

**В. О. Желтоножський, Д. Є. Мизніков, А. М. Саврасов\*, В. І. Слісенко**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: asavrasov@kinr.kiev.ua

## ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ $^{63}\text{Ni}$ В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ АЕС

Виміряно спектри  $\gamma$ -квантів конструкційних матеріалів 2-го блока ЧАЕС, опромінених гальмівними  $\gamma$ -квантами з граничною енергією 37 МеВ. Використовуючи співвідношення виходів активностей  $^{57}\text{Co}$  та  $^{58}\text{Co}$ , визначено співвідношення мас нікелю та кобальту. Використовуючи отримані дані та виміряну активність  $^{60}\text{Co}$  в досліджуваних зразках, розроблено метод визначення активності  $^{63}\text{Ni}$ . Проведено радіохімічну валідацію створеного методу і отримано гарне кількісне узгодження активностей  $^{63}\text{Ni}$ , отриманих спектроскопічним та радіохімічним методами.

*Ключові слова:* середньозважені виходи, фотоактиваційний метод, гамма-спектрометрія, нікель, кобальт.

### 1. Вступ

Конструкційні матеріали АЕС, як правило, містять у великій кількості нікель (до 30 %) [1]. Як домішка нікеля в цих матеріалах присутній також кобальт. Одним із важливих радіонуклідів, що утворюються в конструкційних матеріалах на ізотопах нікелю є  $^{63}\text{Ni}$ , який має період напіврозпаду  $T_{1/2} = 100,1$  років. Він розпадається з випромінюванням лише електронів з граничною енергією 67 кеВ. Для вимірювання їх необхідно радіохімічними методами виділити  $^{63}\text{Ni}$  та виміряти низькоенергетичні електрони. Це є доволі складним завданням, тому нами для розв'язання даної проблеми пропонується фотоактиваційна методика, що ґрунтується на визначенні концентрацій Ni та Co з наступним розрахунком активності  $^{63}\text{Ni}$ , який утворюється в (n,  $\gamma$ )-реакції.

### 2. Методика і результати вимірювань

Для розрахунку активностей у конструкційних матеріалах АЕС, як правило, використовуються така формула:

$$A = N_A \sigma \varphi (1 - \exp(-\lambda t_{\text{опр}})) \exp(-\lambda t_{\text{охол}}). \quad (1)$$

Тут  $N_A$  – число відповідних атомів у конструкційних матеріалах АЕС;  $\sigma$  – переріз активації тепловими нейтронами;  $\varphi$  – усереднена густина потоку теплових нейтронів, який опромінює конструкційні матеріали;  $t_{\text{опр}}$  – інтегральна тривалість опромінювання;  $t_{\text{охол}}$  – тривалість витримки в перервах між опромінюванням та вимірюванням.

Як  $t_{\text{опр}}$  використовуються значення тривалості роботи в ефективних добах, визначене за відомими значеннями енергогенерації  $E$  (МВт-доба).

В якості часу  $t_{\text{охол}}$  використовуються усереднені за рік значення сумарних простоїв реактора згідно з існуючими графіками навантажень блоків. Густина потоку, в загальному, в основних вузлах опромінювання вимірюється, проте очевидно, що внаслідок перерозсіяння нейтронів можливі значні варіації величин потоків. Ще складніша ситуація з масами опромінених матеріалів. Зокрема для кобальту, часто обмежуються тим, що його маса не повинна перевищувати 0,5 % загальної маси. Існують значні проблеми і при оцінці перерізів реакцій на теплових нейтронах. У реакторі знаходяться «теплові» нейтрони працюючого реактора і енергія їх значно вища енергії теплових нейтронів, для яких виміряні (n,  $\gamma$ )-перерізи. Енергії теплових нейтронів коливаються в діапазоні від 0,025 до 0,5 еВ, а в реакторі ці енергії близько 2 еВ (див. рис. спектра нейтронів для РБМК-1000 [2]).

Все це приводить до того, що розраховані за формулою (1) активності розходяться з експериментальними значеннями на 1 - 2 порядки. Для розв'язання цієї проблеми нами розроблено методику визначення активності досліджуваного нукліда по відношенню до активності  $^{60}\text{Co}$ .

У конструкційних матеріалах основною  $\gamma$ -активністю після зупинки реактора і протягом наступних 50 років є активність  $^{60}\text{Co}$ . Вона легко вимірюється  $\gamma$ -спектрометрами, зібраними на базі напівпровідникових детекторів, оскільки при розпаді  $^{60}\text{Co}$  випромінюються  $\gamma$ -кванти високої енергії (1173 та 1333 кеВ). Знаючи активність  $^{60}\text{Co}$  та співвідношення досліджуваних матеріалів порівняно з домішками кобальту, можна розрахувати кількості радіоактивних нуклідів, що напрацьовуються в (n,  $\gamma$ )-реакції. Для визначення співвідношення різних елементів у конструкційних

матеріалах нами пропонується використовувати фотоактиваційну методику [3].

Для валідації отриманих даних нами проводилися дослідження елементного складу зразків, відібраних на 2-му блоці ЧАЕС. За допомогою фотоактиваційної методики проведено вимірювання величини домішки кобальту порівняно з нікелем. У конструкційних матеріалах АЕС нікель завжди йде в парі з кобальтом, тому для усунення методичних похибок проводяться відносні вимірювання, порівнюючи вихід  $\gamma$ -ліній  $^{57,58}\text{Co}$ . Для цього на прискорювачі ЛУЕ-40 Харківського фізико-технічного інституту НАН України [4] пучком гальмівних  $\gamma$ -квантів з граничною енергією 37 МеВ опромінювалися зразки, відібрані на цьому блоці як в області підвищеного нейтронного фону – жалюзі (ЖЗ), так і з корпусу реактора.

Середній струм електронів становив 5 мкА, загальний потік їх протягом опромінення дорівнював 19 мкА·год ( $\sim 4,3 \cdot 10^{17}$  електронів). Розкид електронного пучка по енергії, що дорівнює 37 МеВ, не перевищував 0,25 % і повністю накривав гальмівну мішень, яка складалася із танталового диску діаметром 10 см та товщиною 1,05 мм. За ним впритул розташовувався алюмінієвий диск, такого ж діаметра та товщиною 15 см, до якого кріпились досліджувані мішені.

Гамма-спектр опроміненого зразка наведено на рис. 1. Для визначення співвідношення мас нікелю і кобальту вимірювалось співвідношення інтенсивностей  $\gamma$ -ліній з величинами енергії  $\gamma$  136 кеВ –  $^{57}\text{Co}$  ( $T_{1/2} = 272$  доби) [5],  $\gamma$  811 кеВ –  $^{58}\text{Co}$  ( $T_{1/2} = 71$  доба) [5].  $^{57}\text{Co}$  напрацьовується, в основному, в реакціях  $(\gamma, n)$  та  $(\gamma, p)$  на ізоtopі  $^{58}\text{Ni}$ , а  $^{58}\text{Co}$ , переважно, в  $(\gamma, n)$ -реакції на моноізоtopі  $^{59}\text{Co}$ .

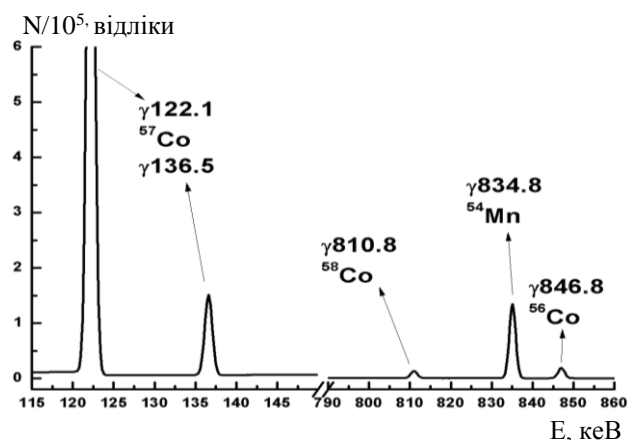


Рис. 1. Фрагмент  $\gamma$ -спектра активованої мішені ЖЗ.

При опроміненні використовувались зразки масою 50 мг.

З відомих формул активаційного аналізу відношення числа атомів  $^{58}\text{Ni}$  та  $^{59}\text{Co}$  дорівнюватиме:

$$\frac{m(\text{Ni})}{m(\text{Co})} = \frac{N(\text{Ni})(1-e^{-\lambda(\text{Co})t_{\text{опр}}})(1-e^{-\lambda(\text{Co})t_{\text{вим}}})e^{-\lambda(\text{Co})t_{\text{охол}}} Y(\text{Co})\lambda(\text{Ni})}{N(\text{Co})(1-e^{-\lambda(\text{Ni})t_{\text{опр}}})(1-e^{-\lambda(\text{Ni})t_{\text{вим}}})e^{-\lambda(\text{Ni})t_{\text{охол}}} Y(\text{Ni})\lambda(\text{Co})}, \quad (2)$$

де  $m(\text{Ni})$ ,  $m(\text{Co})$  – числа атомів  $^{58}\text{Ni}$  та  $^{59}\text{Co}$  відповідно.  $\lambda(\text{Co})$ ,  $\lambda(\text{Ni})$  – сталі радіоактивного розпаду  $^{58}\text{Co}$  та  $^{57}\text{Co}$  відповідно,  $\text{с}^{-1}$ .  $Y(\text{Ni})$ ,  $Y(\text{Co})$  – середньозважені виходи напрацювання  $^{57}\text{Co}$  та  $^{58}\text{Co}$  відповідно.  $N(\text{Ni})$ ,  $N(\text{Co})$  – числа радіоактивних ядер  $^{57}\text{Co}$  та  $^{58}\text{Co}$  відповідно.  $t_{\text{опр}}$ ,  $t_{\text{охол}}$ ,  $t_{\text{вим}}$  – тривалості опромінення, охолодження та вимірювання відповідно. Тут враховується той факт, що вимірювання проводилися за місяць після опромінення, тому усі ядра  $^{57}\text{Ni}$ , що утворилися в  $(\gamma, n)$ -реакції, розпалися внаслідок електронного захоплення на ядра  $^{57}\text{Co}$ .

Періоди напіврозпаду  $^{57}\text{Co}$  та  $^{58}\text{Co}$  дорівнюють 271,8 та 70,8 доби відповідно [5]. Зразки опромінювалися протягом декількох годин. Таким чином  $T_{1/2}$  напрацьованих нуклідів  $\gg t_{\text{опр}}$ , тому вирази з  $t_{\text{опр}}$  можна розкласти в ряд Тейлора і отримати, що  $1-e^{-\lambda(\text{Co})t_{\text{опр}}} \approx \lambda(\text{Co})t_{\text{опр}}$  та  $1-e^{-\lambda(\text{Ni})t_{\text{опр}}} \approx \lambda(\text{Ni})t_{\text{опр}}$ . Аналогічні вирази мають місце і для  $t_{\text{вим}}$ :  $1-e^{-\lambda(\text{Co})t_{\text{вим}}} \approx \lambda(\text{Co})t_{\text{вим}}$  та  $1-e^{-\lambda(\text{Ni})t_{\text{вим}}} \approx \lambda(\text{Ni})t_{\text{вим}}$ . Підставивши це у вираз (2), отримаємо:

$$\frac{m(\text{Ni})}{m(\text{Co})} = \frac{N(\text{Ni})\lambda(\text{Co})e^{-\lambda(\text{Co})t_{\text{охол}}} Y(\text{Co})}{N(\text{Co})\lambda(\text{Ni})e^{-\lambda(\text{Ni})t_{\text{охол}}} Y(\text{Ni})}. \quad (3)$$

Таким чином для граничної енергії гальмівних  $\gamma$ -квантів 37 МеВ з урахуванням квантових виходів для  $\gamma$ -лінії 136 кеВ ( $^{57}\text{Co}$ ) – 10,68 % і для  $\gamma$ -лінії 811 кеВ ( $^{58}\text{Co}$ ) – 99,45 %:

$$\frac{m(\text{Ni})}{m(\text{Co})} = 9,3 \frac{N_{\gamma}(136 \text{ кеВ})\lambda(\text{Co})e^{-\lambda(\text{Co})t_{\text{охол}}} Y(\text{Co})}{N_{\gamma}(811 \text{ кеВ})\lambda(\text{Ni})e^{-\lambda(\text{Ni})t_{\text{охол}}} Y(\text{Ni})}, \quad (4)$$

де 9,3 – відношення квантових виходів  $\gamma$ -ліній 811 кеВ та 136 кеВ;  $N_{\gamma}(136 \text{ кеВ})$  – число відліків у піку з енергією 136 кеВ з урахуванням ефективності реєстрації спектрометра (у даному випадку 18,4 %);  $N_{\gamma}(811 \text{ кеВ})$  – число відліків у піку з енергією 811 кеВ з урахуванням ефективності реєстрації спектрометра (у даному випадку 5,2 %).

Оскільки мішень тонка, то самопоглинанням даних  $\gamma$ -квантів можна знехтувати.

Середньозважений вихід реакції  $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$  визначався в результаті згортки з кроком 1 МеВ за формулою:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i \phi_i}{\sum_{i=1}^N \phi_i}, \quad (5)$$

де  $\sigma_i$  – табличні значення перерізів реакції  $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$  для монохроматичних  $\gamma$ -квантів;  $\phi_i$  – відносні величини потоку, модельованого в Geant4 [6] спектра гальмівних  $\gamma$ -квантів для різної кількості подій, приведені до порогової величини енергії для даної реакції.

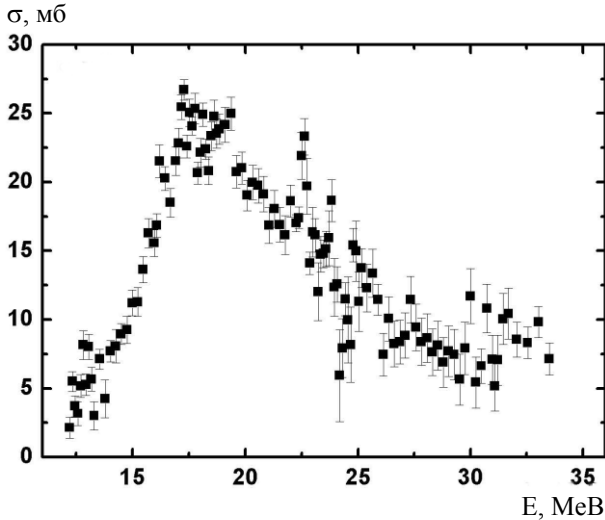


Рис. 2 Функція збудження реакції  $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$  з [7].

Перерізи реакції  $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$  використовувалися з двох джерел:

1) Табульовані експериментальні дані з [7]. Вони зображені на рис. 2.

2) Модельовані в програмному коді Talys-1.96 значення перерізів [8]. На рис. 3 зображена теоретично розрахована функція збудження реакції  $^{59}\text{Co}(\gamma, n)^{58}\text{Co}^{\text{tot}}$ .

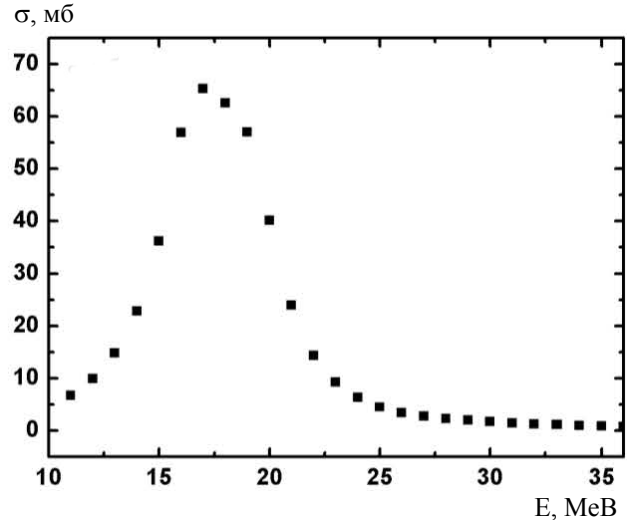


Рис. 3 Функція збудження реакції  $^{59}\text{Co}(\gamma, n)^{58}\text{Co}^{\text{tot}}$ , розрахована за допомогою програмного пакета TALYS-1.96 [8].

**Середньозважені виходи досліджуваних реакцій**

Елемент	$^{58}\text{Ni}(\text{Talys})$	$^{58}\text{Ni}$ [7]	$^{59}\text{Co}(\text{Talys})$	$^{59}\text{Co}$ [9]
$Y(\gamma, n)$ , мб	10,1(7)	13,4(13)	24,2(17)	24,4(24)

Цими способами за формулою (5) було розраховано величини середньозважених виходів для різних елементів, що містяться в опроміненних зразках. Отримані виходи наведено в таблиці.

Як видно з таблиці, різниця між експериментальними та теоретичними виходами знаходиться в межах необхідної точності методу для  $^{59}\text{Co}$  та дещо відрізняється для реакції  $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)^{57}\text{Ni}$ . Подібна ситуація спостерігається і для реакції  $^{58}\text{Ni}(\gamma, p)^{57}\text{Co}$ . Ми в даних дослідженнях використовували експериментальні дані інших авторів.

При розрахунку активності  $^{63}\text{Ni}$ , слід мати на увазі, що при роботі реактора має місце опромінення конструкційних матеріалів, що його оточують, потоком нейтронів, спектр яких має вигляд, схожий на зображений на рис. 4.

Як видно, найбільша доля припадає на теплові нейтрони. А при активації кобальту та нікелю основний внесок дають теплові нейтрони. Внесками епітеплових і швидких нейтронів можна знехтувати і тому в подальших розрахунках ми

Потік нейтронів, відн. од.

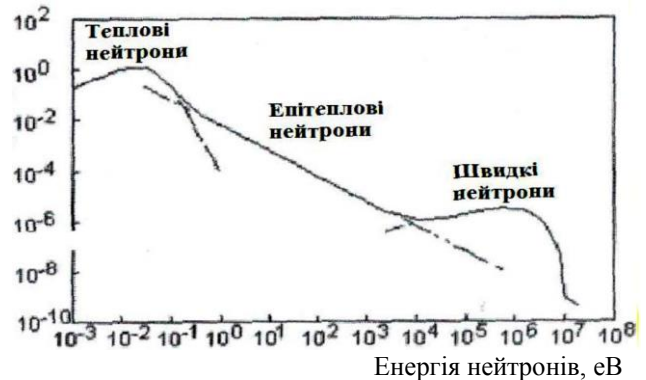


Рис. 4. Спектр реакторних нейтронів [10].

будемо використовувати табличні значення перерізів саме для теплових нейтронів. Будемо оцінювати відношення активностей  $^{63}\text{Ni}$  та  $^{60}\text{Co}$  за такою формулою:

$$\frac{A(^{63}\text{Ni})}{A(^{60}\text{Co})} = \frac{\left(1 - e^{-\lambda(^{63}\text{Ni})t_{\text{опр}}}\right) e^{-\lambda(^{63}\text{Ni})t_{\text{охол}}}}{\left(1 - e^{-\lambda(^{60}\text{Co})t_{\text{опр}}}\right) e^{-\lambda(^{60}\text{Co})t_{\text{охол}}}} \frac{\Phi_n \sigma_{n, ^{62}\text{Ni}}^n N_{^{62}\text{Ni}}}{\Phi_n \sigma_{n, ^{59}\text{Co}}^n N_{^{59}\text{Co}}} =$$

$$= \frac{\left(1 - e^{-\lambda(^{63}\text{Ni})t_{\text{опр}}}\right) e^{-\lambda(^{63}\text{Ni})t_{\text{охол}}} \sigma_{^{62}\text{Ni}}^n N_{^{62}\text{Ni}}}{\left(1 - e^{-\lambda(^{60}\text{Co})t_{\text{опр}}}\right) e^{-\lambda(^{60}\text{Co})t_{\text{охол}}} \sigma_{^{59}\text{Co}}^n N_{^{59}\text{Co}}}, \quad (6)$$

де  $A(^{63}\text{Ni})$  та  $A(^{60}\text{Co})$  – активності  $^{63}\text{Ni}$  та  $^{60}\text{Co}$  відповідно,  $\Phi_n$  – потік нейтронів у реакторі, н/с.  $\sigma_{^{62}\text{Ni}}^n$  та  $\sigma_{^{59}\text{Co}}^n$  – табличні значення перерізів реакцій  $^{62}\text{Ni}(n, \gamma)^{63}\text{Ni}$  та  $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$  відповідно, взяті з [5], б.  $\lambda(^{63}\text{Ni}) = 0,693/T_{1/2}(^{63}\text{Ni})$  та  $\lambda(^{60}\text{Co}) = 0,693/T_{1/2}(^{60}\text{Co})$  – сталі радіоактивного розпаду  $^{63}\text{Ni}$  та  $^{60}\text{Co}$  відповідно, с<sup>-1</sup>.  $T_{1/2}(^{63}\text{Ni})$  та  $T_{1/2}(^{60}\text{Co})$  – періоди напіврозпаду  $^{63}\text{Ni}$  та  $^{60}\text{Co}$  відповідно, с.  $N_{^{62}\text{Ni}}/N_{^{59}\text{Co}}$  – співвідношення між кількостями атомів  $^{62}\text{Ni}$  та  $^{59}\text{Co}$ . Воно отримується для даного зразка з формули (4) для співвідношення між кількостями атомів  $^{58}\text{Ni}$  та  $^{59}\text{Co}$  після врахування вмісту  $^{62}\text{Ni}$  в природній суміші.  $t_{\text{опр}}$ ,  $t_{\text{охол}}$ ,  $t_{\text{вим}}$  – тривалості опромінення, охолодження та вимірювання відповідно.

У підсумковій формулі (6) для активності  $^{63}\text{Ni}$  фігурують експериментально виміряні значення активності  $^{60}\text{Co}$  та співвідношення між кількостями атомів  $^{62}\text{Ni}$  та  $^{59}\text{Co}$ , яке виміряне експериментально через активності  $^{57}\text{Co}$  та  $^{58}\text{Co}$  за допомогою формули (4) з урахуванням вмісту  $^{62}\text{Ni}$  в природній суміші. З цих даних було отримано, що активність  $^{63}\text{Ni}$  в корпусі реактора дорівнює  $1,60 \pm 0,16$  Бк/г, а в матеріалах (жалюзі) вона дорівнює  $41,3 \pm 4,1$  Бк/г. Нами були також проведені радіохімічні дослідження цих зразків і було отримано, що активність  $^{63}\text{Ni}$  в корпусі  $< 2$  Бк/г, а в жалюзі –  $43,2 \pm 4,3$  Бк/г. Як видно, узгодження гарне.

### 3. Висновки

Аналіз виходів радіонуклідів показує, що при опроміненні гальмівними  $\gamma$ -квантами з гранич-

ною енергією 37 МеВ зразків масою 10 - 50 мг напрацьовуються активності, достатні для вимірювання спектрів  $\gamma$ -квантів протягом 3 - 4 год. Це дає змогу опромінювати одночасно 100 - 200 зразків. Для вимірювання  $\gamma$ -спектрів наведеної активності в даній роботі використовувалися  $\gamma$ -кванти, що супроводжують розпад не  $^{57}\text{Ni}$  ( $T_{1/2} = 35,6$  год, а  $^{57}\text{Co}$  ( $T_{1/2} = 271,8$  діб), на який розпадається  $^{57}\text{Ni}$ . У той же час вимірювання співвідношення  $^{57}\text{Co}$  та  $^{57}\text{Ni}$  легко визначається через порівняння виходів  $\gamma$ -квантів з енергією 127 кеВ ( $^{57}\text{Ni}$ ) та 122 кеВ ( $^{57}\text{Co}$ ). Ці  $\gamma$ -кванти мають близькі енергії і тому можна не враховувати похибку, яка пов'язана з їхнім самопоглинанням. Таким чином у фотоядерних реакціях вимірювалися співвідношення активностей  $^{57}\text{Co}$  та  $^{58}\text{Co}$  з періодами напіврозпаду 272 доби та 71 доба відповідно. Похибка вимірювань не перевищує 0,5 Бк, у той час як гранично допустима концентрація активності  $^{63}\text{Ni}$  є 500 Бк/г.

Розроблений фотоактиваційний метод визначення активності  $^{63}\text{Ni}$  дає змогу значно спростити його ідентифікацію, контроль та паспортизацію в сталевих конструкційних матеріалах АЕС та різних видах радіоактивних відходів.

Запропонований метод більш ефективний порівняно з традиційними радіохімічними методами у зв'язку з великою масою опромінених конструкційних матеріалів та радіоактивних відходів, що утворюються на АЕС, та складністю радіохімічних методів.

Робота виконана за фінансової підтримки бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВК 6541230) на 2022 - 2023 рр.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. B. Stulen. *Structural Alloys. Vol. 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. Handbook* (Michigan, Mechanical Properties Data Center, 1977) 3470 p.
2. E.A. Zhyrbenko, B.K. Bulkin. The main approaches to determining the activity of the structures of reactor units with VVER during their decommissioning. In: *Safety assurance of NPP with VVER. Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Sci. and Tech. Conf., Podolsk, May 26 - 29, 2009* (Podolsk: OKB "Gidropress", 2009) p. 1. (Rus)
3. V.A. Zheltonozhsky et al. Determination of the long-lived  $^{10}\text{Be}$  in construction materials of nuclear power plants using photoactivation method. *Journal of Environmental Radioactivity* 227 (2021) 106509.
4. M.I. Aizatskyi et. al. State and prospects of the linac of nuclear-physics complex with energy of electrons up to 100 MeV. *Problems of Atomic Science and Technology* 3(91) (2014) 60.
5. R.B. Firestone. *Table of Isotopes, 8th ed.* (New York: Wiley Interscience, 1996).
6. S. Agostinelli et al. GEANT4 – a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A* 506 (2003) 250.
7. S.C. Fultz et al. Photonuclear cross sections of  $^{58}\text{Ni}$  and  $^{60}\text{Ni}$ . *Phys. Rev. C* 10 (1974) 608.
8. A.J. Koning, D. Rochman. Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System. *Nucl. Data Sheets* 113 (2012) 2841.
9. S.C. Fultz et al. Photoneutron cross-sections for  $\text{V}^{51}$  and  $\text{Co}^{59}$ . *Phys. Rev.* 128 (1962) 2345.
10. F. De Corte. *The  $k_0$ -standartization method. Ph. D. Thesis* (Amsterdam, 1987) 481 p.

V. O. Zheltonozhskiy, D. E. Myznikov, A. M. Savrasov\*, V. I. Slisenko

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: asavrasov@kinr.kiev.ua

#### DETERMINATION OF $^{63}\text{Ni}$ ACTIVITY IN NPP CONSTRUCTION MATERIALS

The  $\gamma$ -spectra were measured of the structural materials of the 2nd unit of the Chornobyl NPP which were irradiated by bremsstrahlung with end-point energy 37 MeV. Using the ratio of the  $^{57}\text{Co}$  and  $^{58}\text{Co}$  activities, the nickel and cobalt masses ratio was determined. Using the obtained data and the measured  $^{60}\text{Co}$  activity in the studied samples, a method for determining of the  $^{63}\text{Ni}$  activity was developed. Radiochemical validation of the created method was performed and good quantitative agreement of  $^{63}\text{Ni}$  activities obtained by spectroscopic and radiochemical methods was obtained.

*Keywords:* flux-weighted average yields, photoactivation method,  $\gamma$ -spectrometry, nickel, cobalt.

Надійшла/Received 07.07.2022