IV та ENDF-B/V, та комп'ютерний код MCNP4a [9]. У програмі MCNP використовуються неперервна за енергією бібліотека нейтронно-фізичних констант, створена на основі ENDF/B-V.

Для обох кодів було створено абсолютно ідентичні за геометрією, початковими та граничними умовами повністю тривимірні розрахункові схеми.

Розрахункові параметри для кодів MCNP і KENO, такі як кількість поколінь нейтронів, кількість нейтронів у поколінні і початковий розподіл джерела нейтронів, вибиралися однаковими. Припущення та підходи при розробці розрахункових схем контейнера та басейну вибиралися аналогічними. При цьому вважалося, що у ВЯП відсутній газовий зазор між паливом та оболонкою, тобто діаметр паливної таблетки збільшувався на величину газового зазору, а густина палива зменшувалася на 5 %, тобто становила 95 % від густини свіжого палива.



a



б

Рис. 2. Поперечний переріз розрахункової схеми контейнера ТК-8 (а) з ТВЗ РВПК-1000 (б): 1 – ТВЗ; 2 – корпус контейнера; 3 – ядерне паливо; 4 – оболонка теплоізолюючого елемента; 5 – центральна труба.

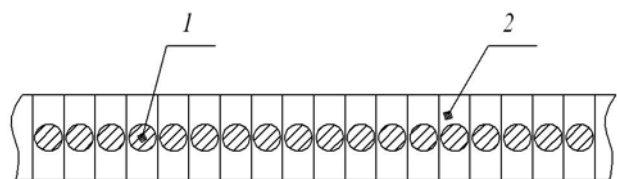


Рис. 3. Поперечний переріз розрахункової схеми басейну зберігання: 1 – ТВЗ; 2 – камера зберігання ВЯП.

**Результати аналізу**

Відповідно до вимог нормативної документації при виконанні обґрунтування ядерної безпеки систем транспортування та зберігання ВЯП, для виконання аналізу система повністю заповнюється паливом з максимальними розмножуючими властивостями. Контейнер ТК-8 має відносно великий запас підкритичності, що відповідає вимогам нормативних документів з ядерної безпеки в усіх умовах нормальної експлуатації та проектних аварій, навіть при транспортуванні термометричних та вимірювальних ТВЗ. На рис. 4 наведено залежність  $k_{\text{эф}}$  від густини води, що заповнює контейнер, для випадку заповнення його свіжим паливом зі збагаченням 2,4 % по  $^{235}\text{U}$ .

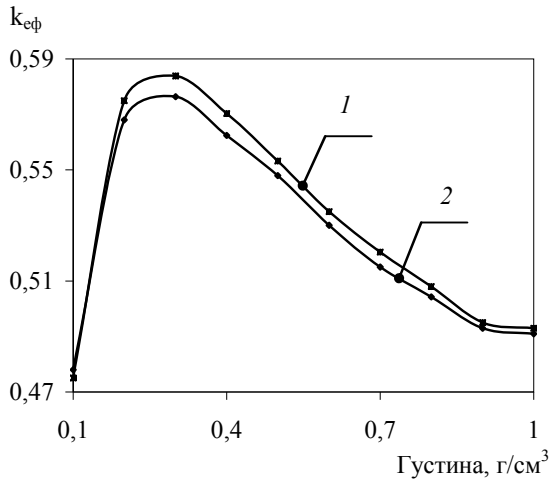


Рис. 4. Зміна коефіцієнта розмноження нейтронів залежно від густини води в контейнері ТК-8: 1 – розрахунки виконано за допомогою комп’ютерного коду MCNP; 2 – розрахунки виконано за допомогою комп’ютерного коду SCALE.

Басейн тимчасового зберігання має значно більший  $k_{\text{эф}}$  порівняно з  $k_{\text{эф}}$  контейнера. З рис. 5 видно, що при низькому значенні густини води  $k_{\text{эф}}$  перевищує значення 0,95 (розрахунок проводився без урахування борної кислоти у воді басейну тимчасового зберігання). Аналогічна ситуація спостерігається й у випадку зниження рівня в басейні – аварійна ситуація, пов’язана з течією в басейні зберігання.

Тому питання врахування вигорання для обох систем є актуальним. У випадку з ТК-8 мова може йти про суттєве збільшення місткості системи, залишаючись у тих же самих геометричних розмірах, а у випадку з басейном зберігання – про можливість обґрунтування ядерної безпеки системи.

Для врахування вигорання ядерного палива розглядалися ТВЗ зі збагаченнями від 1,8 до 2,4 % по  $^{235}\text{U}$  (регенеративне паливо не розглядалося). Ураховувалася різна глибина вигорання палива від 17,5 до 27,5 МВт·доба/кг (урану) з кроком по вигоранню 2,5 МВт·доба/кг (урану). Аналізувався термін витримки ВЯП від 0 до 105 років.

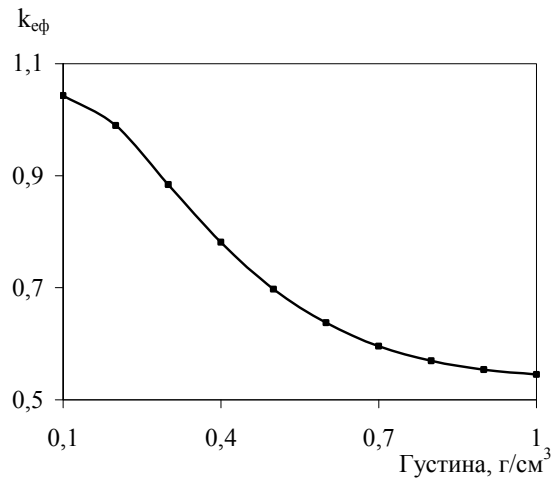


Рис. 5. Зміна коефіцієнта розмноження нейтронів залежно від густини води в басейні зберігання (розрахунки виконано за допомогою комп’ютерних кодів MCNP та SCALE).

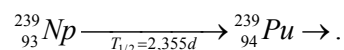
У процесі експлуатації вигорання ТВЗ відбувається нерівномірно по висоті. Це пов’язано з аксіальним профілем розподілу поля енерговиділення. У роботі було проаналізовано вплив розподілу глибини вигорання по висоті ТВЗ на критичність системи. Для цього ТВЗ РВПК-1000 по висоті розбивалася на сім частин: п’ять у нижньому пучку тепловиділяючого елемента та два у верхньому. Наприклад, для ТВЗ зі збагаченням 2,4 % по  $^{235}\text{U}$  для середнього вигорання 22,5 МВт·доба/кг (урану) в таблиці наведено розбиття по висоті та профіль вигорання (рівень 0 задавався на рівні перемички між нижнім та верхнім пучками ТВЗ).

**Розподіл глибини вигорання по висоті ТВЗ**

№ шару	Висота шару Z, см	Глибина вигорання, МВт·доба/кг (урану)
1	350 ÷ 175	17,5
2	0 ÷ 175	17,5
3	-70 ÷ 0	22,5
4	-140 ÷ -70	25
5	-140 ÷ -210	27,5
6	-210 ÷ -280	27,5
7	-280 ÷ -350	22,5

Для зазначених ТВЗ та глибин вигорання палива було проведено ряд розрахунків  $k_{\text{эф}}$  контейнера та басейну зберігання. На рис. 6 - 9 наведено графіки залежності  $k_{\text{эф}}$  для палива з початковим збагаченням 2,4 % по  $^{235}\text{U}$  та із середньою глибиною вигорання 22,5 МВт·доба/кг (урану) від часу витримки.

З рис. 6 та 7 добре видно, що в перші майже 400 год після зупинки реакторної установки спостерігається збільшення  $k_{\text{эф}}$  за рахунок напрацювання  $^{239}\text{Pu}$  ( $\beta^-$ -розпад  $^{239}\text{Np}$ ):



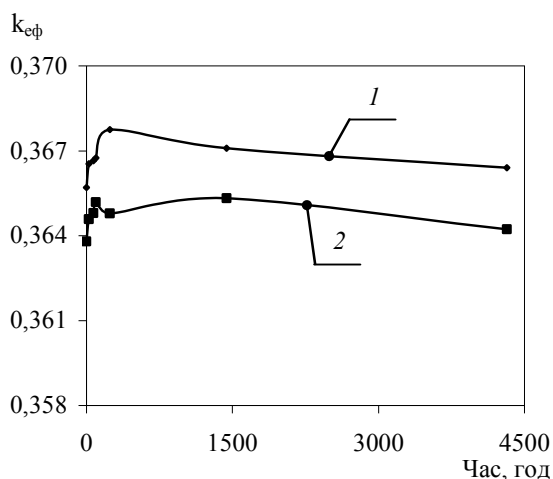


Рис. 6. Зміна ефективного коефіцієнта розмноження в перші 4320 год після вивантаження палива з реактора у випадку розрахункової схеми контейнера ТК-8: 1 – розрахунки виконано за допомогою комп’ютерного коду MCNP; 2 – розрахунки виконано за допомогою комп’ютерного коду SCALE.

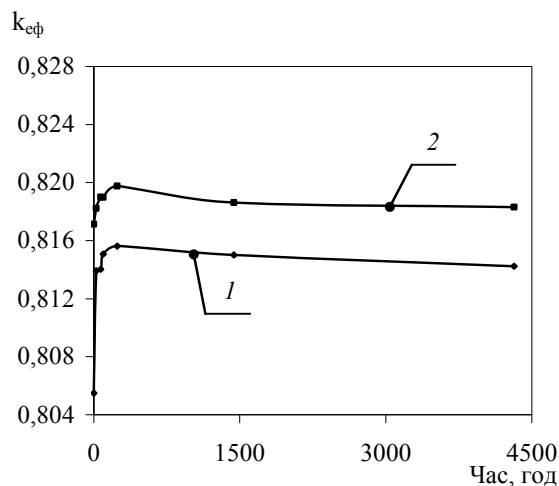
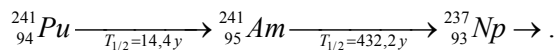


Рис. 7. Зміна ефективного коефіцієнта розмноження в перші 4320 год після вивантаження палива з реактора у випадку розрахункової схеми басейну зберігання: 1 – розрахунки виконано за допомогою комп’ютерного коду MCNP; 2 – розрахунки виконано за допомогою комп’ютерного коду SCALE.

Далі, як видно з рис. 8 та 9 у межах від 5 до 50 років спостерігається суттєве зниження  $k_{\text{eff}}$ .

Зниження  $k_{\text{eff}}$  нейтронів у межах від 5 до 50 років пов’язано зі зменшенням концентрації  $^{241}\text{Pu}$  в результаті  $\beta^-$ -розпаду:



У наступні 55 років спостерігається незначна зміна розмножуючих властивостей системи. Коефіцієнт розмноження системи змінюється мало, коливаючись навколо свого середнього значення.

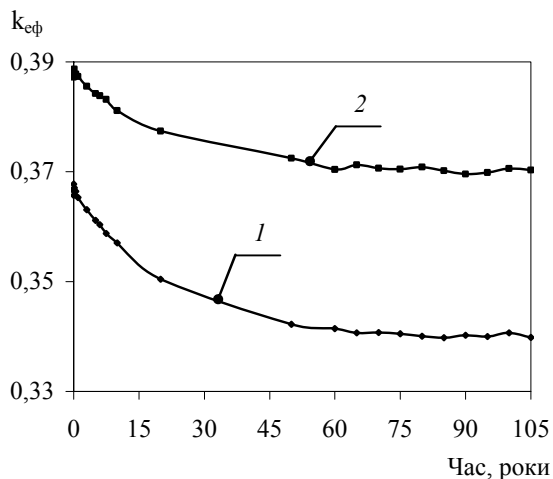


Рис. 8. Залежність ефективного коефіцієнта розмноження від часу зберігання ВЯП у контейнері ТК-8: 1 – розрахунки без профілювання вигорання по висоті ТВЗ; 2 – розрахунки з профілюванням вигорання по висоті ТВЗ.

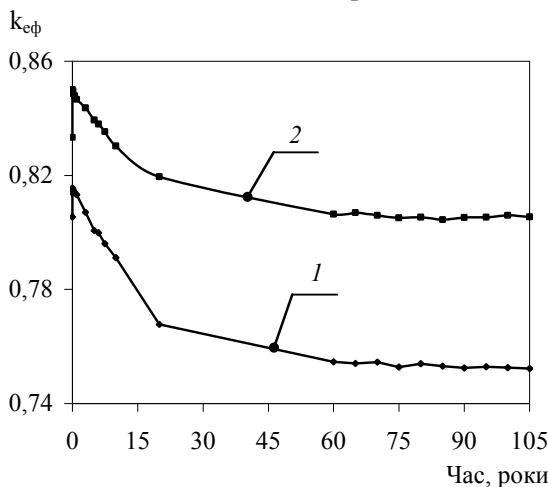


Рис. 9. Залежність ефективного коефіцієнта розмноження від часу зберігання ВЯП у сховищі відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1: 1 – розрахунки без профілювання вигорання по висоті ТВЗ; 2 – розрахунки з профілюванням вигорання по висоті ТВЗ.

На рис. 10 та 11 чітко видно різницю між розмножуючими властивостями системи без урахування розподілу глибини вигорання по висоті ТВЗ та з урахуванням ( $\Delta$  – різниця між  $k_{\text{eff}}$  «свіжого» палива та  $k_{\text{eff}}$  палива, що вигоріло).

Добре видно, що профілювання глибини вигорання палива при розрахунках за допомогою підходу «Burnup credit» суттєво впливає на величину  $k_{\text{eff}}$ . Як видно з рис. 12 та 13 така недооцінка може лежати в межах від 10 до 30 %.

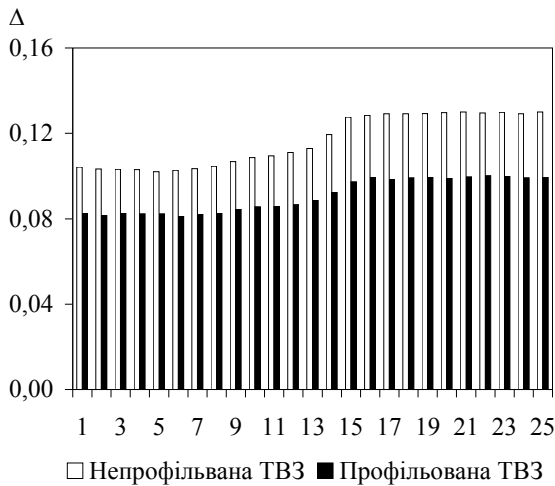


Рис. 10. Відхилення  $k_{\text{eff}}$  для палива, що вигоріло, від  $k_{\text{eff}}$  «свіжого» палива у випадку контейнера ТК-8.

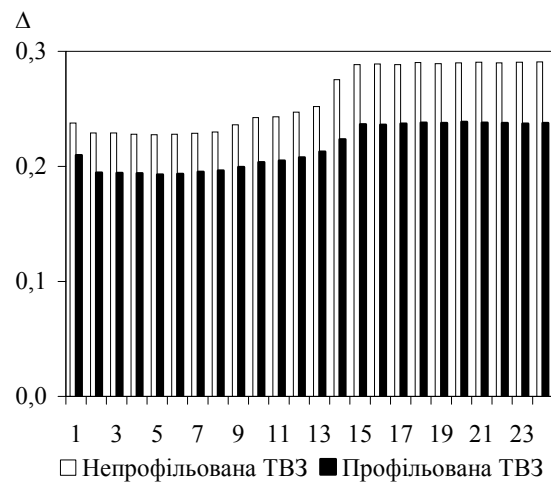


Рис. 11. Відхилення  $k_{\text{eff}}$  для палива, що вигоріло, від  $k_{\text{eff}}$  «свіжого» палива у випадку сховища ВЯП СВЯП-1.

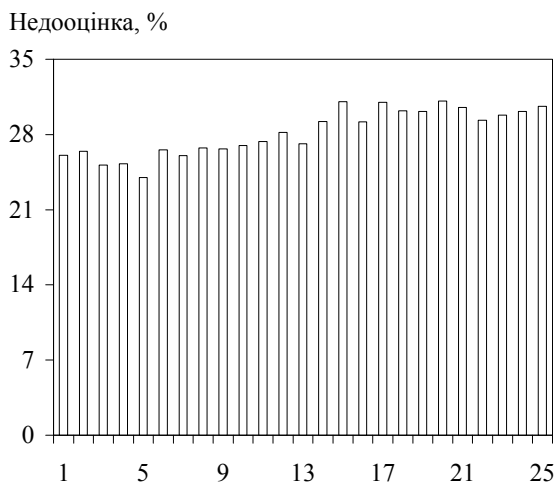


Рис. 12. Рівень недооцінки  $k_{\text{eff}}$  при неврахуванні розподілу глибини вигорання по висоті ТВЗ для контейнера ТК-8.

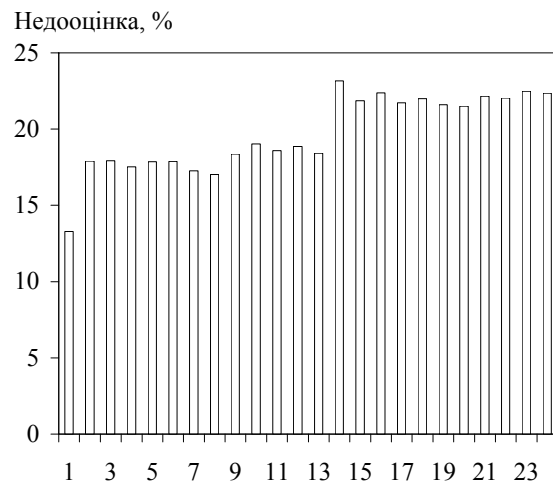


Рис. 13. Рівень недооцінки  $k_{\text{eff}}$  при неврахуванні розподілу глибини вигорання по висоті ТВЗ для басейну зберігання СВЯП-1.

**Висновки**

У цій роботі проаналізовано деякі проблеми обґрунтування ядерної безпеки систем транспортування та зберігання ВЯП при використанні підходу «Burnup credit». Варто зазначити, що розрахунки було виконано за допомогою саме двох кодів MCNP та SCALE з метою підвищення достовірності отриманих результатів. Незначна відмінність у результатах цих розрахунків частково підтверджує коректність розробленої розрахункової схеми, що використовувалася для дослідження.

Урахування вигорання палива при обґрунтуванні ядерної безпеки систем транспортування та зберігання ВЯП РВПК-1000 суттєво збільшує

можливості системи щодо кількості ТВЗ, що транспортуються та зберігаються, з точки зору вимог ядерної безпеки. Видно, що врахування розподілу вигорання по висоті ТВЗ необхідне при обґрунтуванні ядерної безпеки систем з ВЯП за допомогою підходу «Burnup credit», оскільки при цьому значною мірою підвищується  $k_{\text{eff}}$ . Неврахування цього розподілу є некоректним при обґрунтуванні ядерної безпеки з урахуванням вигорання палива.

Подальші наші дослідження щодо врахування вигорання ядерного палива в розрахунках за допомогою підходу «Burnup credit» спрямовані на розробку повної методики з урахування ізотопного складу ВЯП.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. ПНАЭ Г-1-029-91. Правила хранения и транспортировки ядерного топлива на объектах атомной энергетики. - 1992. - С. 15 - 23.
2. НП 306.2.105-2004. Основные положения обеспечения безопасности промежуточных хранилищ отработавшего ядерного топлива сухого типа.

3. *NUREG/CR-6798 ORNL/TM-001/259. Isotopic Analysis of High-Burnup PWR Spent Fuel Samples From the Takahama - 3 Reactor.*
4. *NUREG/CR-6811 ORNL/TM-2001/257. Strategies for Application of Isotopic Uncertainties in Burnup Credit.*
5. *Hermann O. W., Parks C. V. SAS2H: A Coupled One-Dimensional Depletion and Shielding Analysis Module // NUREG/CR-0200, Revision 6, (ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R6), Oak Ridge National Laboratory. - 1998.*
6. *Hermann O.W., Westfall R.M. ORIGEN-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Buildup and Decay, and Associated Radiation Source Terms // NUREG/CR-0200, Revision 6, (ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R6), Oak Ridge National Laboratory. - 1998.*
7. *Hollenbach D. F., Petrie L. M., Landers N. F. KENO-VI: A General Quadratic Version of the KENO Program // ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R7. - 2004. - Vol. II, Section F17. - 572 p.*
8. *SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations, ORNL/TM-2005/39, Version 5.1, Vols. I - III, November 2006. - 732 p.*
9. *Briesmeister J.F. MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A: Report / Los Alamos National Laboratory. - No. LA-12625-M. - Los Alamos, NM (USA), 1993.*

### **УЧЕТ ВЫГОРАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ПРИ ОБОСНОВАНИИ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РБМК-1000**

**В. В. Гальченко, В. И. Макодим, В. В. Соловьев, В. В. Илькович**

Проведен анализ учета выгорания отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) для обоснования ядерной безопасности контейнера ТК-8 и бассейна хранения ХОЯТ-1 с топливом РБМК-1000 с учетом 100-летнего периода хранения ОЯТ. В ОЯТ учитывались только актиноиды. Было проанализировано два подхода к учету выгорания, в которых рассматривалась система без учета, распределения изотопов по высоте тепловыделяющей сборки (ТВС) и с учетом этого распределения. Расчеты проводились с использованием компьютерных кодов SCALE и MCNP. Показано, что учет выгорания существенно увеличивает запас подкритичности, а учет распределения изотопов по высоте ТВС делает данную оценку более консервативной.

*Ключевые слова:* отработавшее ядерное топливо, хранилище отработавшего ядерного топлива, контейнер ТК-8, подход «Burnup credit».

### **BURNUP CREDIT CALCULATIONS FOR CRITICALITY SAFETY JUSTIFICATION FOR RBMK-1000 SPENT FUEL OF TRANSPORT AND STORAGE SYSTEMS**

**V. V. Galchenko, V. I. Macodym, V. V. Solovyov, V. V. Ilkovich**

In present paper the burnup credit calculations for TK-8 transport container and SVJP-1 spent fuel storage facility of pool type with RBMK-1000 spent fuel during 100-years of cooling time were performed for criticality safety analysis purpose using MCNP and SCALE codes. Only actinides were taken into account for these critical systems. Two approaches were analyzed with isotopes distribution calculations along fuel assembly height and without it. The results show that subcriticality margin is increased considerably using burnup credit and isotopes distribution along fuel assembly height made this value more reasonable.

*Keywords:* spent fuel, SVJP-1 spent fuel storage facility, TK-8 transport container, burnup credit.

Надійшла до редакції 02.11.10,  
після доопрацювання - 15.12.10.