

**АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА**  
**ATOMIC ENERGY**

УДК 621.039.7

<https://doi.org/10.15407/jnpae2019.01.026>

**П. М. Русінко\*, Л. Л. Литвинський**

*ТОВ «АЕСКАР», Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: pavel.rusinko@gmail.com

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РАДІОНУКЛІДНОГО СКЛАДУ ВИСОКОАКТИВНИХ  
ВІДХОДІВ ВІД ПЕРЕРОБКИ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА  
РЕАКТОРІВ ВВЕР-440 ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ВО «МАЯК»**

Наведено результати моделювання радіонуклідного складу осклованих високоактивних відходів від переробки відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР-440 за технологією ВО «Маяк» для різних значень вигорання вихідного палива. Проаналізовано внесок різних радіонуклідів у питому активність таких відходів у моменти часу від 23 до 10<sup>8</sup> років. Визначено основні продукти поділу та актиноїди, внесок яких у сумарну питому активність таких відходів є суттєвим.

*Ключові слова:* відпрацьоване ядерне паливо, ВВЕР-440, оскловані високоактивні відходи, радіонуклідний склад.

### 1. Вступ

Починаючи з 1993 р. і по теперішній час, відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП) реакторів ВВЕР-440 Рівненської АЕС вивозиться в Російську Федерацію на ФДУП ВО «Маяк» з метою технологічного зберігання та наступної переробки. Передбачено повернення осклованих високоактивних відходів (ВАВ) від переробки ВЯП в Україну [1].

Технологія переробки ВЯП ВВЕР-440 включає рубку відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ) на фрагменти та розчинення ВЯП, відділення цільових продуктів переробки (ізотопів урану, плутонію і непунію) від залишкових продуктів поділу та актиноїдів. Рідкі ВАВ, що містять продукти поділу разом з америцієм, кюрієм і невилученими цільовими продуктами переробки, оскловуються [2, 3]. Відповідно радіонуклідний склад осклованих ВАВ, що будуть повертатися в Україну, залежить від радіонуклідного складу ВТВЗ, які надійшли на переробку, та коефіцієнтів переходу радіонуклідів у оскловані відходи, що визначаються технологією переробки.

У зв'язку з високою активністю експериментальне визначення активності для більшості радіонуклідів у ВТВЗ утруднене і для рішення цієї задачі, зазвичай, використовуються розрахункові методи [4 - 7].

Радіаційний вплив радіоактивних відходів на людину та навколишнє середовище визначається активностями радіонуклідів, що включені у відходи. Враховуючи, що періоди напіврозпаду радіонуклідів, що включаються у оскловані високоактивні відходи від переробки ВЯП, суттєво відрізняються, внесок таких радіонуклідів буде помітно знизитися в часі.

### 2. Вихідні дані та методика розрахунків

Розглядалися такі продукти поділу: <sup>3</sup>H, <sup>90</sup>Sr, <sup>90</sup>Y, <sup>93</sup>Zr, <sup>93m</sup>Nb, <sup>99</sup>Tc, <sup>106</sup>Ru, <sup>106</sup>Rh, <sup>107</sup>Pd, <sup>125</sup>Sb, <sup>125m</sup>Te, <sup>129</sup>I, <sup>134</sup>Cs, <sup>135</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>137m</sup>Ba, <sup>144</sup>Ce, <sup>144</sup>Pr, <sup>147</sup>Pm, <sup>151</sup>Sm, <sup>154</sup>Eu, <sup>155</sup>Eu. Розглядалися такі актиноїди: <sup>232</sup>U, <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>236</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>237</sup>Np, <sup>239</sup>Np, <sup>236</sup>Pu, <sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu, <sup>242</sup>Pu, <sup>241</sup>Am, <sup>242</sup>Am, <sup>242m</sup>Am, <sup>243</sup>Am, <sup>242</sup>Cm, <sup>243</sup>Cm, <sup>244</sup>Cm.

Вихідні дані для визначення активностей радіонуклідів у ВТВЗ бралися з бази даних за початковими концентраціями радіонуклідів у ВТВЗ, яка створена за результатами розрахунків, проведених у РНЦ «Курчатовський інститут», за допомогою програми ТВС-М [8]. Ця програма використовується на російських АЕС для розрахунку радіонуклідного складу і паспортизації ВТВЗ ВВЕР-440, які направляються на переробку на ФДУП ВО «Маяк». База даних містить дані про питомий вміст продуктів поділу та актиноїдів, зазначених вище (у кг/т урану), для робочих касет (РК) з вихідним збагаченням 1,6, 2,4, 3,6, 3,8, 4,2, 4,4 % та АРК із вихідним збагаченням 1,6, 2,4, 3,6 % для різних вигорань із шагом 0,5 ГВт·діб/т урану.

Розрахунок питомої активності радіонуклідів у осклованих ВАВ від переробки ВТВЗ ВВЕР-440 на довільний момент часу виконувався за допомогою власної програми. Для розрахунку радіонуклідів розташовані в такому порядку, що ядра, які можуть розпадатися в *i*-й радіонуклід, мають номери менше *i*. Постійні розпаду радіонуклідів розраховуються за формулою

$$\lambda_i = \frac{\ln(2)}{T_{1/2(i)}}, \quad (1)$$

де  $T_{1/2(i)}$  – період напіврозпаду *i*-го радіонукліда, с.

© П. М. Русінко, Л. Л. Литвинський, 2019

Вихідна кількість ядер радіонуклідів у ВАВ визначається за формулою

$$N_{0i} = k_i \cdot N_A \cdot \frac{m_{0i} \cdot 1000}{M_i}, \quad (2)$$

де  $k_i$  – коефіцієнт переходу  $i$ -го радіонукліда у ВАВ;  $N_A$  – число Авогадро, моль<sup>-1</sup>;  $m_{0i}$  – початкова питома концентрація  $i$ -го радіонукліда у ВТВЗ, кг/т урану;  $M_i$  – молярна маса  $i$ -го радіонукліда, г/моль.

Коефіцієнти для врахування послідовного розпаду радіонуклідів розраховуються за формулою

$$d_{ji} = \begin{cases} \frac{\rho_{ji} \cdot \lambda_j}{\lambda_j - \lambda_i} & (\text{для } j = i - 1) \\ \frac{(\rho_{ji} \cdot \lambda_j + \sum_{k=j+1}^{i-1} d_{ki} \cdot \rho_{ki} \cdot \lambda_k)}{\lambda_j - \lambda_i} & (\text{для } 1 \leq j < i - 1) \end{cases}, \quad (3)$$

де  $\rho_{ji}$  – коефіцієнт розгалуження (імовірність розпаду  $j$ -го ядра в  $i$ -те);  $\lambda_i$  – постійна розпаду  $i$ -го радіонукліда, с<sup>-1</sup>.

Нормувальні коефіцієнти розраховуються за формулою

$$C_i = N_{0i} + \sum_{j=1}^{i-1} d_{ji} \cdot N_{0j}, \quad (4)$$

де  $N_{0i}$  – вихідна кількість ядер  $i$ -го радіонукліда у ВАВ;  $d_{ji}$  – коефіцієнти для врахування послідовного розпаду радіонуклідів.

Кількість ядер  $i$ -го радіонукліда на момент часу  $T$  визначається за формулою

$$N_i(T) = C_i \cdot e^{-\lambda_i T} - \sum_{j=1}^{i-1} d_{ji} \cdot N_j(T), \quad (5)$$

де  $C_i$  – нормувальний коефіцієнт для  $i$ -го радіонукліда;  $\lambda_i$  – постійна розпаду  $i$ -го радіонукліда, с<sup>-1</sup>;  $d_{ji}$  – коефіцієнти для врахування послідовного розпаду радіонуклідів.

Питома активність радіонуклідів на момент часу  $T$  розраховується за формулою

$$A_i(T) = \frac{\lambda_i \cdot N_i(T)}{z \cdot \rho}, \quad (6)$$

де  $\lambda_i$  – постійна розпаду  $i$ -го радіонукліда, с<sup>-1</sup>;  $N_i(T)$  – кількість ядер  $i$ -го радіонукліда на момент часу  $T$ ;  $z$  – вихід (напрацювання) ВАВ, м<sup>3</sup>/т;  $\rho$  – густина осклованих ВАВ, г/м<sup>3</sup>.

Розрахунки виконувалися для моментів часу: 23 (момент повернення ВАВ в Україну), 100, 300, 1 000, 10 000, 100 000, 1 000 000, 10 000 000,

100 000 000 років.

Для моделювання радіонуклідного складу ВАВ від переробки ВТВЗ використовувалися такі характеристики технології переробки ВТВЗ на ВО «Маяк»:

частка включення в оскловані ВАВ цільових продуктів переробки, які вилучають при переробці ВЯП (ізотопи урану, плутонію і нептунію), становить 2 % від їхнього вмісту у ВТВЗ [2, 9];

частка включення в оскловані ВАВ ізотопів <sup>99</sup>Tc та <sup>129</sup>I становить 1 % від їхнього вмісту у ВТВЗ [10];

частка включення в оскловані ВАВ інших радіонуклідів, що розглядалися, консервативно прийнята 100 % від їхнього вмісту у ВТВЗ;

вихід (напрацювання) ВАВ становить 0,6 м<sup>3</sup>/т важкого металу ВЯП [9];

густина ВАВ 2500 кг/м<sup>3</sup> [9].

Радіонуклідний склад ВАВ моделювався на основі розрахункового радіонуклідного складу ВТВЗ реакторів ВВЕР-440 типу РК із початковим збагаченням 3,6 %. Розрахунки виконані для таких значень вигорання: 10, 20, 30 та 36 ГВт·діб/т урану.

### 3. Аналіз результатів розрахунків

Аналізувалися питомі активності окремих продуктів поділу та актиноїдів, їхні внески в сумарну питому активність осклованих ВАВ. Тип та енергія випромінювання залежить від схеми розпаду конкретного радіонукліда. Потенційний вплив радіонуклідів, а відповідно і ВАВ на людину та навколишнє середовище можна оцінити множенням питомих активностей на вагові коефіцієнти, які визначені в міжнародному стандарті [11]. В якості інтегральних характеристик аналізувалися сумарна питома активність ВАВ та внески в неї сумарних питомих активностей продуктів поділу та актиноїдів. Це пов'язано з тим, що саме розпад актиноїдів визначає альфа-активність осклованих ВАВ і відповідно має розглядатися окремо.

Результати моделювання питомої активності осклованих ВАВ від переробки ВЯП реакторів ВВЕР-440 за технологією ВО «Маяк» для вигорання вихідного палива 10, 20, 30 та 36 ГВт·діб/т урану представлено на рис. 1. Внесок продуктів поділу та актиноїдів у сумарну питому активність наведено на рис. 2 та 3 відповідно.

Питома активність осклованих ВАВ помітно залежить від вигорання вихідного палива (див. рис. 1). Зокрема, на момент повернення осклованих ВАВ в Україну їхня питома активність для вихідного палива з вигоранням 36 ГВт·діб/т урану більш ніж у 3 рази переви-

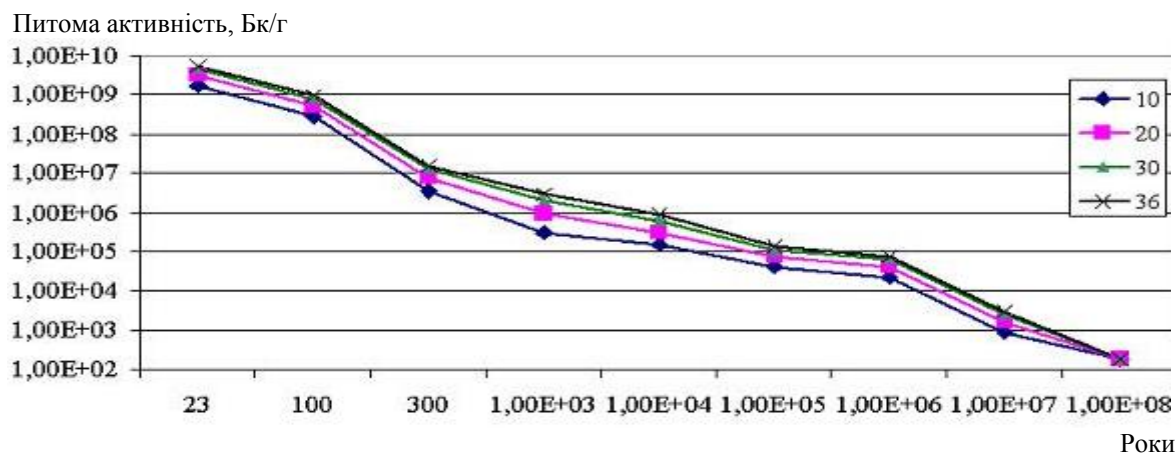


Рис. 1. Динаміка змін питомої активності осклованих ВВ для різних значень вигорання вихідного палива (відлік за шкалою часу з моменту вивантаження ВЯП із реактора).

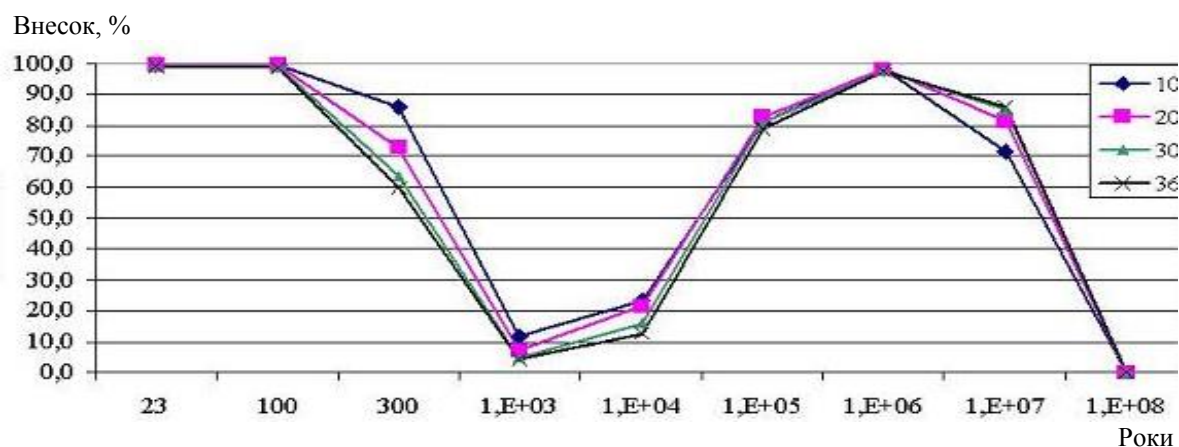


Рис. 2. Внесок продуктів поділу в сумарну питому активність осклованих ВВ для різних значень вигорання вихідного палива.

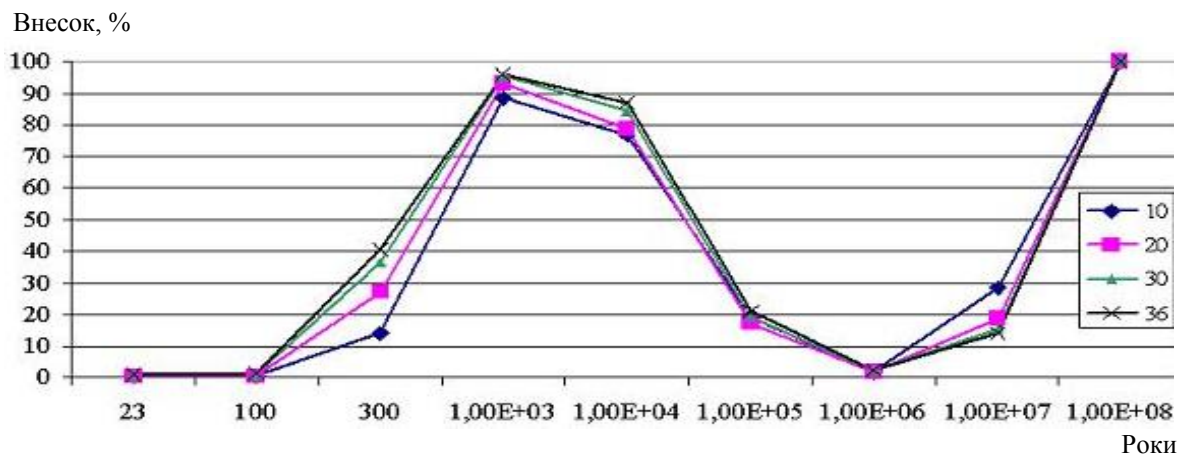


Рис. 3. Внесок актиноідів у сумарну питому активність осклованих ВВ для різних значень вигорання вихідного палива.

щує питому активність для палива з вигоранням 10 ГВт·діб/т урану. Спочатку це перевищення зростає і досягає максимального значення (~9) для витримки близько 1000 років, після чого починає зменшуватись. Через  $10^8$  років це перевищення становить лише ~2 %.

Внески в сумарну питому активність осклованих ВВ для продуктів поділу та актиноідів іс-

точно залежать від часу витримки та вигорання вихідного ВЯП. При цьому якісно їхня динаміка у часі однакова для різного рівня вигорання. На момент повернення ВВ в Україну внесок продуктів поділу близько 99 % сумарної питомої активності відходів (див. рис. 2). При наступній витримці він зменшується і досягає мінімуму при витримці ~1000 років. Далі цей внесок починає

зростати і досягає максимуму (близько 98 %) при витримці  $\sim 10^6$  років, після чого знову спадає до рівня менше 0,1 % при витримці  $10^8$  років. Відповідно внесок актиноїдів має протилежну динаміку (див. рис. 3).

Враховуючи спокійний характер залежності аналізованих характеристик від вигорання вихідного палива, результати детального аналізу радіонуклідного складу осклованих ВАВ представлено далі лише для крайніх значень 10 та 36 ГВт·діб/т урану. При визначенні основних значущих радіонуклідів обиралися лише такі, чий внесок у питому активність ВАВ у деякий момент часу перевищує 1 %. Питому активність інших радіонуклідів підсумовували загалом (окремо для продуктів поділу та актиноїдів).

Необхідно зазначити, що згідно з [8] відносні похибки вихідних концентрацій для продуктів поділу становлять 5 %; для  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  – 7 %; для  $^{238}\text{U}$  – 0,4 %; для  $^{232}\text{U}$ ,  $^{236}\text{Pu}$  та інших актиноїдів – 15 %. Відповідно вказаний критерій 1 % від сумарної питомої активності є сильно консервативним і дозволяє скоротити перелік значущих радіонуклідів при подальшому аналізі.

Результати моделювання питомої активності для вигорання вихідного палива 10 ГВт·діб/т урану наведено на рис. 4. Внески окремих продуктів поділу та актиноїдів у сумарну питому активність представлено на рис. 5 та 6 відповідно.

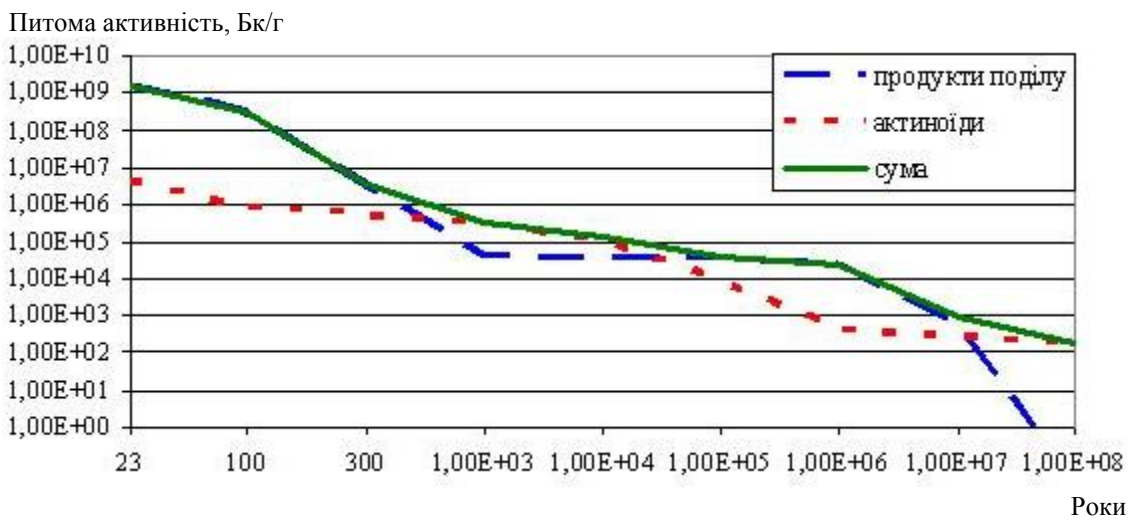


Рис. 4. Питому активність осклованих ВАВ (вигорання вихідного палива 10 ГВт · діб/т урану).

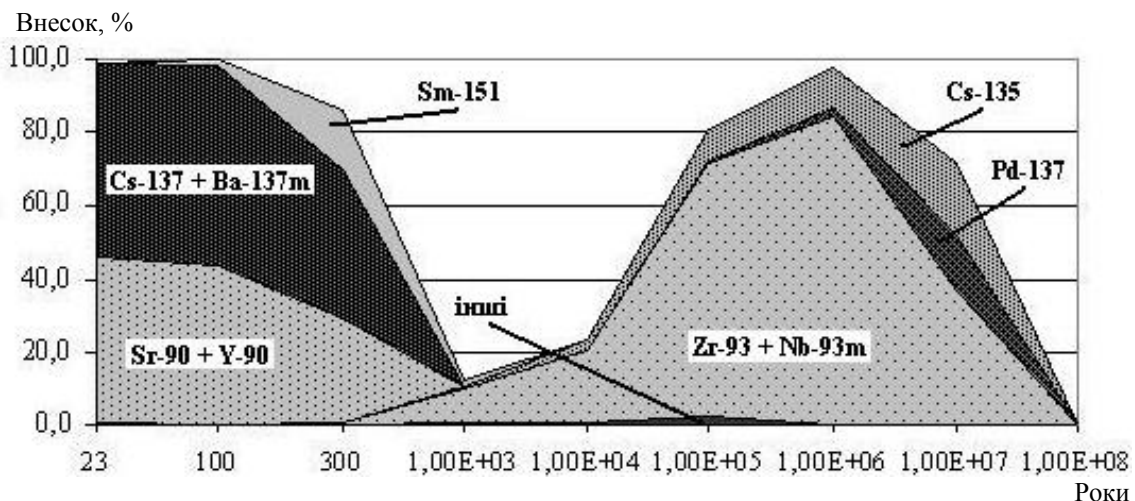


Рис. 5. Внесок продуктів поділу в питому активність осклованих ВАВ (вигорання 10 ГВт · діб/т урану).

Як видно з наведених даних, при вигоранні вихідного палива 10 ГВт · діб/т урану для часу витримки до 100 років та навколо  $10^6$  років сумарна питому активність осклованих ВАВ практично повністю визначається продуктами поділу. Перший максимум визначається радіонуклідами

$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$  та  $^{151}\text{Sm}$ , другий –  $^{93}\text{Zr} + ^{93\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{107}\text{Pd}$  та  $^{135}\text{Cs}$ . При цьому активність вказаних дочірніх радіонуклідів повністю визначається активністю материнських ядер. Максимальний внесок інших продуктів поділу не перевищує 2 %. Внесок актиноїдів стає визначальним

для витримки близько 1000 років та  $10^8$  років і більше. Перший максимум визначається ізотопами америцію, плутонію та нептунію:  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ -,  $^{243}\text{Am}$  +  $^{239}\text{Np}$ , другий – ізотопами урану:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ .

Результати моделювання для вигорання вихідного палива 36 ГВт · діб/т урану представлено на рис. 7 - 9.

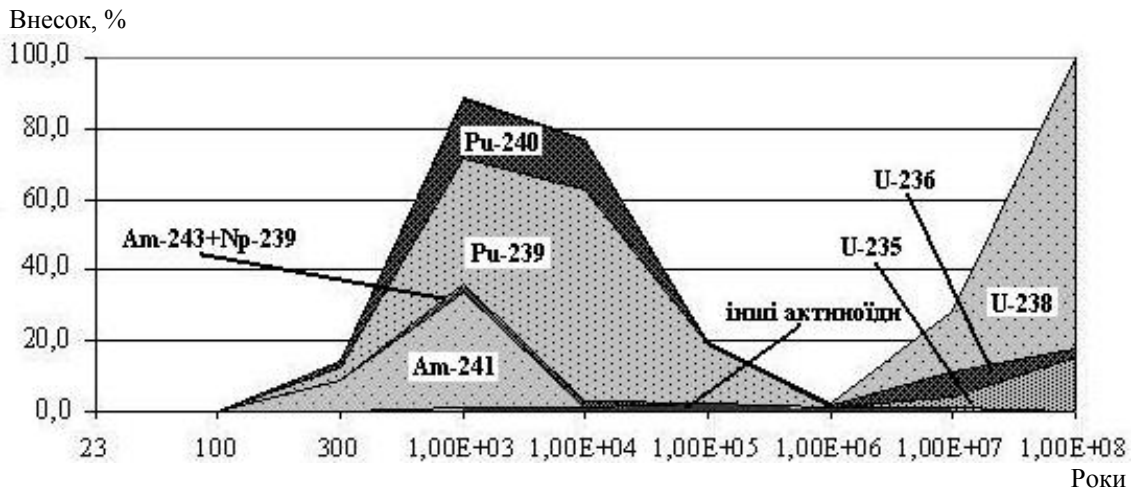


Рис. 6. Внесок актиноідів у питому активність осклованих ВАВ (вигорання 10 ГВт · діб/т урану).

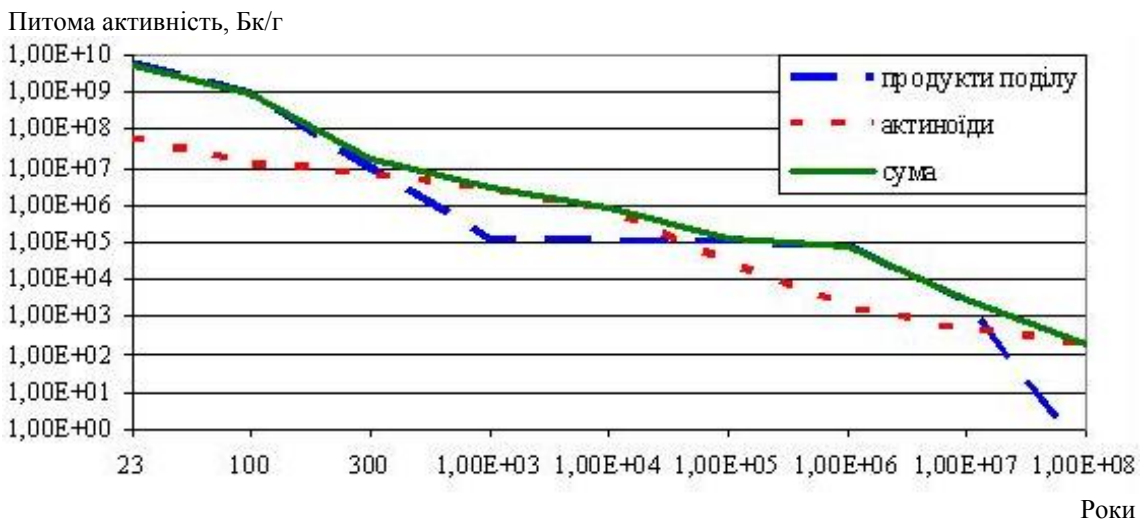


Рис. 7. Питома активність осклованих ВАВ (вигорання вихідного палива 36 ГВт · діб/т урану).

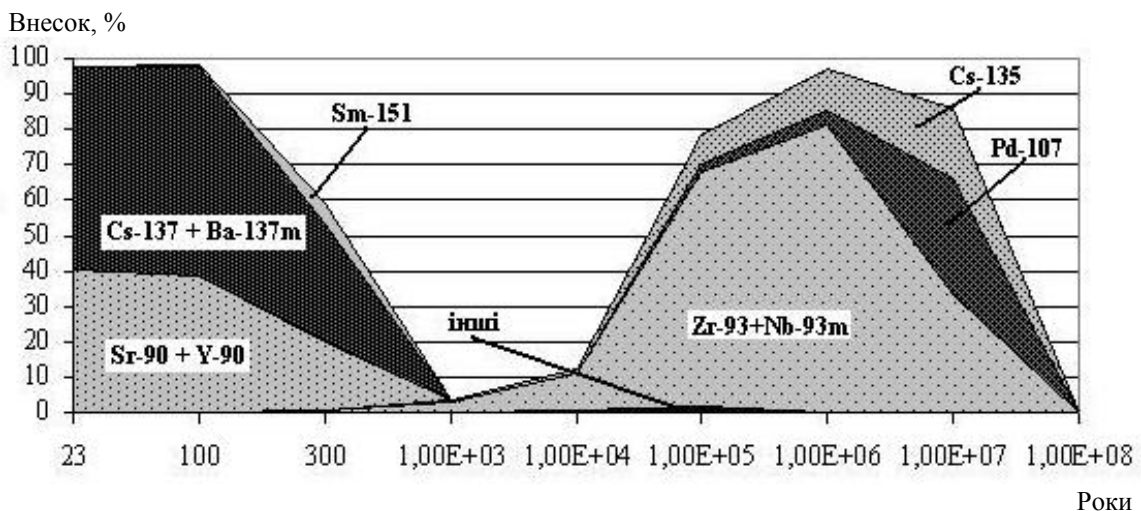


Рис. 8. Внесок продуктів поділу в питому активність осклованих ВАВ (вигорання 36 ГВт · діб/т урану).

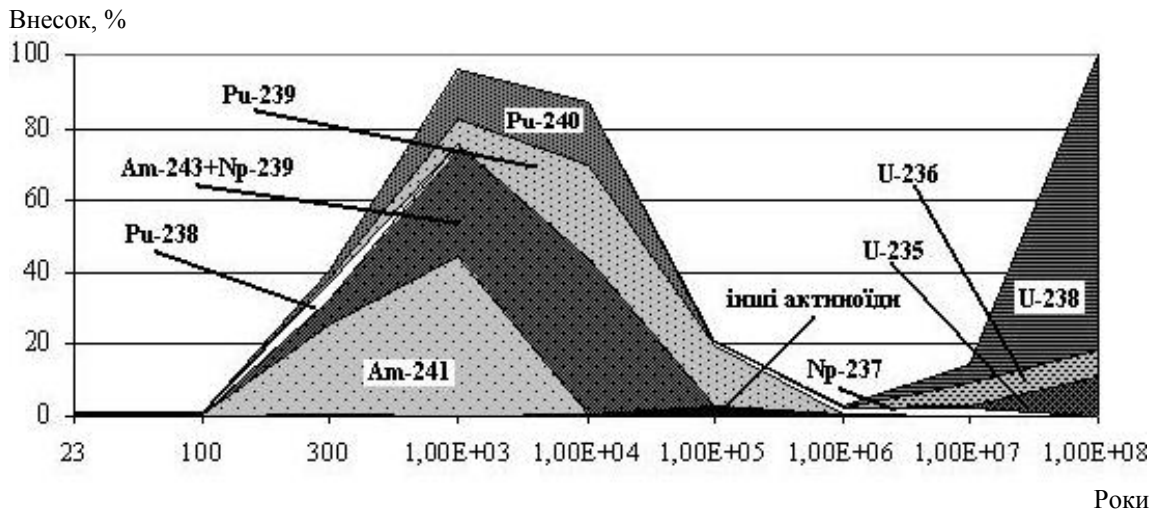


Рис. 9. Внесок актиноідів у питому активність осклованих ВАВ (вигорання 36 ГВт · діб/т урану).

Як видно з порівняння рис. 4 - 6 та рис. 7 - 9, переліки основних радіонуклідів та динаміка змін їхніх внесків при вигоранні вихідного палива 36 ГВт · діб/т урану подібна до результатів для вигорання 10 ГВт · діб/т урану. Найбільш вагома відміна спостерігається для внеску актиноідів  $^{243}\text{Am}$  +  $^{239}\text{Np}$ . Також при вигоранні вихідного палива 36 ГВт · діб/т урану до переліку визначених вище основних актиноідів додаються  $^{238}\text{Pu}$  та  $^{237}\text{Np}$ , внески яких перевищують 1 %.

#### 4. Висновки

Залежно від часу витримки питома активність осклованих ВАВ від переробки ВЯВ реакторів ВВЕР-440 за технологією ВО «Маяк» визначається різними радіонуклідами: від 23 до 100 років –  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$ , близько 1000 років – ізотопами америцію, нептунію та плутонію, близько 1 000 000 років –  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{135}\text{Cs}$  та  $^{107}\text{Pd}$ , для витримки  $10^8$  років і більше – ізотопами урану  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ .

Спостерігається залежність абсолютного значення питомої активності осклованих ВАВ від вигорання вихідного палива – питома активність збільшується із збільшенням вигорання. Для часів витримки від 23 до 1000 років спостерігається посилення такої залежності, далі – поступове

ослаблення. Для витримки  $10^8$  років і більше значення питомої активності практично однакове для будь-якого вигорання.

Також спостерігається залежність внеску актиноідів у сумарну питому активність осклованих ВАВ від вигорання вихідного палива. Для часів витримки до  $10^6$  років внесок актиноідів збільшується із збільшенням вигорання, а після  $10^6$  років, навпаки, зменшується.

Із 22 продуктів поділу, що розглядалися, значний внесок у сумарну активність осклованих ВАВ у різні моменти часу вносять 9 радіонуклідів:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{93\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ . При цьому активність дочірніх радіонуклідів  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{93\text{m}}\text{Nb}$  та  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  визначається материнськими ядрами  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{93}\text{Zr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  відповідно.

Із 20 розглянутих актиноідів значний внесок у сумарну активність осклованих ВАВ у різні моменти часу вносять 12 радіонуклідів:  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ . При цьому активність  $^{239}\text{Np}$  повністю визначається активністю материнського  $^{243}\text{Am}$ . Безпосередній внесок  $^{244}\text{Cm}$  та  $^{241}\text{Pu}$  у сумарну питому активність є незначним, але їхній розпад відповідно у  $^{240}\text{Pu}$  та  $^{241}\text{Am}$  помітно впливає на сумарну активність, тому врахування вказаних материнських ядер є необхідним.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Контракт № 235/98-01 от 01.06.1998 между ФГУП ПО «Маяк» (Российская Федерация) и ГП НАЭК «Энергоатом» на переработку отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР-440 Ровенской АЭС.
2. В.И. Землянхин и др. *Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС* (Москва: Энергоатомиздат, 1983) 276 с.
3. В.Ф. Горн, С.Н. Кирилов, Д.Н. Колупаев. ПО «Маяк»: перспективы развития технологий завода РТ-1. *Безопасность Окружающей Среды № 1-2010: Обращение с ОЯТ*.
4. В.М. Колобашкин и др. *Радиационные характеристики облученного ядерного топлива*. Справочник (Москва: Энергоатомиздат, 1983) 384 с.
5. А.О. Бурак и др. Аппроксимация зависимостей концентрации нуклидов от времени простыми аналитическими функциями. *Атомная энергия*

- 94(6) (2003) 432.
6. А.С. Герасимов, Т.С. Зарицкая, А.П. Рудик. *Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах* (Москва: Энергоатомиздат, 1989) 575 с.
  7. Н.Г. Гусев, П.П. Дмитриев. *Цепочки радиоактивных превращений*. Справочник (Москва: Энергоатомиздат, 1994) 110 с.
  8. В.Д. Сидоренко и др. Программа ТВС-М (версия 1.2). Описание алгоритма и инструкции пользователя. Отчет РНЦ «Курчатовский институт», инв. № 32/1-10-102 (Москва, 2002).
  9. Письмо ФГУП ПО «Маяк» № ПТО-2251 от 08.04.2005 «О возврате остеклованных РАО».
  10. Письмо Дирекции по ядерной и радиационной безопасности Госкорпорации «Росатом». № 2.6-428 от 01.04.2010 «О направлении материалов».
  11. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. *IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. No. GSR Part 3 (IAEA, Vienna, 2014)*.

**П. М. Русинко\*, Л. Л. Литвинский**

*ООО «АЭСКАР», Киев, Украина*

\*Ответственный автор: pavel.rusinko@gmail.com

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАДИОНУКЛИДНОГО СОСТАВА ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ОТ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РЕАКТОРОВ ВВЭР-440 ПО ТЕХНОЛОГИИ ПО «МАЯК»**

Приведены результаты моделирования радионуклидного состава остеклованных высокоактивных отходов от переработки отработанного ядерного топлива реакторов ВВЭР-440 по технологии ПО «Маяк» для разных значений выгорания исходного топлива. Проанализирован вклад разных радионуклидов в удельную активность таких отходов в разные моменты времени от 23 до  $10^8$  лет. Определены основные продукты деления и актиноиды, вклад которых в суммарную удельную активность таких отходов является существенным.

*Ключевые слова:* отработанное ядерное топливо, ВВЭР-440, остеклованные высокоактивные отходы, радионуклидный состав.

**P. M. Rusinko\*, L. L. Litvinsky**

*LTD "AESKAR", Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: pavel.rusinko@gmail.com

### **MODELING AND ANALYSIS OF RADIONUCLIDE STRUCTURE OF HIGH ACTIVE WASTE FROM VVER-440 REACTORS SPENT NUCLEAR FUEL REPROCESSED WITH PRODUCTION ASSOCIATION "MAYAK" TECHNOLOGY**

Results of modeling of radionuclide structure of high active waste from VVER-440 reactors spent nuclear fuel reprocessed with PA "Mayak" technology are presented in the article for different values of fuel burnup. The contribution of different radionuclides in this waste specific activity at different periods from 23 till  $10^8$  years is analyzed. The basic fission products and actinides are determined, for which contribution to total specific activity of such a waste is essential.

*Keywords:* spent nuclear fuel, VVER-440, vitrified high active waste, radionuclide structure.

#### REFERENCES

1. Contract No. 235/98-01 dated on 06/01/1998 between FSUE PA "Mayak" (Russian Federation) and SE National Atomic Energy Generating Company "Energoatom" for reprocessing of spent nuclear fuel from VVER-440 reactors of the Rovno NPP. (Rus)
2. V.I. Zemlyanukhin et al. *Radiochemical Reprocessing of Nuclear Fuel for NPPs* (Moskva: Energoatomizdat, 1983) 276 p. (Rus)
3. V.F. Gorn, S.N. Kirilov, D.N. Kolupaev. PA "Mayak": prospects for the development of technologies for the RT-1 plant. *Bezopasnost' Okruzhayushchey Sredy No. 1-2010: Appeal of SNF*.
4. V.M. Kolobashkin et al. *Radiation Characteristics of Irradiated Nuclear Fuel. Handbook* (Moskva: Energoatomizdat, 1983) 384 p. (Rus)
5. A.O. Burak et al. Fit of simple analytic functions to the time dependences of nuclide concentrations. *Atomic Energy* 94(6) (2003) 382.
6. A.S. Gerasimov, T.S. Zaritskaya, A.P. Rudik. *Handbook for the Formation of Nuclides in Nuclear Reactors* (Moskva: Energoatomizdat, 1989) 575 p. (Rus)

7. N.G. Gusev, P.P. Dmitriev. *Chains of Radioactive Transformations*. Handbook (Moskva: Energoatomizdat, 1994) 110 p. (Rus)
8. V.D. Sidorenko et al. TVS-M Program (version 1.2). Description of the algorithm and user instructions. Report of the RRC "Kurchatov Institute", inv. No. 32/1-10-102 (Moskva, 2002). (Rus)
9. Letter of the Federal State Unitary Enterprise PA "Mayak" No. PTO-2251 dated on April 8, 2005 "On the return of vitrified radioactive waste".
10. Letter from the Directorate of Nuclear and Radiation Safety of Rosatom State Corporation. No. 2.6-428 dated on 04/01/2010 "On the direction of materials". (Rus)
11. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. [IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. No. GSR Part 3 \(IAEA, Vienna, 2014\)](#).

Надійшла 12.03.2019  
Received 12.03.2019