

В. В. Гальченко, В. В. Соловійов,  
О. С. Г ородніча

Національний технічний університет України «КПІ»,  
м. Київ, Україна

## Урахування вигорання ядерного палива при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання відпрацьованого ядерного палива

Проведено аналіз урахування вигорання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) РВПК-1000 та ВВЕР-1000 тільки з включенням актиноїдів та запропоновано методику урахування актиноїдного кредиту вигорання. Проаналізовано два підходи до урахування вигорання, в яких розглядалася система без урахування та з урахуванням розподілу ізотопів за висотою тепловідільної збірки (ТВЗ). Розрахунки проводилися з використанням комп'ютерних кодів SCALE і MCNP.

Результати досліджень мають потенційно важливе значення для обґрунтування ядерної безпеки систем зберігання та транспортування ВЯП та можуть забезпечити технічне підґрунтя для розширення використання цієї методики для розрахунку таких систем.

Ключові слова: відпрацьоване ядерне паливо, комп'ютерні коди SCALE і MCNP, підхід «burnup credit».

**В. В. Гальченко, В. В. Соловьев, О. С. Городнича**

### Учет выгорания ядерного топлива при обосновании ядерной безопасности систем хранения отработавшего ядерного топлива

Проведен анализ учета выгорания отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) РВМК-1000 и ВВЭР-1000 только с включением актиноидов и предложена методика учета актиноидного кредита выгорания. Проанализировано два подхода по учету выгорания, в которых рассматривалась система без учета и с учетом распределения изотопов по высоте тепловыделяющей сборки (ТВС). Расчеты проводились с использованием компьютерных кодов SCALE и MCNP.

Результаты исследований имеют потенциально важное значение для обоснования ядерной безопасности систем хранения и транспортировки ОЯТ и могут обеспечить техническое подспорье для расширения использования этой методики для расчета таких систем.

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо, компьютерные коды SCALE и MCNP, подход «burnup credit».

© В. В. Гальченко, В. В. Соловійов, О. С. Городніча, 2012

Для аналізу ядерної безпеки систем зберігання і транспортування відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) нормативні документи вимагають проведення розрахунків з обґрунтування підкритичності таких систем, повністю заповнених паливом з максимальними розмножувальними властивостями [1, 2], зазвичай — свіжим паливом максимального збагачення. Такий рівень консерватизму пов'язаний насамперед з недосконалістю методик щодо визначення ізотопного складу ВЯП на час формування вимог. Тому збільшення геометричних характеристик, таких як розмір чарунки зберігання, товщина стінки чарунки та крок між чарунками, і, як наслідок, зменшення кількості відпрацьованих тепловідільних збірок (ТВЗ), що завантажуються в контейнер, надає змогу впевнено говорити про пасивне забезпечення підкритичності систем з ВЯП за рахунок збільшення втрат нейтронів та їх поглинання в непаливних елементах конструкції. Наслідком такого консерватизму є збільшення вартості зберігання й транспортування ВЯП.

Але, фактично, після перебування палива в реакторі та реакторному басейні витримки ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів ( $k_{\text{eff}}$ ) палива значно знижується внаслідок зниження концентрації  $^{235}\text{U}$  («вигорання» палива) і напрацювання актиноїдів та продуктів поділу, що поглинають нейтрони.

Роботи, які проводяться в різних країнах [3–6], спрямовані на використання точніших і реалістичніших оцінок  $k_{\text{eff}}$  для систем зберігання й транспортування ВЯП, із застосуванням так званого підходу burnup credit (кредит вигорання). Кредит вигорання — підхід, який дає змогу визначити зменшення реактивності у ВЯП, враховуючи вигорання палива. Урахування вигорання палива при обґрунтуванні ядерної безпеки сховищ з ВЯП дасть змогу збільшити об'єм палива, що завантажуються, і завдяки цьому суттєво зменшити вартість технологій транспортування та зберігання ВЯП.

Аналіз критичності з використанням підходу burnup credit вимагає виконання двох окремих етапів: визначення концентрації нуклідів у ВЯП; розрахунку  $k_{\text{eff}}$  з використанням концентрації нуклідів, що отримана на першому етапі.

Документ [4] обґрунтовує і розглядає чотири шляхи урахування ізотопного складу у ВЯП:

1. Fission products only (FP). Урахування зміни тільки концентрації нуклідів, що діляться, —  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ , та зміни концентрації  $^{238}\text{U}$ .

2. Actinides credit (AC). Урахування тільки актиноїдів  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ .

3. Урахування актиноїдів та продуктів поділу. До зазначених у шляху 2 ізотопів додають продукти поділу ( $^{95}\text{Mo}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{101}\text{Ru}$ ,  $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{109}\text{Ag}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{143}\text{Nd}$ ,  $^{145}\text{Nd}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{150}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{152}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{155}\text{Gd}$ ).

4. Повне урахування ізотопного складу та часу витримки палива, але без урахування Sm.

У роботі розглянуто запропонований підхід actinides credit (актиноїдний кредит) у застосуванні його до палива РВПК-1000 та ВВЕР-1000.

Необхідно зазначити, що відсутність достатньої кількості експериментальних даних з ізотопного складу відпрацьованого ядерного палива не дозволяє продовжити розробку необхідної методики. Так, з робіт [7–10] та багатьох інших добре видно, що різниця між розрахованими та експериментально вимірними значеннями ізотопного складу може бути досить суттєвою для різних ізотопів.

**Розрахункові схеми систем для кодів MCNP та SCALE і параметри, що аналізувалися. Критичність зазначених**

систем розраховувалася за допомогою двох комп'ютерних кодів, що базуються на використанні методу Монте-Карло: модуля KENO-VI [11] програмного продукту SCALE-5 [12] з використанням 238-групової бібліотеки нейтронно-фізичних констант, створеної на базі ENDF-B/V та ENDF-B/VI, та комп'ютерного коду MCNP4a [13] з використанням неперервної за енергією бібліотеки нейтронно-фізичних констант, створеної на основі ENDF/B-V.

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

Розрахункові параметри для кодів MCNP і KENO, такі як кількість поколінь нейтронів, кількість нейтронів у поколінні та початковий розподіл джерела нейтронів, вибиралися однаковими, припущення та підходи під час розробки розрахункових схем контейнера та басейну — 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 % теоретичної густини палива (або 1 % розрахункової).

Ізотопний склад для всіх типів палива визначався з використанням модулів SAS2H [14] та ORIGEN-S [15] комп'ютерного коду SCALE [12]. Розрахункову схему для ТВЗ РВПК-1000 наведено в [6]. Розрахункова схема для ТВЗ ВВЕР-400 та ВВЕР-1000 принципово базується на таких самих стандартних для коду засадах, які полягають в двохетапному підході. На першому етапі формується розрахункова схема для коду SAS2H, яка застосовується для розрахунку вигоряння палива та підготовки бібліотек макроскопічних констант залежно від глибини вигоряння. На другому етапі отримана бібліотека використовується модулем ORIGEN-S для корекції вигоряння та розрахунку концентрації ізотопів при подальшій витримці палива. Отриманий з ORIGEN-S ізотопний склад і використовується для подальших розрахунків кредиту вигоряння.

Для забезпечення консервативності результатів розглядався вплив допусків при виготовленні палива та його оболонки. Обробці піддавалися такі характеристики, як початкове збагачення палива по  $^{235}\text{U}$  і початкова маса палива в ТВЗ, геометричні допуски на виготовлення палива та його оболонки. Вплив зазначених характеристик розглядався як при створенні розрахункової схеми для визначення ізотопного складу, так і при формуванні розрахункової схеми для визначення критичності.

Параметри, які змінювалися в процесі формування розрахункової схеми для SAS2H і ORIGEN-S, та їх вплив на критичність наведено в табл. 1–3. Із наведених таблиць видно, що тенденція зміни  $k_{\text{эф}}$  однакова для всіх розглянутих типів палива, що говорить про прийнятність цього підходу для розрахунків ізотопного складу і критичності для всіх типів ТВЗ, що розглядалися.

Розміри оболонки палива враховувалися двічі: вперше — у розрахунку ізотопного складу, вдруге — при формуванні розрахункової схеми для аналізу критичності. Хоча потрібно зазначити, що вплив розмірів оболонки є несуттєвим. Сумарний ефект від урахування розмірів оболонки не перевищує 0,6 %.

Важливо відзначити, що найбільший внесок у збільшення розмножувальних властивостей вносить консервативне збільшення маси палива та його густини при розрахунках ізотопного складу.

Як показали розрахунки залежності  $k_{\text{эф}}$  від зміни температури води та палива для різного терміну витримки, що

Таблиця 1. Параметри ТВЗ, які піддавалися обробці для палива РВПК-1000

Параметр	Базова величина	Відхилення/Діапазон	Тенденція в $k_{\text{эф}}$
Зовнішній діаметр палива, мм	11,52	-0,02	-
Початкове збагачення, %	1,8, 2,0, 2,4	-0,05/+0,05	-/+
Маса палива $\text{UO}_2$ , кг	135	-1% /+1%	-/+
Густина палива, г/см <sup>3</sup>	10,4÷10,7	10,43/ 10,96 (теоретична)	-/+
Внутрішній діаметр оболонки, мм	11,7÷11,8	+0,035	+
Зовнішній діаметр оболонки, мм	13,65	-0,08/+0,05	+/-

Таблиця 2. Параметри ТВЗ, які піддавалися обробці для палива ВВЕР-1000

Параметр	Базова величина	Відхилення/Діапазон	Тенденція в $k_{\text{эф}}$
Внутрішній діаметр палива, см	2,35		
Зовнішній діаметр палива, мм	7,57	7,57/7,6	-/+
Початкове збагачення, %	1,6, 2,4, 3,6, 4,4	-0,05/+0,05	-/+
Маса палива $\text{UO}_2$ , кг	455,52	-1% /+1%	-/+
Густина палива, г/см <sup>3</sup>	10,55	10,43/ 10,96 (теоретична)	-/+
Внутрішній діаметр оболонки, мм	7,72	+0,08	+
Зовнішній діаметр оболонки, мм	9,1	-0,05/+0,08	+/-

Таблиця 3. Параметри ТВЗ, які піддавалися обробці для палива ВВЕР-440

Параметр	Базова величина	Відхилення/Діапазон	Тенденція в $k_{\text{эф}}$
Внутрішній діаметр палива, см	1,2	+0,8	-
Зовнішній діаметр палива, мм	7,54÷7,59	7,54/7,6	-/+
Початкове збагачення, %	1,6, 2,4, 3,6, 4,21, 4,4	-0,05/+0,05	-/+
Маса палива $\text{UO}_2$ , кг	138,5	-1% /+1%	-/+
Густина палива, см <sup>3</sup>	10,43÷10,73	10,43/ 10,96 (теоретична)	-/+
Внутрішній діаметр оболонки, мм	7,72	+0,08	+
Зовнішній діаметр оболонки, мм	9,05÷9,2	9,05/9,2	+/-

Примітка. В табл. 1–3 знак «-» характеризує тенденцію на зниження, а знак «+» на збільшення  $k_{\text{эф}}$ .

проводилися тільки з використанням комп'ютерного коду SCALE, оскільки бібліотека MCNP використовує дані лише для 300 К (деякі результати розрахунків наведено на рис. 1–3), якісно характер залежності  $k_{\text{эф}}$  від температури

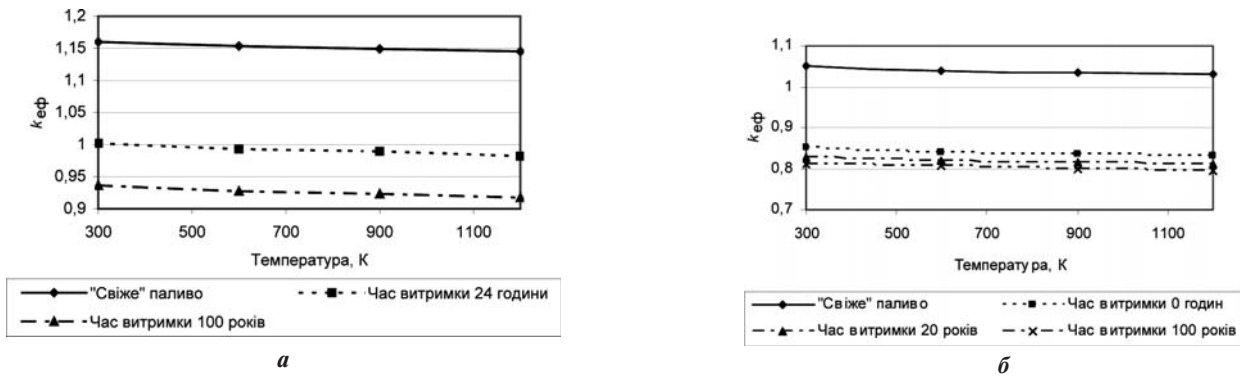


Рис. 1. Залежність  $k_{\text{eff}}$  від зміни температури палива для ТВЗ ВВЕР-1000 (а — густина води  $1 \text{ г/см}^3$ ) і РВПК-1000 (б — густина води  $0,1 \text{ г/см}^3$ ) різного часу витримки

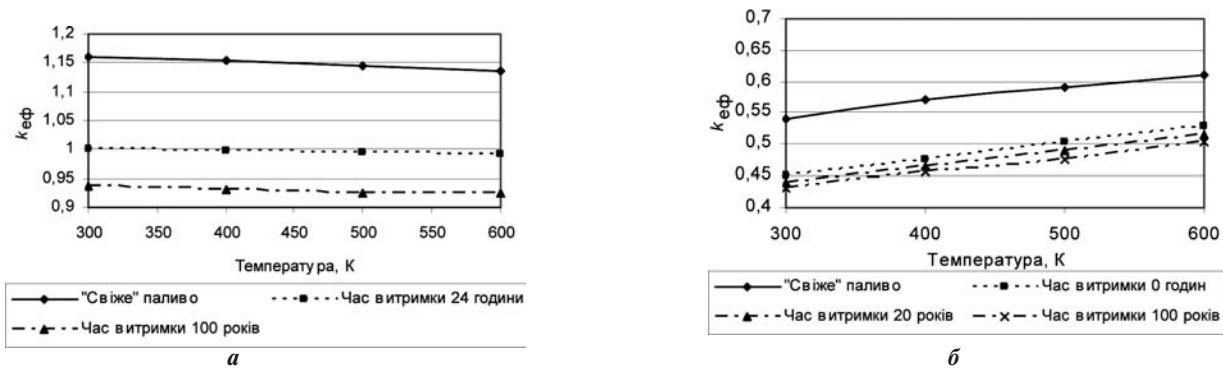


Рис. 2. Залежність  $k_{\text{eff}}$  від зміни температури теплоносія для ТВЗ ВВЕР-1000 (а) і РВПК-1000 (б) різного часу витримки (густина води  $1 \text{ г/см}^3$ )

води і палива зберігається і не змінюється протягом усього інтервалу часу, що досліджувався.

**Розрахунок і аналіз зміни ізотопного складу у ВЯП.** Внесок кожного ізотопу в загальну масу ізотопів різний. Як видно з рис. 4, найбільший внесок належить ізотопам, що діляться:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , та  $^{241}\text{Pu}$ . На них припадає близько 70 % всієї маси актиноідів (без урахування маси  $^{238}\text{U}$ ).

Але  $^{241}\text{Pu}$  має невеликий період напіврозпаду ( $T_{1/2}$ ) — 14,4 року і, як видно з рис. 5—7, майже за 60 років повністю розпадається (в  $^{241}\text{Am}$ ). Аналогічна картина в цьому плані спостерігається для будь-якого типу ТВЗ реакторів на теплових нейтронах.

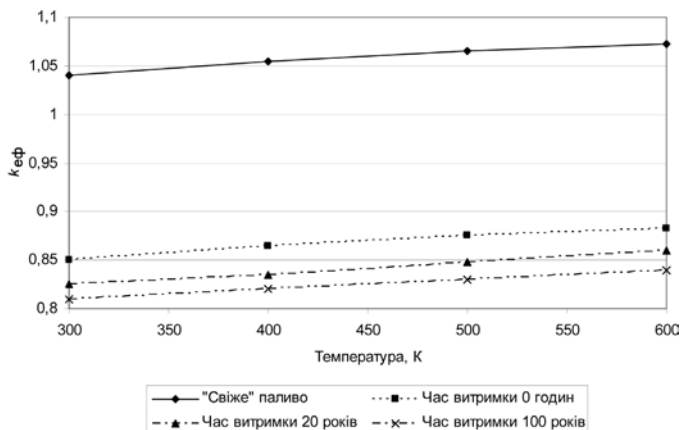


Рис. 3. Залежність  $k_{\text{eff}}$  від зміни температури теплоносія для ТВЗ РВПК-1000 різного часу витримки (густина води  $0,1 \text{ г/см}^3$ )

Ізотоп  $^{239}\text{Pu}$  має  $T_{1/2} = 24131$  років, тому суттєвого зниження його концентрації в період, що розглядається, не відбувається. Навпаки, в перший рік за рахунок розпаду  $^{239}\text{Np}$  ( $T_{1/2} = 2,355$  доби) спостерігається збільшення його концентрації, як це видно з рис. 8 та 9.

**Результати розрахунку критичності.** Аналіз критичності із застосуванням вищезазначеного шляху 1 (тобто з урахуванням зміни концентрації ізотопів  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ , та  $^{238}\text{U}$ ) вже активно застосовується протягом багатьох років у різних країнах. Але, як видно з табл. 4, він має нижчу «ефективність», ніж шлях 2, що дає несуттєвий виграв з точки зору збільшення можливостей систем, які розглядалися.

Ізотопи, які враховуються при використанні підходу ФР (шлях 1), мають великі періоди напіврозпаду ( $T_{1/2}$ ), і їх концентрація, відповідно, практично не змінюється за

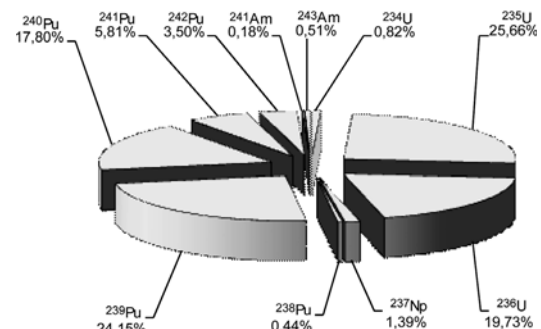


Рис. 4. Внесок кожного ізотопу (крім  $^{238}\text{U}$ ) в загальну масу актиноідів для палива РВПК-1000 витримкою в 5 років



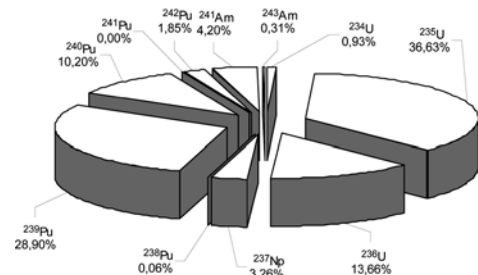


Рис. 5. Внесок кожного ізотопу (крім  $^{238}\text{U}$ ) в загальну масу актиноідів для палива ВВЕР-1000 витримкою у 60 років

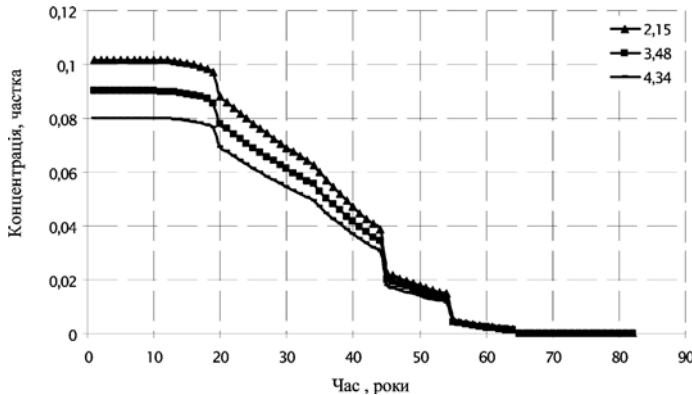


Рис. 6. Зміна концентрації  $^{241}\text{Pu}$  для палива ВВЕР-1000 різного початкового збагачення по  $^{235}\text{U}$

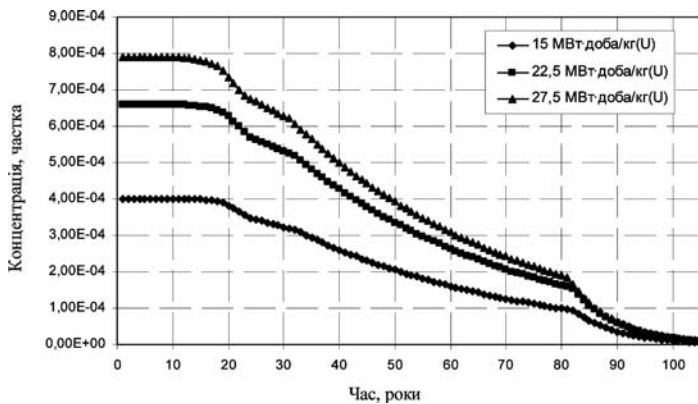


Рис. 7. Зміна концентрації  $^{241}\text{Pu}$  для палива РВПК-1000 збагаченням 2,4 % по  $^{235}\text{U}$  з різною глибиною вигорання палива

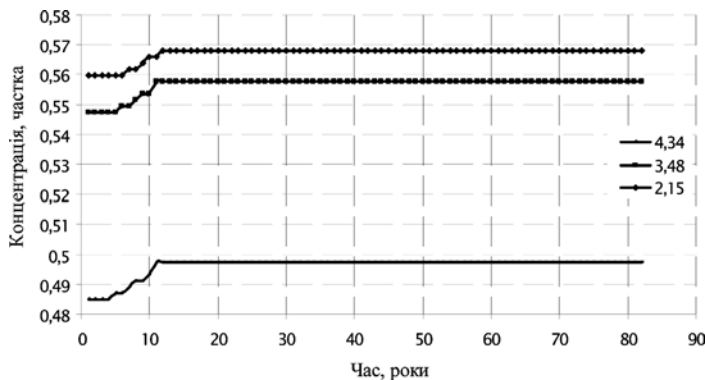


Рис. 8. Зміна концентрації  $^{239}\text{Pu}$  для палива ВВЕР-1000 різного початкового збагачення по  $^{235}\text{U}$

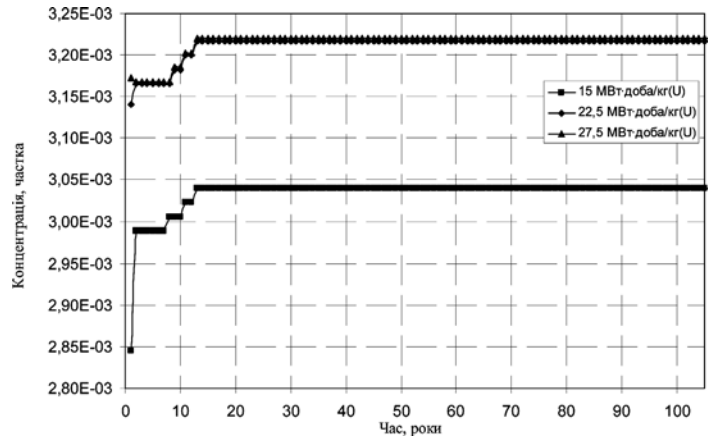


Рис. 9. Зміна концентрації  $^{239}\text{Pu}$  для палива РВПК-1000 початковим збагаченням 2,4 % по  $^{235}\text{U}$ , з різною глибиною вигорання палива

розглядуваний період, тобто залишається практично такою, як і після вивантаження з реактора (за винятком збільшення концентрації  $^{239}\text{Pu}$ ). Окрім того, при роботі реактора концентрація цих ізотопів визначається лише початковим збагаченням палива і величиною потоку нейтронів. Таким чином, програмні продукти, які розраховують ізотопний склад у паливі при його вигоранні, даватимуть приблизно однакові значення концентрацій цих ізотопів і добре збігатимуться з експериментальними даними. Це робить такий метод перспективним з точки зору подальших досліджень щодо створення розрахункової методики визначення ізотопного складу у ВЯП для урахування кредиту вигорання.

Таблиця 4. Зміна  $k_{\text{еф}}$  залежно від часу витримки за різними методиками для палива ВВЕР-1000 з середньою глибиною вигорання 40 MWt·doba/kg(U)

Час витримки	Шлях 1 (FP)	Шлях 2 (АС)	Дельта 1	Дельта 2
Свіже паливо	1,16004	1,16004	$k_{\text{св}} - k_{\text{виг}}$	
24 години	1,10238	1,00082	0,05766	0,15922
5 років	1,09310	0,98173	0,06694	0,17831
85 років	1,05593	0,91859	0,10411	0,24145
100 років	1,05672	0,91885	0,10332	0,24119

Примітка. Дельта 1 — різниця між ефективними коефіцієнтами розмноження нейтронів для системи зі свіжим паливом та тим що вигоріло, з урахуванням методики FP, дельта 2 — відповідно з урахуванням методики АС.

На рис. 10 представлено внесок кожного ізотопу в зниження  $k_{\text{еф}}$  при урахуванні вигорання актиноідів, звідки видно, що головну роль у зниженні критичності відіграє  $^{241}\text{Pu}$ ; це пояснюється великим перерізом ділення ізотопу в «тепловій»

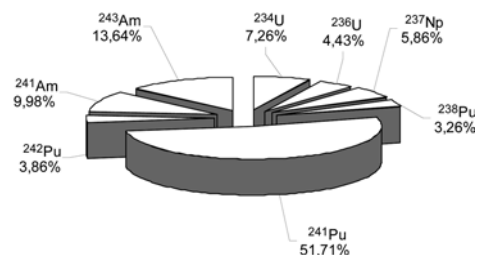


Рис. 10. Внесок ізотопів у зниження  $k_{\text{еф}}$  при урахуванні вигорання актиноідів для палива ВВЕР-1000

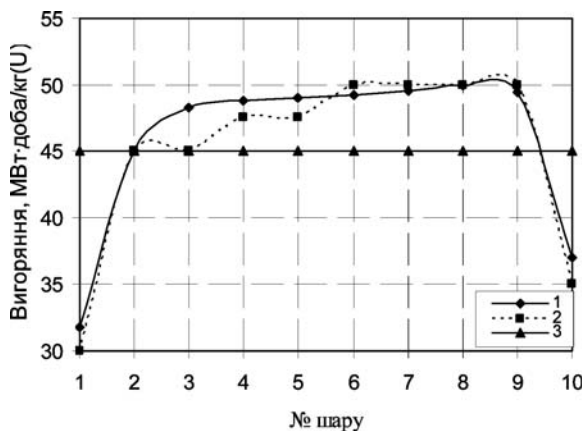


Рис. 11. Профіль вигорання для ТВЗ ВВЕР-1000 збагаченням 4,4 % по  $^{235}\text{U}$ :  
1 — профіль, розрахований за допомогою БІПР;  
2 — модифікований профіль для розрахунків критичності;  
3 — без профілювання

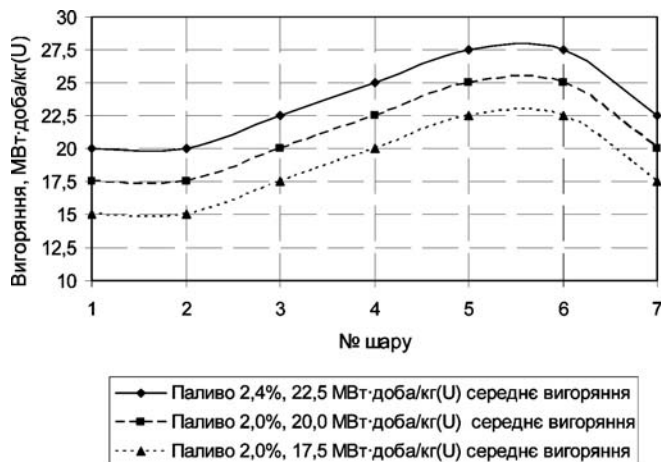


Рис. 12. Профіль вигорання для ТВЗ РВПК-1000 різного збагачення

області енергій ( $\sigma_f \approx 1000$  барн при  $E_n \approx 0,0253$  еВ) і невеликим  $T_{1/2}$ .

**Профілювання.** У процесі експлуатації вигорання ТВЗ за висотою відбувається нерівномірно. Це пов'язано з аксіальним профілем розподілу поля енерговиділення. У роботі проаналізовано вплив розподілу глибини вигорання за висотою ТВЗ на критичність системи.

Профіль вигорання для ТВЗ ВВЕР отримувався з розрахунків комп'ютерного коду БІПР, який використовується на АЕС України для розрахунків паливних циклів активних зон. З урахуванням кроку вигорання, який використовувався при розрахунках ORIGEN-S, отриманий профіль дещо модифікувався так, щоб він максимально відповідав профілю, розрахованому БІПР (рис. 11) для палива ВВЕР-1000 початкового збагачення 4,4 % по  $^{235}\text{U}$  для середньої глибини вигорання 45 МВт-доба/кг (U). Розрахунок профілю вигорання для ТВЗ РВПК-1000 проводився з урахуванням коефіцієнта нерівномірності 1,2. Профіль вигорання для палива РВПК, який використовувався в розрахунках, наведено на рис. 12. ТВЗ ВВЕР при цьому розбивалася на 10 шарів за висотою, ТВЗ РВПК-1000 — на 7 шарів [6].

На рис. 13—16 показано залежність  $k_{\text{эф}}$  від часу витримки для різного типу палива.

Збіг між розрахунками за SCALE та MCNP знаходиться в межах статистичної еквівалентності й варіюється в межах

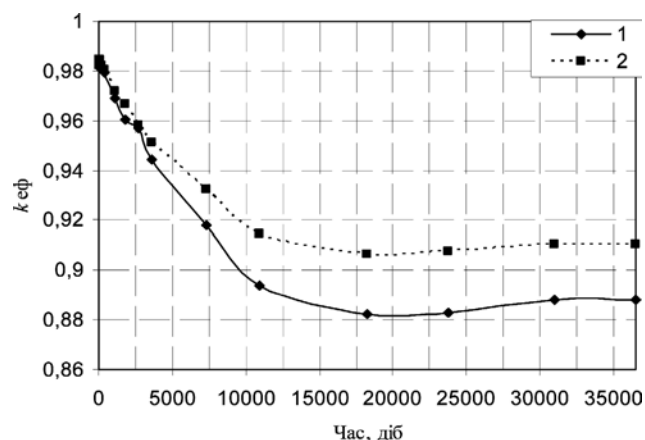


Рис. 13. Залежність  $k_{\text{эф}}$  від часу витримки для палива ВВЕР-1000 початкового збагачення 4,34 % по  $^{235}\text{U}$  та з середньою глибиною вигорання палива 45 МВт-доба/кг(U):  
1 — без урахування профілю вигорання;  
2 — з урахуванням профілю вигорання

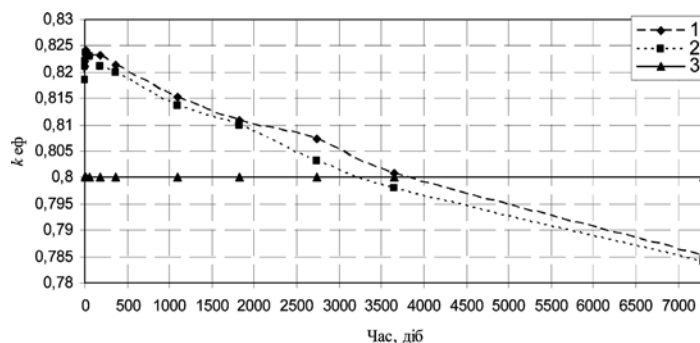


Рис. 14. Залежність  $k_{\text{эф}}$  від часу витримки для палива ВВЕР-1000 початкового збагачення 1,25 % по  $^{235}\text{U}$  та з середньою глибиною вигорання палива 12,5 МВт-доба/кг(U):  
1 — без урахування профілю вигорання;  
2 — з урахуванням профілю вигорання; 3 — свіже паливо

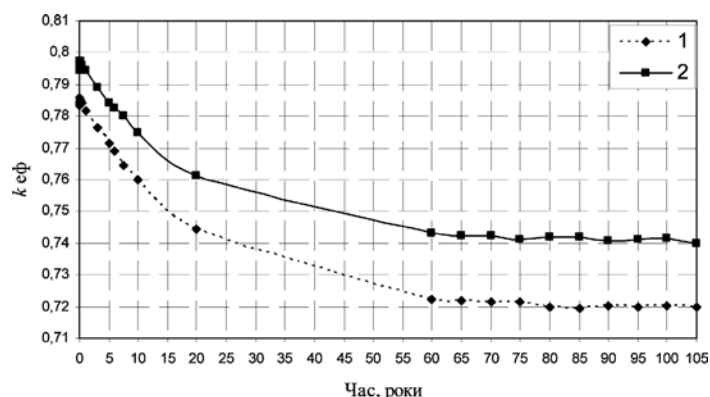


Рис. 15. Залежність  $k_{\text{эф}}$  від часу витримки для палива РВПК-1000 початкового збагачення 2,0 % по  $^{235}\text{U}$  та з середньою глибиною вигорання палива 20 МВт-доба/кг(U):  
1 — без урахування профілю вигорання;  
2 — з урахуванням профілю вигорання

від 0,2 до 1 %, тому графіки наводяться для одного з кодів. Максимальне відхилення в 2,5 % отримано при аналізі критичності в СВЯП-1 для палива РВПК з великим часом витримки при низьких густинах води, але дослідження цього моменту виходить за рамки цієї роботи.

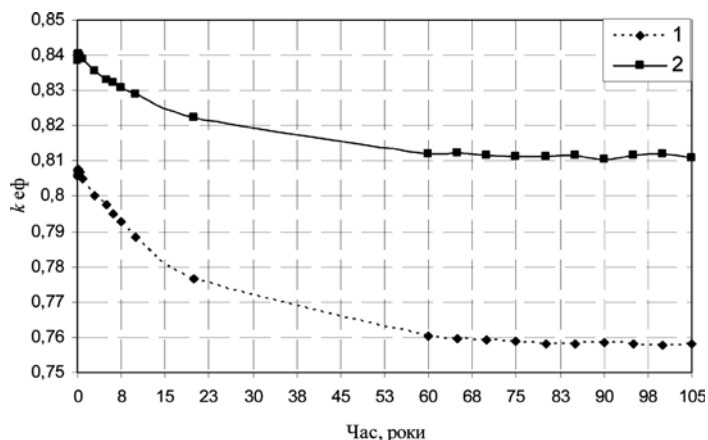
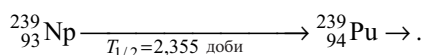
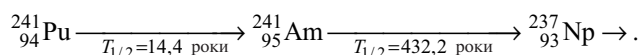


Рис. 16. Залежність  $k_{\text{эф}}$  від часу витримки для палива РВПК-1000 початкового збагачення 1,8 % по  $^{235}\text{U}$  та з середньою глибиною вигорання палива 15 МВт-доба/кг(U):  
1 — без урахування профілю вигорання;  
2 — з урахуванням профілю вигорання

З наведених графіків видно, по-перше, що важливим моментом при урахуванні кредиту вигорання є урахування розподілу вигорання палива за висотою ТВЗ, а, по-друге, маємо однакову тенденцію зміни  $k_{\text{эф}}$  залежно від часу витримки — збільшення в перші майже 400 годин після зупинки реакторної установки за рахунок напрацювання  $^{239}\text{Pu}$  ( $\beta^-$ -розпад  $^{239}\text{Np}$ ):



Далі, в межах від 5 до 50 років, спостерігається суттєве зниження  $k_{\text{эф}}$ , що пов'язано зі зменшенням концентрації  $^{241}\text{Pu}$  в результаті  $\beta^-$ -розпаду:



У наступні 50 років спостерігається незначна зміна розмножувальних властивостей системи, але зі стійким трендом на невелике збільшення  $k_{\text{эф}}$ .

## Висновки

У статті проаналізовано деякі проблеми обґрунтування ядерної безпеки систем зберігання ВЯП при використанні підходу burnup credit. Розрахунки виконано за допомогою двох кодів — MCNP та SCALE — з метою підвищення достовірності отриманих результатів.

Урахування вигорання палива при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання ВЯП РВПК-1000 та ВВЕР суттєво збільшує можливості системи щодо кількості ТВЗ, які зберігаються, з точки зору вимог ядерної безпеки. Видно, що врахування розподілу глибини вигорання за висотою ТВЗ необхідне при обґрунтуванні ядерної безпеки систем з ВЯП за допомогою підходу burnup credit, оскільки при цьому значення  $k_{\text{эф}}$  вище, ніж без профілювання. Неврахування профілю глибини вигорання палива вимагає додаткових консервативних припущень при виконанні розрахунків для обґрунтування ядерної безпеки з урахуванням вигорання палива.

Не менш важливим при підготовці вхідних даних є врахування допусків та посадок при виготовленні палива та ТВЗ.

Для подальшої роботи над методикою урахування вигорання палива систем зберігання та транспортування палива ВВЕР та РВПК важливо отримати експериментальні дані щодо ізотопного складу ВЯП. Наявність таких даних надасть можливість допрацювати методику розрахункового визначення ізотопного складу ВЯП, яка б забезпечувала достатній консерватизм при розрахунку критичності з використанням кредиту вигорання.

## Список використаної літератури

1. ПНАЭ Г-1029-91. 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 отработанного ядерного топлива сухого типа. — 2004. — С. 20.
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. Ковбасенко Ю. П. Впровадження сучасних методів оцінки ядерної безпеки систем поводження з відпрацьованим паливом на АЕС України / Ю. П. Ковбасенко, Є. М. Єременко, Є. І. Білодід, О. О. Дудка, Я. В. Костюшко // Ядерна та радіаційна безпека. — 2008. — № 1. — С. 17—21.
6. Гальченко В. В. Урахування вигорання ядерного палива при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання та транспортування відпрацьованого ядерного палива РВПК-1000 / В. В. Гальченко, В. І. Макодим, В. В. Соловій, В. В. Ількович // Ядерна фізика та енергетика. — 2010. — Т. 11, № 4. — С. 415420—.
7. Markova L. PBC Implementation Assessment Relating to Pool at Reactor of Dukovany NPP, Technical Meeting on the “Advances in applications of burnup credit to enhance spent fuel transportation, storage, reprocessing and disposition” London, UK, 29 August — 2 September 2005, NRI 12 256-R, August 2005.
8. DeHart M. D. Sensitivity and Parametric Evaluations of Significant Aspects of Burnup Credit for PWR Spent Fuel Packages, ORNL/TM-12973, Oak Ridge N.L. — 1995.
9. Havluj F. Bounding approach in BUC implementation in pool at VVER-440, 16<sup>th</sup> AER Symposium on VVER Reactor Physics and Nuclear Safety, Slovakia, NRI 12643-R. — 2006.
10. Ковбасенко Ю. П. Определение изотопного состава отработанного топлива реакторов РБМК для последующего анализа ядерной безопасности с учетом выгорания топлива / Ю. П. Ковбасенко, М. Л. Єременко // Ядерна та радіаційна безпека. — 2011. — № 2(50). — С. 35—42.
11. Hollenbach D. F. KENO-VI: A General Quadratic Version of the KENO Program / Hollenbach D. F., Petrie L. M., Landers N. F. // ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R7. Vol. II, Section F17 — 2004.
12. David R. Hamrin et al. SCALE: A modular code system for performing standardized computer analyses for licensing evaluation // ORNL/TM-2005/39. — 2005. — Version 5, Vols. I—III.
13. Briesmeister J. F., Ed. 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.
14. Hermann O. W. SAS2H: A Coupled One-Dimensional Depletion and Shielding Analysis Module / Hermann O. W., Parks C. V. // NUREG/CR-0200, Revision 6, (ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R6), Oak Ridge National Laboratory. — 1998.
15. Hermann O. W. ORIGEN-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Buildup and Decay, and Associated Radiation Source Terms / Hermann O. W., Westfall R. M. // NUREG/CR-0200, Revision 6, (ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R6), Oak Ridge National Laboratory. — 1998.

Отримано 28.11.2011.