

О. А. Кучмагра, Г. І. Одинокін

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

## Інформаційно-вимірювальний канал із двокамерним блоком детектування параметрів нейтронного потоку

### Ключові слова:

інформаційно-вимірювальний канал,  
параметри нейтронних потоків,  
двокамерний блок детектування,  
інтервали часу між імпульсами

У статті представлено опис інформаційно-вимірювального каналу параметрів нейтронних потоків із двокамерним блоком детектування, який розроблено з застосуванням сучасної електроніки. Як детектори нейтронів використовуються камери поділу. Інформаційно-вимірювальний канал на основі такого блока детектування дозволяє фіксувати малі (починаючи з 10 нс) інтервали часу між імпульсами, які утворилися під час реєстрації нейтронів у блоці детектування. Отримана інформація зберігається на жорсткому диску комп'ютера. Для аналізу цієї інформації можуть бути використані сучасні стандартні програми Excel, SciLab і пакет програм для обробки довгих рядів даних IDL, які дають змогу проводити статистичний аналіз та аналіз на наявність корельованих та випадкових нейтронів від ядерних матеріалів, що діляться.

### Вступ

Системи контролю стану паливовмісних матеріалів (ПВМ) в об'єкті «Укриття» (ОУ) [1] належать до систем, які використовують пасивні методи неруйнівного аналізу стану ядерних матеріалів [2]. Такі вимірювання є неруйнівними в тому сенсі, що вони не змінюють ні фізичний, ні хімічний стан ядерних матеріалів, що діляться (ЯМД), або ПВМ.

Нейтронне поле в приміщеннях ОУ можна поділити на чотири умовні групи:

- 1) нейтрони спонтанного поділу ЯМД;
- 2) нейтрони вимушеного поділу ЯМД;
- 3) нейтрони, відбиті від конструкцій у приміщеннях, де знаходяться ЯМД;
- 4) нейтрони ( $\alpha$ ,  $n$ ) реакції на легких ядрах (у скупченнях ПВМ ОУ знаходиться багато радіоактивних  $\alpha$ -випромінювачів).

Ця класифікація подібна до класифікації джерел нейтронів радіоактивних матеріалів, наведеної у [2].

Електричні імпульси з блоку детектування (БД) можна розглядати або як розподіл подій у часі, або як розподіл часових інтервалів між подіями, залежно від методики обробки отриманих даних [2]. У будь-якому випадку розподіл є результатом деякої комбінації подій, викликаних зареєстрованими нейтронами від вищеперерахованих чотирьох груп. За умов ділення ЯМД, як спонтанного так і вимушеного, зазвичай утворюються декілька миттєвих нейтронів, які корельовані або збігаються за часом, у той час як нейтрони ( $\alpha$ ,  $n$ ) реакції і зовнішнього фону випадково розподілені в часі або не корельовані. Миттєві нейтрони випромінюються за час  $\sim 10^{-14}$  с [3]. Їх об'єднує й те, що розподіл часових інтервалів між імпульсами від випромінених спонтанних та вимушених миттєвих нейтронів не відповідає пуассонівському розподілу. Миттєві нейтрони становлять значну частку з усіх випромінених нейтронів із ЯМД. Тому є певна ймовірність, що на детектор нейтронів потраплять декілька нейтронів майже одно-

© О. А. Кучмагра, Г. І. Одинокін, 2022

часно. Для того, щоб їх розділити в часі й зафіксувати як окремі імпульси, треба мати малий роздільний час роботи детектора та електронних вузлів вимірювального нейтронного каналу. У [2, рис. 16.2] наводиться графік розподілу інтервалів від зареєстрованих корельованих та випадкових нейтронів. Бачимо, що ефект наявності миттєвих нейтронів лежить в області мінімальних часових інтервалів між імпульсами від зареєстрованих нейтронів.

Миттєві нейтрони вимушеного поділу випромінюються в 4л простір, зазнають змін в енергії за рахунок як непружного, так і пружного зіткнень з атомами навколишнього середовища та «сповільнювача» навколо детектора. У кінцевому підсумку якась їх частина досягає детектора нейтронів. Підсумовуючись із нейтронами спонтанного поділу, нейтронами від  $(\alpha, n)$  реакції та нейтронами, які відбиті від будівельних конструкцій, вони реєструються як деяке «перевищення» до відносно постійного рівня присутньої щільності потоку нейтронів. Слід зазначити, що бета-розпад  $^{241}\text{Pu}$ , який призводить до утворення та накопичення  $^{241}\text{Am}$  (альфа-активний елемент) у навколишньому середовищі, зумовлюють постійне, у цей час, зростання швидкості рахунку імпульсів на виході нейтронного інформаційно-вимірювального каналу (ІВК) за рахунок  $(\alpha, n)$  реакції на легких ядрах (максимум накопичення  $^{241}\text{Am}$  у ПБМ ОУ відбудеться приблизно через 76 років після аварії на Чорнобильській АЕС). На сьогодні відбувається дуже повільне зростання нейтронного випромінювання, яке залежить від початкової концентрації нуклідів та за певних умов і на реальних поточних відрізках часу може бути практично непомітним [4]. З іншого боку, нейтронне поле від спонтанного поділу,  $(\alpha, n)$  реакції і відбиті нейтрони від будівельних конструкцій на ОУ відносно стабільні за відсутності зсуву конструкцій і намівання/вимивання скупчень рідких радіоактивних речовин. Останній процес без надходження води в новий конфайнмент ОУ ймовірно слід вважати відсутнім. Тому за підвищення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів ( $K_{\text{ef}}$ ) у ЯМД ПБМ і, відповідно, збільшення кількості миттєвих нейтронів вимушеного поділу, слід очікувати збільшення кількості мінімальних значень часових інтервалів між імпульсами.

### До питання про реєстрацію нейтронів

Основним завданням роботи системи контролю ядерної безпеки (СКЯБ) та експертної системи «Фініш» є контроль стану ПБМ ОУ, який однозначно

пов'язаний з ефективним коефіцієнтом розмноження нейтронів ( $K_{\text{ef}}$ ). З метою контролю  $K_{\text{ef}}$  потрібно фіксувати зміну інтенсивності випромінювання миттєвих (корельованих) нейтронів від ПБМ як результат зміни стану ЯМД. Це вимагає проведення реєстрації часових інтервалів між імпульсами від детектора нейтронів у широкому діапазоні інтервалів між ними з можливістю фіксації наносекундних інтервалів. Якщо маса ЯМД не змінюється, то рівень (кількість) миттєвих випромінених нейтронів спонтанного поділу від ЯМД залишається порівняно незмінним. Зміни у статистиці інтервалів реєстрації нейтронних подій або в статистиці відліків стосуються тільки кількості миттєвих нейтронів вимушеного поділу. Якщо з якихось причин  $K_{\text{ef}}$  зростає, то зростає й кількість миттєвих нейтронів.

Якщо БД містить один детектор нейтронного випромінювання, то мінімальний інтервал часу між імпульсами визначається часом протікання фізичного процесу збору заряду в середині детектора, часом накопичення заряду в попередньому зарядочутливому підсилювачі, постійними інтегруванням та диференціюванням формувачів у наступних електронних вузлах вимірювального каналу.

Технічні апаратні реалізації ІВК параметрів нейтронних потоків з метою реєстрації випромінених миттєвих нейтронів наведено в [5, 6]. У [7] представлена апаратура реєстрації, яка здатна фіксувати часові інтервали між імпульсами від 40 нс. Процес накопичення та аналіз даних проводиться вторинною апаратурою. У таких технічних засобах у разі зміни методики аналізу даних потрібно вносити зміни й у вторинну вимірювальну апаратуру.

ІВК, який розроблено в Інституті проблем безпеки АЕС у Відділенні діагностично-вимірювальних систем, дозволяє фіксувати інтервали часу між імпульсами на виході БД [8]. У склад БД входять дві камери поділу. Прототип такої вимірювальної апаратури описано в [9].

Особливість розробленого ІВК в тому, що він здатен запам'ятовувати хронологічну послідовність (часові ряди) інтервалів часу між імпульсами з двокамерного детектора нейтронів із часовою роздільною здатністю в 10 нс. Це дає можливість проводити незалежну обробку накопичених даних різними методами статистичного і кореляційного аналізу. Основна перевага такого підходу до вимірювання параметрів нейтронного потоку в тому, що аналіз інтервалів часу між подіями або пошук кореляцій переноситься з етапу проведення вимірювань на етап

обробки даних, що значно спрощує та здешевлює експеримент, оскільки вимірювання проводяться однією тією ж достатньо простою електронною апаратурою.

За традиційного ж підходу в разі зміни методики обробки даних потрібно змінювати вторинну ядерно-фізичну апаратуру.

### Склад та опис технічних засобів

На рис. 1 наведена спрощена конструкція двокамерного блока детектування нейтронного випромінювання (БД-2), який входить до ІВК. У його складі УБ-01 — радіаційно стійкий перепідсилювач, детектор нейтронів — камера поділу КНТ-31.

Для зменшення залежності чутливості камери поділу від спектрального складу потоку нейтронів і ефективнішої реєстрації проміжних і швидких нейтронів, камери поміщені в «сповільнювач» нейтронів (стакан з поліетилену високого тиску).

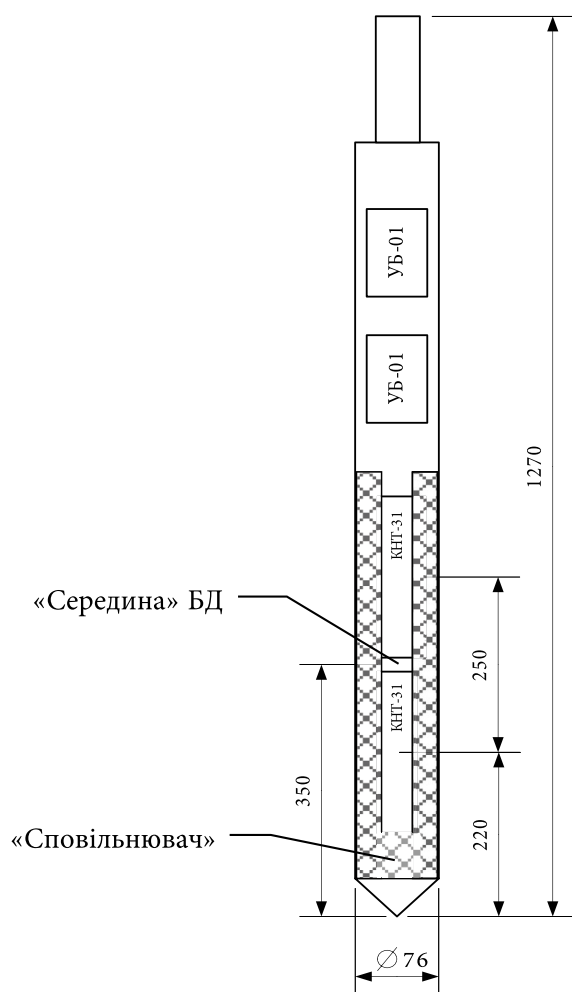


Рис. 1. Креслення загального вигляду блока детектування БД-2

Апаратна складова ІВК (вимірювальна частина) надає первинну інформацію для подальшої статистичної обробки і за функціональним призначенням є нейтронним інформаційно-вимірювальним каналом, який має два незалежних канали (рис. 2).

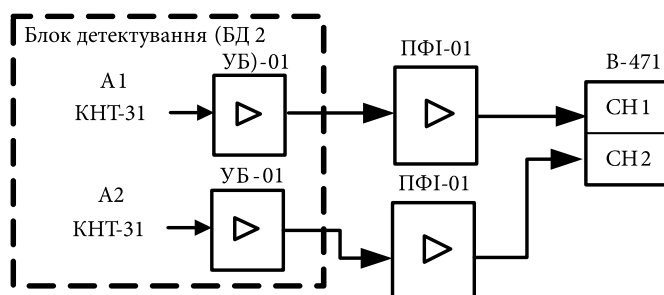


Рис. 2. Спрощена структура ІВК з первинною частиною інформаційно-вимірювальної апаратури

Первинна частина ІВК складається з блока детектування нейтронного потоку БД 2, двох формувачів-підсилювачів сигналу з кабельної лінії зв'язку ПФІ-01, реєстратора-вимірювача інтервалів часу між імпульсами В-471, до складу якого входять два однакових електронних вузла реєстрації — СН-1 та СН-2. За конструкцією ІВК — це двокамерний нейтронний радіометр. В-471 підключається до персонального комп'ютера через USB-порт. На комп'ютері встановлено спеціальне програмне забезпечення, за допомогою якого проводяться керування процесом вимірювання та обробка даних за розробленими методиками й алгоритмами.

В-471 дозволяє фіксувати інтервали часу від 10 нс до 1 000 с між імпульсними сигналами позитивної або негативної полярності амплітудою від 0,5 В до 50 В і тривалістю не менше 10 нс.

В-471 виконано в малогабаритному пластмасовому корпусі. На передній панелі розташовані роз'єми для входних сигналів та роз'єм виходу калібровача з відповідними індикаторними світлодіодами, а також індикатор живлення. На задній панелі розташовані роз'єми входу і виходу синхронізації, роз'єми для підключення кабелю блока живлення. Зовнішній вигляд В-471 показаний на рис. 3.

Функції включення і виключення живлення В-471 покладено на програмне забезпечення: після запуску програми відбувається включення живлення В-471, після завершення роботи програми живлення вимикається. Робота В-471 оснований на лічильно-імпульсному принципі, що полягає в підрахунку кількості імпульсів робочої частоти протягом вимірю-



Рис. 3. Вимірювач інтервалів часу В-471. Вигляд з боку передньої і задньої панелей

ваного інтервалу часу. За допомогою програмного забезпечення виконується установка режимів роботи вимірювача, калібрування, запуск вимірювання, відображення і збереження результатів вимірювань.

*Основні технічні характеристики вимірювача інтервалів часу В-471:*

кількість вимірювальних каналів — 2;  
діапазон вимірювання інтервалів часу, с — від  $10^{-8}$  до  $10^3$ ;

амплітуда вимірюваних входних сигналів, В — від 0,5 до 50;

діапазон установки рівня дискримінації входних імпульсних сигналів:

при коефіцієнті ослаблення  
вбудованого атенюатора 1:1, В —  $\pm 4$ ;

при коефіцієнті ослаблення вбудованого атенюатора 1:10, В —  $\pm 40$ .

*Межі абсолютної похибки установки рівня дискримінації, В:*

при коефіцієнті ослаблення вбудованого атенюатора 1:1, В —  $\pm 0,1$ ;

при коефіцієнті ослаблення вбудованого атенюатора 1:10, В —  $\pm 1$ ;

вхідний опір вимірювальних каналів, МОм —  $1 \pm 0,05$ ;

вхідна ємність вимірювальних каналів, пФ — не більше 25;

межі відносної похибки установки дійсного значення частоти вбудованого опорного генератора щодо номінального значення 10 МГц —  $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ ;

межі відносної зміни частоти вбудованого опорного генератора при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$  в діапазоні робочих температур — не більше  $\pm 5 \cdot 10^{-8}$ ;

час встановлення робочого режиму, год — не більше 1;

напруга живлення від мережі змінного струму, В —  $220 \pm 22$ ;

споживана потужність, В · А — не більше 20;

габаритні розміри, мм — не більше  $195 \times 115 \times 45$ ;

вага, кг — не більше 1,5.

На рис. 4 представлено результати натурних вимірювань із нейтронними джерелами, в яких присутні миттєві нейтрони — у сховищі відпрацьованого ядерного палива (СВЯП) на Чорнобильській АЕС. Натурні вимірювання проходили в липні 2017 р. Тривалість вимірювань 25 хвилин. На гістограмах, після комп'ютерної обробки інформації з електронних вузлів СН-1 та СН-2 добре видно, що в кожному окремому каналі вимірювання мінімальний зафік-

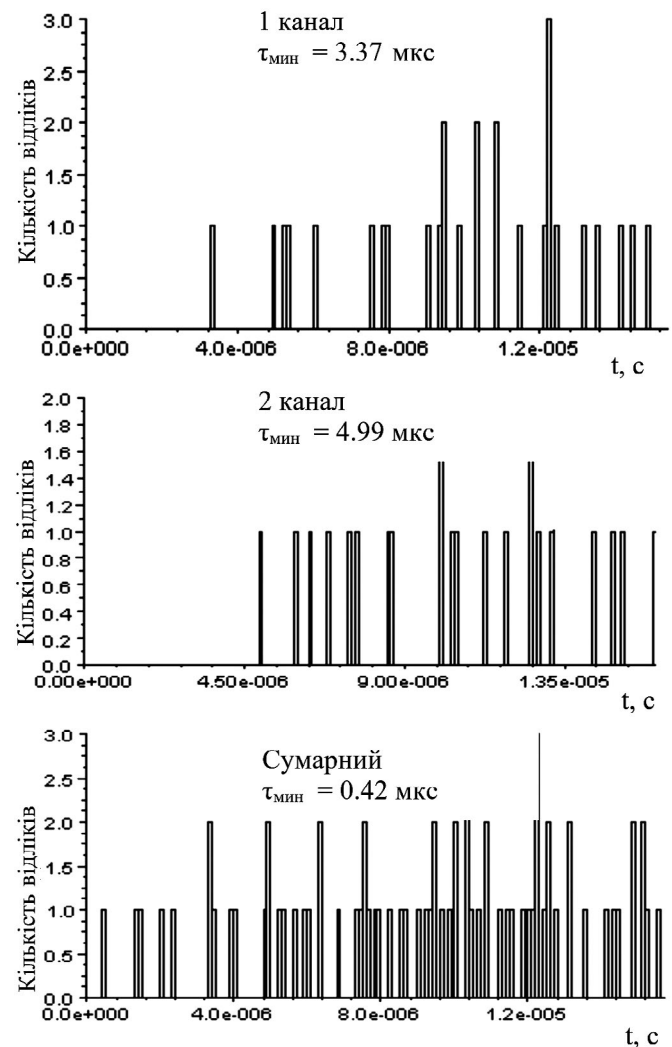


Рис. 4. Гістограми часових інтервалів між нейтронними імпульсами на виході ІБК з двокамерним блоком детектування

сований інтервал складає приблизно 3,4–5 мкс. При підсумовуванні імпульсів на виході В-471 (представлення зареєстрованих часових інтервалів на одній часовій осі від електронних вузлів СН-1, СН-2) зафіксований мінімальний інтервал часу між імпульсами відповідає приблизно 400 нс.

Можна припустити, що інтервали реєстрації менш ніж 400 нс не фіксувались, тому що тривалість вимірювань досить невелика і наявність миттєвих нейтронів мала. За збільшення тривалості та при вимірюванні параметрів нейтронних потоків з джерел з більшими значеннями  $K_{\text{ef}}$  можна очікувати, що будуть зафіксовані менші часові інтервали.

### Висновки

1. Розроблений ІВК параметрів нейтронного потоку з двокамерним блоком детектування дозволяє реєструвати часові інтервали між нейтронними імпульсами значно менші (починаючи з 10 нс) порівняно з одноканальними нейтронними радіометрами.

2. Наявність часових інтервалів у наносекундному діапазоні значень з достатньою вірогідністю можна класифікувати як імпульси реєстрації миттєвих нейтронів ділення, а зміна їхньої кількості може позначати зміну ефективного коефіцієнта розмноження ЯМД.

3. Запропонована конфігурація ІВК є перспективною і може бути розширена за кількістю камер ділення та електронних вузлів реєстрації нейтронів для більш точної діагностики і прогнозування стану ЯДМ ОУ.

### Список використаної літератури

1. Высотский Е. Д. Особенности контроля ядерной безопасности объекта «Укрытие» в период сооружения нового безопасного конфайнмента / Е. Д. Высотский, А. И. Довыдьков, В. А. Краснов, В. Н. Щербин // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2011. — Вип. 17. — С. 91–97.

2. Райлли Д. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. Справочник / Д. Райлли, Н. Энслин, Х. Смит, С. Крайнер // Отчет Комиссии США по ядерному регулированию NUREG/CR-5550. Перевод с английского. — ВНИИА, 2007. — 703 с.

3. Фролов В. В. Ядерно-физические методы контроля делящихся материалов / В. В. Фролов. — Москва : Энероатомиздат, 1989. — 185 с.

4. Бегичев С. Н. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС / С. Н. Бегичев, А. А. Боровой, Е. В. Бурлаков

и др. // Препринт ИАЭ-5268/3. — Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова, 1990. — 16 с.

5. Degweker S. B. An improved technique for passiv neutron assay through the use of extendable dead time and higher moments analysis // S. B. Degweker, M. Srinivasan, C. G. Panchal // Nuclear Power and Safety. — 1990. — Vol. 18 (3). — P. 38–46.

6. Degweker S. B. Effect of deadtime on the statistics of time correlated pulses — Application to the passiv neutron assay problem / S. B. Degweker // Annals of Nuclear Energy. — 1989. — Vol. 16, No. 8. — P. 409–416.

7. Fulvio A. Di. Passiv assay of plutonium metal plates using a fast-neutron multiplicity counter / A. Di. Fulvio, T. H. Shian, T. Gordan, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physic. — 2017. — Vol. 855. — P. 92–101.

8. Розробка та вдосконалення методів нейтронної діагностики для визначення параметрів безпеки ядерних установок : (Звіт про науково-дослідну роботу (проміжний) / ІПБ АЕС НАН України. — № ДР 0117U002305, інв. № 4024. — Чорнобиль. 2016. — 76 с.

9. Degweker S. B. Development and testing of neutron pulse time stamping data acquisition system for neutron experiment / S. B. Degweker, Y. Alim, R. Kumar, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physic. Research Section. — 2015. — Vol. 770. — P. 8–13.

**O. A. Kuchmagra, G. I. Odynokin**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,  
NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine*

### Two-Chamber Unit for Detecting Parameters in the Neutron Flux

The detection unit contains two neutron detectors — fission chambers KNT-31 or KNT 31-1, in which the radiator sensitive to neutron radiation is  $^{235}\text{U}$  (concentration of  $^{235}\text{U}$  in the radiator is more than 90%). The detection unit also includes two radiation-resistant preamplifiers (primary electronic equipment), which are connected to the cable transmission line to the secondary equipment, which captures the moment of pulses from the reaction of neutrons with the fission chamber radiator and save information about the time of these pulses. Further processing of the intervals between neutron events (intervals between pulses) can be done according to individual methods of the experimenter. The presence of a data processing unit

type B-471 significantly expands the capabilities of the experimenter on the conclusions of statistical analysis of data and forecasting the development of emergencies in fuel-containing materials of the Shelter object.

The presence of time intervals in the nanosecond range of values with sufficient probability can be classified as pulses of registration of instantaneous fission neutrons, and a change in their number may indicate a change in the effective multiplication factor of fuel containing materials.

The analysis of the statistical properties of the flow of neutron event recording intervals by the electronic equipment makes it possible to predict the occurrence of a self-sustaining chain reaction. This is the main task of the Shelter object nuclear safety system. The proposed configuration of the CPI is promising and can be expanded by the number of fission chambers and electronic neutron detection units for more accurate diagnosis and prediction of the state of fissile nuclear materials.

**Keywords:** information-measuring channel, neutron flux parameters, two-chamber block detection, time intervals between pulses.

## References

1. Vysotskyi Ye. D., Dovydkov A. I., Krasnov V. A., Shcherbin V. N. (2011). [Features of nuclear safety control of the Shelter object during the construction of a new safe confinement]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 17, pp. 91–97. (in Rus.)
2. Reilly D., Ensslin N., Smith H., Krainer S. (2007). Passive non-destructive analysis of nuclear materials. In: *Report of the US Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-5550*. VNIIA, 703 p. (in Rus.)
3. Frolov V. V. (1989). *Yaderno-fizicheskiye metody kontrolya delyashchikhsya materialov* [Nuclear physics methods for controlling fissile materials]. Moscow: Energoatomizdat, 185 p. (in Rus.)
4. Begichev S. N., Begichev S. N., Borovoy A. A., Burlakov E. V., et al. (1990). *Toplivo reaktora 4-go bloka CHAES* [Fuel of the reactor of the 4th block of the Chornobyl NPP]. Preprint IAE-5268/3. I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, 16 p. (in Rus.)
5. Degweker S. B., Srinivasan M., Panchal C. G. (1990). An improved technique for passiv neutron assay through the use of extendable dead time and higher moments analysis. *Nuclear Power and Safety*, vol. 18, no. 3, pp. 38–46.
6. Degweker S. B. (1989). Effect of deadtime on the statistics of time correlated pulses — Application to the passiv neutron assay problem. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 16, no. 8, pp. 409–416.
7. Fulvio A. Di., Shian T. H., Gordan T., et al. (2017). Passiv assay of plutonium metal plates using a fast-neutron multiplicity counter. *Nuclear Instruments and Methods in Physic*, vol. 855, pp. 92–101.
8. *Development and improvement of neutron diagnostic methods for determining the safety parameters of nuclear installations*. Report on research work (intermediate). State registration number 0117U002305, inv. no. 4024. Chornobyl, 2016, 76 p. (in Rus.)
9. Degweker S. B., Alim Y., Kumar R., et al. (2015). Development and testing of neutron pulse time stamping data acquisition system for neutron experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physic. Research Section*, vol. 770, pp. 8–13.

Надійшла 17.02.2022

Received 17.02.2022