

В. В. Гальченко¹, В. Л. Демьохін²¹ Київський науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут «Енергопроект», Київ
² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ**РОЗРАХУНКОВА ЗАЛЕЖНІСТЬ КОНЦЕНТРАЦІЇ ¹³⁷Cs
У ВІДПРАЦЬОВАНОМУ ЯДЕРНОМУ ПАЛИВІ ТА ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ
ДЛЯ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ**

Проаналізовано поведінку ізотопу ¹³⁷Cs з вигоранням для палива ВВЕР та РВПК. Отримано математичну залежність концентрації ¹³⁷Cs від глибини вигорання палива у вигляді $c_{137} [\text{кг/т(U)}] = 3,9 \cdot 10^{-5} \times e^{-\lambda_{137} \tau} \cdot \overline{\text{burn}} [\text{МВт} \cdot \text{доба/т(U)}]$. Результати розрахунку концентрації ¹³⁷Cs за запропонованою залежністю порівнювались із розрахунками по ORIGEN і STRUBUCS програмного комплексу SCALE 5 та з деякими експериментальними даними для палива РВПК. За запропонованою формулою для експериментальних зразків було визначено час витримки відпрацьованої тепловиділяючої збірки та проведено розрахунок ізотопного складу з урахуванням визначеного часу витримки. У результаті відхилення між експериментальними та розрахованими значеннями концентрацій по деяких ізотопах значно знизилась.

Ключові слова: вигорання палива, ¹³⁷Cs, математична залежність, ВВЕР, РВПК, ТВЗ, ізотопний склад, ВЯП.

Вступ

За кількістю ядерних енергоблоків, що знаходяться в експлуатації, Україна посідає одне з провідних місць у світі. Але разом з незаперечним позитивним ефектом це призводить до необхідності вирішення низки технічних питань. Важливе місце серед них належить питанням ядерної і радіаційної безпеки, у тому числі при роботі з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП), що вимагає контролю його стану, у першу чергу вигорання, ізотопного складу ядерних матеріалів і продуктів поділу.

Для загального вирішення цієї задачі використовуються різні розрахункові методики. Порівняння результатів, отриманих за їхньою допомогою, з експериментальними даними дає впевненість у коректності розрахункових методик і надає можливість використовувати їх для врахування кредиту вигорання при аналізі ядерної безпеки систем з ВЯП.

У різних роботах, присвячених визначенню глибини вигорання і часу витримки ВЯП, робляться висновки, що найменшу експериментальну похибку мають методи, що засновані на визначенні співвідношень активностей ізотопів ¹⁰⁶Rh/¹³⁷Cs, ¹⁴⁴Pr/¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs. Серед іншого ці методи вимагають знання часу витримки конкретної тепловиділяючої збірки (ТВЗ), який досить часто виявляється невідомим.

Так, у роботах [1 - 3] та інших було зроблено висновок, що відношення активності ізотопів ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs і ¹⁴⁴Pr/¹³⁷Cs дає можливість визначення глибини вигорання і часу витримки в межах 0,5 - 5 років з похибкою до 5 %. У роботі [4] стверджується, що при використанні відношень площ γ-ліній ¹⁰⁶Rh/¹³⁷Cs і ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs похибка визначення величин глибини вигорання палива і часу витримки не перевищує 10 %.

На підставі таких досліджень пропонуються в тому числі й методики для розрахунку ізотопного складу ВЯП для проведення аналізу критичності систем з паливом або розрахунку традиційних характеристик контейнерів з ВЯП.

У той же час автори цих і аналогічних робіт, як правило, не зважають на відсутність інформації щодо історії роботи в реакторі конкретної ТВЗ. Це, беручи до уваги відносно невеликі періоди напіврозпаду ¹³⁴Cs, ¹⁰⁶Ru (материнський для ¹⁰⁶Rh) і ¹⁴⁴Ce (материнський для ¹⁴⁴Pr), може призводити до похибок, величину яких навіть важко обрахувати. Але елементарне моделювання показує, що при одній й тій самій глибині вигорання вказані вище відношення активностей можуть відрізнятися на 5 - 10 %. Окрім того, зазначені відношення активностей ізотопів залежать від початкового збагачення палива.

Таким чином, при відсутності з різних причин точних даних з історії експлуатації ТВЗ при проведенні розрахунків ізотопного складу й порівнянні їх з експериментальними даними можна зробити

© В. В. Гальченко, В. Л. Демьохін, 2013

хибні висновки щодо підходів при формуванні початкових і граничних умов для створення розрахункових схем і проведенні розрахунків.

Дослідження поведінки ^{137}Cs при вигоранні палива

Вихід ^{137}Cs у результаті поділу ^{235}U «тепловими» нейтронами становить $w_5 = 6,35\%$, у результаті поділу ^{239}Pu - $w_9 = 6,5\%$, у результаті поділу ^{233}U - $w_3 = 6,5\%$ [5]. Тобто прямий вихід ^{137}Cs дуже мало залежить від типу подільного матеріалу. Ця особливість і достатньо просте вимірювання γ -лінії 661,6 кеВ дає змогу визначати концентрацію ^{137}Cs для досить точного визначення загальної глибини вигорання ТВЗ.

Проаналізуємо зміну концентрації ^{137}Cs з вигоранням палива реакторів РВПК-1000, ВВЕР-1000 та ВВЕР-440 з використанням різних припущень при розрахунку вигорання ТВЗ. З цієї метою було використано модулі ORIGEN-S [6] і STARBUCS [7] програмного комплексу SCALE 5 [8]. Підходи щодо створення розрахункових схем ТВЗ для вказаних типів реакторів та відповідні припущення і варіації щодо типів розрахунків представлено в [11, 12].

На рис. 1 наведено графіки розрахунку залежності маси ^{137}Cs від глибини вигорання палива для ТВЗ реакторів ВВЕР та РВПК. З графіків добре видно лінійну залежність маси ^{137}Cs в одній ТВЗ з вигоранням палива. Чим вище початкове збагачення палива по ^{235}U , тим дещо менше напруцьовується ^{137}Cs , що пов'язано з тим, що вихід ^{137}Cs на ^{239}Pu , хоч і незначно, але все ж таки вищий, ніж на ^{235}U . Незначно відрізняється величина виходу, малопомітно відрізняються й кінцеві маси.

Наприклад, у роботах [13, 14] для палива РWR також показано, що концентрація ^{137}Cs лінійно залежить від глибини вигорання палива й слабо залежить від рівня потужності та часу знаходження ТВЗ у реакторі.

Перейдемо від абсолютних одиниць маси (грам) до відносних – кілограм ^{137}Cs на тонну металевого урану (кг/т(U)). Такий перехід дає змогу позбутися залежності як від величини початкового збагачення палива по ^{235}U , так і від типу реактора, що демонструє рис. 2. З нього добре видно, що для всіх представлених типів ТВЗ частка ізоотопу ^{137}Cs лінійно залежить від глибини вигорання палива, а результати настільки мало відрізняються між собою для різних типів ТВЗ, що лежать у межах статистичної еквівалентності й визначаються точністю завдання початкової маси урану в касеті. При цьому результат розрахунку практично не залежить від тих

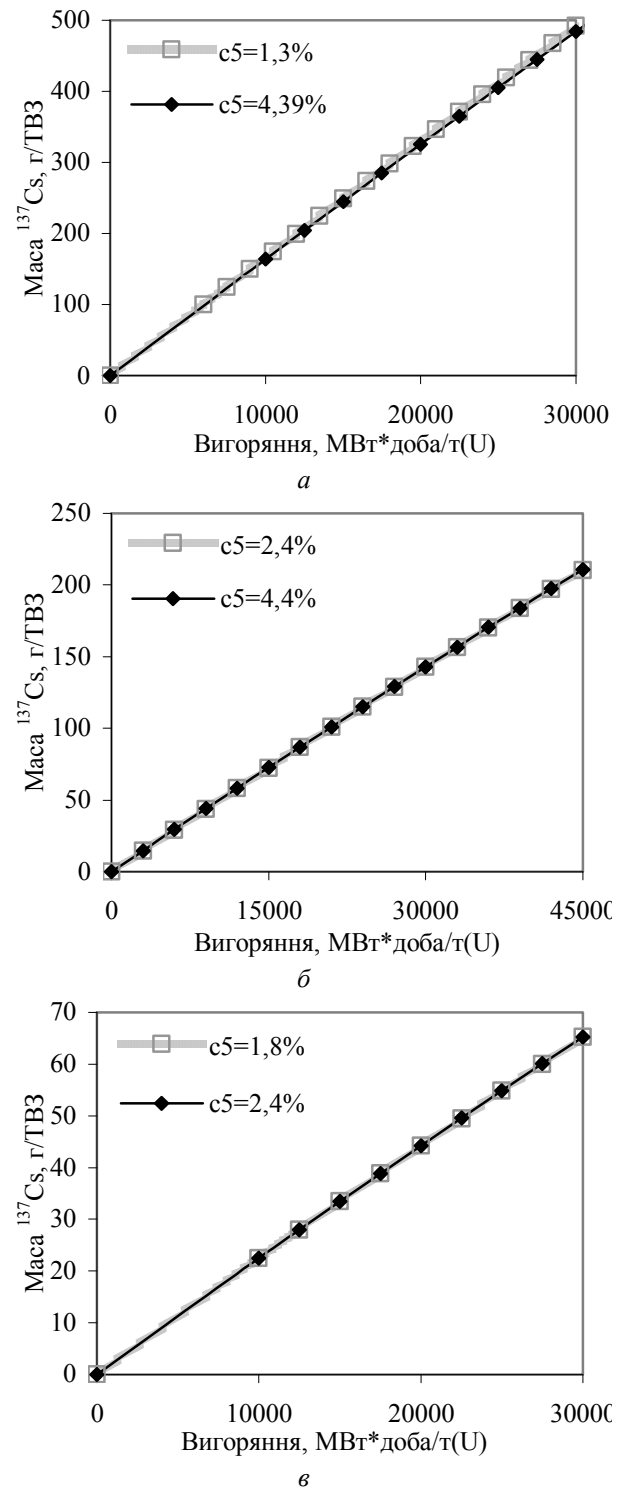


Рис. 1. Залежність маси ^{137}Cs від глибини вигорання палива для ТВЗ реакторів ВВЕР-1000 (а), ВВЕР-440 (б) і РВПК-1000 (в) різних початкових збагачень по ^{235}U (c5).

припущень, які робилися при формуванні розрахункової схеми, типу розрахункового модуля та рівня потужності реакторної установки. Наприклад, на рис. 3 наведено залежності частки цезію від глибини вигорання для палива ВВЕР-440 та РВПК-1000 з урахуванням різних чинників.

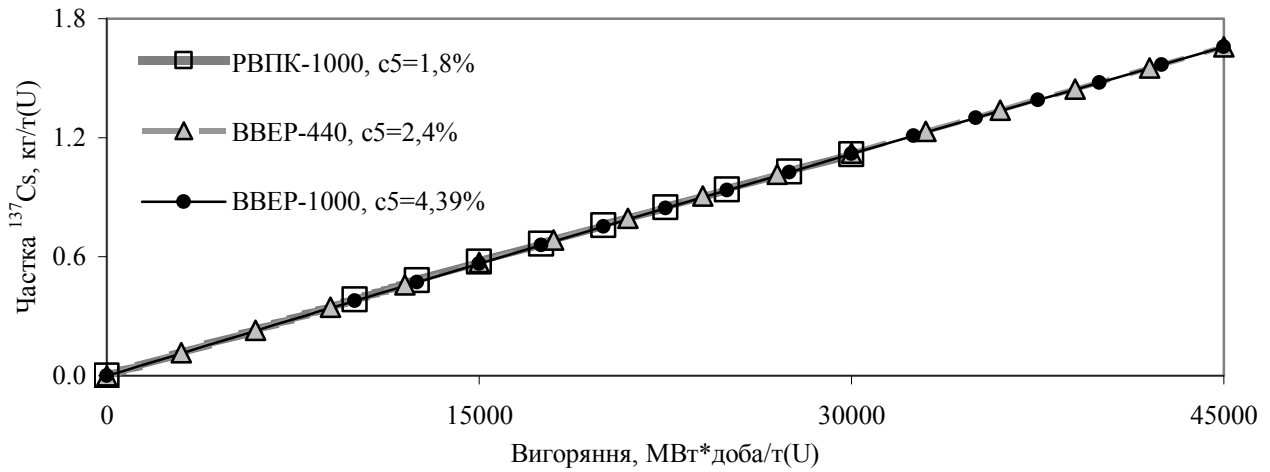


Рис. 2. Залежність частки виходу ¹³⁷Cs від глибини вигорання для палива різних типів реакторів.

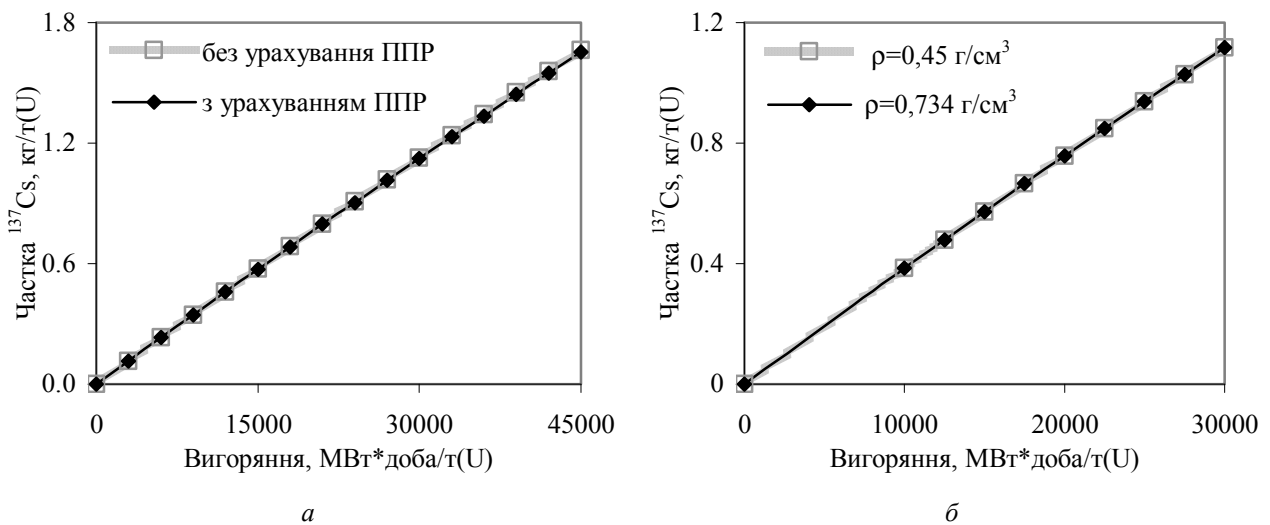


Рис. 3. Залежність частки цезію від глибини вигорання для палива різних типів реакторів: а – ВВЕР-440 з урахуванням та без урахування часу витримки палива на проведення планово-попереджувального ремонту (ППР); б – РВПК-1000 для різної густини теплоносія (ρ).

Отримання аналітичної залежності

Знайдемо аналітичну залежність частки ¹³⁷Cs від глибини вигорання. Рівняння прямої задається як $y = kx + b$. Враховуючи, що початкова концентрація ізотопу цезію у свіжому паливі дорівнює 0, коефіцієнт b має дорівнювати 0. Тобто частку цезію шукатимемо у вигляді

$$c_{137} = k \cdot \text{burn} , \tag{1}$$

де c_{137} – частка цезію, кг/т(U); burn – глибина вигорання палива, МВт · доба/т(U). Коефіцієнт пропорційності k знайдемо зі стандартного рівняння напрацювання цезію в реакторі

$$\frac{dN_{137}}{dt} = (w_5 N_5 \sigma_{f5} + w_9 N_9 \sigma_{f9}) \phi - \lambda_{137} N_{137} , \tag{2}$$

де N_{137} – ядерна концентрація ¹³⁷Cs; w_5, N_5, σ_{f5} – вихід ¹³⁷Cs під час поділу ²³⁵U, ядерна концентрація ²³⁵U, мікроскопічний переріз поділу ²³⁵U відповідно; w_9, N_9, σ_{f9} – вихід ¹³⁷Cs під час поділу ²³⁹Pu, ядерна концентрація ²³⁹Pu, мікроскопічний переріз поділу ²³⁹Pu відповідно; ϕ – густина потоку нейтронів; λ_{137} – стала розпаду для ¹³⁷Cs. Рівняння (2) записано без урахування інших, менш значущих, шляхів напрацювання ¹³⁷Cs в реакторі, що не впливає на подальші вкладки та результати.

З урахуванням початкової умови $b = 0$ стандартне рішення рівняння має вигляд

$$N_{137} = e^{-\lambda_{137}t} \int_0^t (w_5 N_5 \sigma_{f5} + w_9 N_9 \sigma_{f9}) \phi e^{\lambda_{137}t} dt . \tag{3}$$

Оскільки вихід цезію мало залежить від виду матеріалу, що ділиться в реакторі, то припустимо, що $w_3 = w_9 = w_{137}$. Крім того, врахуємо, що $\Sigma_{f5} = N_5 \sigma_{f5}$, $\Sigma_{f9} = N_9 \sigma_{f9}$ – макроскопічні перерізи поділу відповідно на ²³⁵U і ²³⁹Pu, а $\Sigma_f = \Sigma_{f5} + \Sigma_{f9}$ – макроскопічний переріз поділу для палива в припущенні, що в паливі поділ відбувається лише на ²³⁵U і ²³⁹Pu. Такого припущення можна й не робити, оскільки вихід ¹³⁷Cs приблизно однаковий для всіх паливних ізотопів, що діляться в реакторах під дією теплових нейтронів, то можливо використовувати величини w_{137} і Σ_f просто як вихід цезію в процесі поділу палива і макроскопічний переріз поділу для палива. Остаточо рівняння (3) буде мати вигляд

$$N_{137} = e^{-\lambda_{137}t} \int_0^t w_{137} \Sigma_f \phi e^{\lambda_{137}t} dt. \quad (4)$$

Потужність реакторної установки можна представити як $Q = \frac{\Sigma_f E_f \phi V_f}{k_V}$, де E_f – енергія, що виділяється на один акт поділу, V_f – об'єм палива в активній зоні, k_V – об'ємний коефіцієнт нерівномірності енерговиділення. Тоді рівняння (4) прийме вигляд

$$N_{137} = e^{-\lambda_{137}t} \int_0^t \frac{w_{137}}{E_f} \cdot \frac{Q}{V_f} \cdot k_V e^{\lambda_{137}t} dt. \quad (5)$$

Використовуючи теорему про середнє, отримуємо

$$N_{137} = e^{-\lambda_{137}t} \cdot e^{\lambda_{137}t^*} \cdot \frac{w_{137}(t^*)}{E_f(t^*)} \cdot \frac{k_V(t^*)}{V_f} \cdot \int_0^t Q(t) dt. \quad (6)$$

Інтеграл у цій формулі – це енергія, що вироблена паливом за час, що розглядається. Виходячи з того, що кожна з функцій, яка містить t^* , є гладкою, неважко показати, що її значення в цьому виразі несуттєво відрізняється від середнього за час, що розглядається. Об'єм палива виразимо через його масу M_f і густину γ_f , при

цьому врахуємо, що $M_U = M_f \cdot \frac{A_U}{A_{UO_2}}$. Тоді

$$N_{137} = \frac{w_{137} \gamma_f k_V A_{UO_2}}{E_f A_U} \cdot burn \cdot e^{-\lambda_{137}t}. \quad (7)$$

Приведемо в цьому рівнянні ліву частину до величини частки цезію (кг/т(U)). Для цього пом-

ножимо ліву і праву частину рівняння на атомну вагу ¹³⁷Cs і розділимо на число Авагадро, окрім того врахуємо розмірності величин й отримаємо

$$c_{137} = \frac{w_{137} A_{137}}{E_f N_A} \cdot C \cdot burn \cdot e^{-\lambda_{137}t}, \quad (8)$$

де коефіцієнт C враховує різні розмірності величин.

З рівняння (8) добре видно, що напрацювання ¹³⁷Cs прямо пропорційне його виходу в процесі поділу і середньому значенню глибини вигоряння палива.

Враховуючи числові значення величин, які входять у рівняння (8) і використовуючи величину ефективної енергії, що виділяється на один акт поділу (тобто енергія, що виділяється на один акт поділу, мінус енергія, яка втрачається з нейтрино), отримуємо

$$c_{137} [\text{кг/т(U)}] = 3,9 \cdot 10^{-5} \times e^{-\lambda_{137}t} \cdot burn [\text{МВт} \cdot \text{доба/т(U)}]. \quad (9)$$

Час τ – це час, за який ТВЗ у реакторі «набе- рю» глибину вигоряння $burn$, розраховується як

$\tau = \frac{burn \cdot M_U}{q \cdot 1000} \cdot 24 \cdot 3600$, де $burn$ – глибина вигоряння; МВт · доба/т(U); M_U – маса металевого

урану в одній ТВЗ, кг; $\bar{q} = \frac{Q}{N_{fa}}$ – середнє значен-

ня енерговиділення на одну ТВЗ для даного типу реактора, МВт; Q – теплова потужність реакторної установки, МВт; N_{fa} – кількість ТВЗ в активній зоні даного типу реактора.

Значення коефіцієнта $3,9 \cdot 10^{-5}$, залежить від складових, які вказано вище, і воно незначно змінюється в діапазоні від $3,802 \cdot 10^{-5}$ до $4,033 \cdot 10^{-5}$.

Перевірка коректності оцінки концентрації ¹³⁷Cs за залежністю

Для оцінки прогнозування зміни концентрації ¹³⁷Cs за залежністю (9) було проведено ряд розрахунків з використанням модулів ORIGEN і STARBUCS, програмного комплексу SCALE 5 для палива РВПК і ВВЕР. Результати деяких з них представлено в табл. 1.

Видно, що відхилення в розрахунках мають несуттєві значення. Для низьких збагачень при невеликих глибинах вигоряння спочатку величина концентрації йде з недооцінкою, а зі збільшенням глибини вигоряння переходить у додатну область,

Таблиця 1. Величина відхилення між значеннями концентрації ^{137}Cs , отриманими за розрахунками по ORIGEN і за залежністю (9)

Глибина вигорання, МВт·доба/т(U)	Відхилення, %		Глибина вигорання, МВт·доба/т(U)	Відхилення, %	
	ВВЕР-1000, $c_5 = 4,6 \%$	ВВЕР-440, $c_5 = 2,4 \%$		РВПК-1000, $c_5 = 1,8 \%$	РВПК-1000, $c_5 = 1,8 \%$
3000	0,33	-1,32			
6000	0,19	-1,05	10000		-1,69
9000	0,04	-0,79	12500		-1,30
12000	-0,10	-0,48	15000		-0,89
15000	-0,22	-0,19	17500		-0,47
18000	-0,34	0,12	20000		-0,04
21000	-0,46	0,44	22500		0,37
24000	-0,58	0,77	25000		0,80
27000	-0,72	1,07	27500		1,24
30000	-0,79	1,40	30000		1,67
33000	-0,93	1,75			
36000	-1,04	2,12			
39000	-1,14	2,43			
42000	-1,22	2,76			
45000	-1,35	3,10			

а для палива з більшим збагаченням – навпаки. Це пояснюється різною швидкістю напрацювання плутонію в паливі з різним початковим збагаченням по ^{235}U і відповідно його кількістю та вкладом у процес поділу відносно ^{235}U .

У роботі [10] наведено деякі експериментальні дані по ізотопному складу палива РВПК-1000

з роботи [16]. Основною особливістю щодо зазначених експериментальних даних є те, що умови вигорання палива та подальша витримка невідомі. Похибка вимірювання вказана на рівні 7 %. Порівняння для ^{137}Cs цих даних з розрахунками за залежністю (9) наведено на рис. 4.

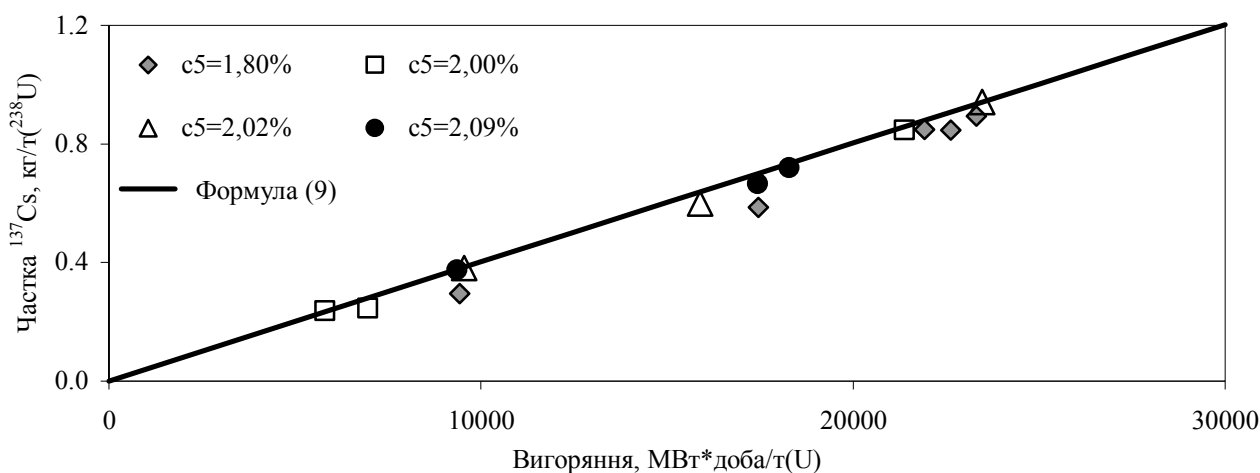


Рис. 4. Порівняння експериментальних даних для ТВЗ різного початкового збагачення з результатами розрахунків за формулою (9).

Видно, що пряма, обрахована за залежністю (9), погоджується з експериментальними точками, але знаходиться незначно вище за деякі з них. Справа в тому, що ТВЗ, для яких було отримано експериментальні значення, все одно мають певний термін витримки. З часом витримки залежність зберігає свою лінійність, але змінюється кут нахилу прямої, як це видно на рис. 5. З нього добре видно, що поправка на час витримки палива дає досить добрий збіг із різ-

ним набором експериментальних точок.

Використання залежності (9) може бути корисним при обробці експериментальних даних і порівнянні їх з різними розрахунковими методиками. За концентрацією ізоотопу ^{137}Cs можна оцінити час витримки ТВЗ, для якої наведено експериментальні дані, якщо цей час апріорно невідомий, і відповідно порівнювати експериментально отриманий ізотопний склад палива з розрахунковим з урахуванням витримки.

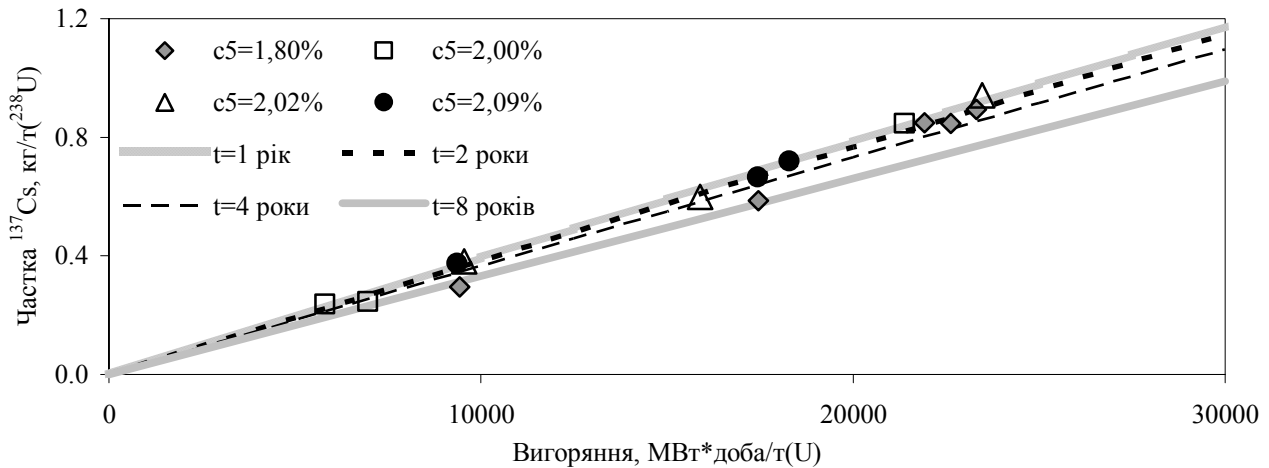


Рис. 5. Порівняння експериментальних даних для палива РВПК-1000 з результатами розрахунків за формулою (9) з урахуванням часу витримки ТВЗ.

Час витримки відпрацьованої ТВЗ визначається за формулою $t = -\frac{\ln(c/c_0)}{\lambda}$, де c_0 – концентрація ^{137}Cs , розрахована за формулою (9), c – концентрація ^{137}Cs , що наведена в експериментальних даних.

З урахуванням цього знайденого часу витримки похибка в розрахунках по деяких ізотопах з малими і середніми періодами напіврозпаду або по тих, які ще напрацьовуються певний час після вивантаження, зменшилась (табл 2).

Таблиця 2. Порівняння розрахункових та експериментальних даних по деяких ізотопах

Ізотоп	Відхилення, % без урахування витримки	Відхилення, % з урахуванням витримки
^{237}Np	-3,26	-0,87
^{238}Pu	-17,63	-4,72
^{239}Pu	-4,14	-2,22
^{143}Nd	-16,83	-13,40
^{144}Nd	-69,74	-34,67

Висновки

Отримана в даній роботі залежність зміни концентрації ^{137}Cs з глибиною вигоряння для палива РВПК та ВВЕР і початковим збагаченням від 1 до 5 % по ^{235}U дає хороший збіг з розрахунковими та деякими експериментальними даними.

Застосування запропонованої залежності може бути корисним при аналізі експерименталь-

них даних, для створення відповідної методики розрахунку ізотопного складу для кожного типу ТВЗ, для цілей подальшого застосування кредиту вигоряння палива. Окрім того, оскільки дослідними зразками є різні ділянки однієї і тієї ж ТВЗ, то використовуючи запропоновану залежність, можливо, роблячи припущення, спробувати відновити деякі експлуатаційні характеристики.

Необхідно відзначити, що в якості однієї із суттєвих переваг використання методів, що засновані на визначенні співвідношень активностей, зазначається використання відносної ефективності γ -детектора замість абсолютної, яка необхідна для визначення концентрації ^{137}Cs . Але комплексний аналіз показує: по-перше, ^{137}Cs належить до зразкових стандартних γ -джерел, а визначення відносної ефективності вимагає побудови відповідної кривої, що вносить додаткову похибку; по-друге, за інших рівних умов відносна похибка визначення відношення площ двох γ -ліній явно більша, ніж однієї з них. Таким чином, указана перевага в дійсності не є суттєвою. Більш того, при часі витримки ТВЗ у декілька років ситуація може змінитися на протилежну: меншу похибку буде мати визначення абсолютної концентрації ^{137}Cs , ніж визначення відношень активностей.

Порівняльні розрахунки з експериментальними даними і запропонованою залежністю варто продовжувати. Автори будуть вдячні, якщо такі роботи будуть виконані іншими дослідниками, які мають відповідний експериментальний матеріал.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Dragnev T., Diaz-Duque R., Pontes B.* Safeguards Gamma Measurements on Spent MTR Fuel // International Atomic Energy Agency report IAEA/STR-41 (May 1973).
2. *Hanna G. L.* Gamma-Ray Measurement of Spent HTFAR Fuel Elements for Safeguards Verification: Part 1, Experimental Evaluation of Method // ASO/R2 (July 1978).
3. *Маслов О.В.* Технические средства и методическое обеспечение определения глубины выгорания отработавшего ядерного топлива, распределение продуктов деления по сечению ТВС в процессе перегрузки // Тр. Одес. политехн. ун-та. - 2007. - Вып. 2 (28). - С. 65 - 71.
4. *Опаловский В. А.* Разработка расчетной методики моделирования радиационных характеристики облученного ядерного топлива: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 2007.
5. *Гусев Н.Г., Рубцов П.М., Коваленко В.В., Колобашикин В.М.* Радиационные характеристики продуктов деления: Справочник. - М.: Атомиздат, 1974. - С. 224.
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, September 1998.
7. *Gaud I.C., Bowman S.M.* STURBUCS: A SCALE control module for automated criticality safety analyses using burnup credit // NUREG/CR-0200, Revision 7, (ORNL/NUREG/CSD-2/VI/R7), Oak Ridge National Laboratory, September 2004.
8. *Hamrin D.R.* SCALE: A modular code system for performing standardized computer analyses for licensing evaluation // ORNL/TM-2005/39. - 2005. - Version 5. - Vol. I - III.
9. *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, September 1998.
10. *ORIGEN-ARP* cross-section libraries for the RBMK-1000 system / Prepared by D. B. Murphy // ORNL/TM-2006/139. Oak Ridge National Laboratory. November 2006, p. 49.
11. *Гальченко В.В., Макодим В.І., Соловійов В.В., Ількович В.В.* Урахування вигоряння ядерного палива при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання та транспортування відпрацьованого ядерного палива РВПК-1000 // Ядерна фізика та енергетика - 2010. - Т. 11, № 4. - С. 415 - 420.
12. *Гальченко В.В., Соловійов В.В., Городніча О.С.* Урахування вигоряння ядерного палива при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання відпрацьованого ядерного палива // Ядерна та радіаційна безпека. - 2012. - Вип. 2 (54). - С. 45 - 50.
13. *US Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management.* Topical Report on Actinide Only Burnup Credit for PWR Spent Nuclear Fuel Packages // DOE/RW-0472 Rev. 1, May 1997.
14. *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials* // NUREG/CR-5550 LA - UR - 90 - 732.
15. *Department of Safeguards, IAEA.* SFAT Attribute Verification of LWR Spent Fuel // SG - NDA - 33 Rev.0, IAEA, March 1991.
16. *Makarova T.* Investigation of Spent Fuel from WWER-440, WWER-100 and RBMK-1000 // Report prepared for IAEA by the Khlopin Radium Institute, March 2004.

В. В. Гальченко, В. Л. Демехин

**РАСЧЕТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ^{137}Cs
В ОТРАБОТАВШЕМ ЯДЕРНОМ ТОПЛИВЕ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Проанализировано поведение ^{137}Cs с выгоранием для топлива ВВЭР и РБМК. Получена математическая зависимость концентрации изотопа ^{137}Cs от глубины выгорания топлива в виде $c_{137} [\text{кг/т(U)}] = 3,9 \cdot 10^{-5} \times e^{-\lambda_{137} \tau} \cdot \overline{\text{burn}} [\text{МВт} \cdot \text{сут/т(U)}]$. Результаты расчета концентрации ^{137}Cs при помощи предложенной зависимости сравнивались с расчетами по ORIGEN и STRUBUCS программного комплекса SCALE 5 и с некоторыми экспериментальными данными по топливу РБМК. По предложенной зависимости для экспериментальных образцов было определено время выдержки тепловыделяющих сборок и проведен расчет изотопного состава с учетом определенного времени выдержки. Показано, что в результате сходимости между экспериментальными и расчетными значениями концентрации по некоторым изотопам значительно улучшилась.

Ключевые слова: выгорание топлива, ^{137}Cs , математическая зависимость, ВВЭР, РБМК, ТВС, изотопный состав, ОЯТ.

V. V Galchenko, V. L. Diemokhin

**MATHEMATICAL DEPENDENCE FOR THE ^{137}Cs CONCENTRATION
IN SPENT NUCLEAR FUEL AND ITS USING FOR EXPERIMENTAL DATA PROCESSING**

The ^{137}Cs behavior during burn up for VVER and RBMK fuel were analyzing. Mathematical dependence for the ^{137}Cs concentration from fuel burn up in the form of $c_{137}[\text{kg/t(U)}] = 3,9 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-\lambda_{137}\tau} \cdot \overline{burn}[\text{MW} \cdot \text{day/t(U)}]$ is obtained. The formula's calculation results on ^{137}Cs concentration were compared with ORIGEN and STURBUCS of SCALE-5 computer codes system calculations with some RBMK-1000 fuel experimental data. Using offered dependence the RBMK experimental samples cooling time were founded and isotopic compositions calculations were made with proper cooling time. Difference on some isotopes between calculation and experimental data were reducing.

Keywords: fuel burnup, ^{137}Cs , mathematical dependence, VVER, RBMK, fuel assembly, isotopes compositions, spent nuclear fuel.

Надійшла 05.03.2013

Received 05.03.2013