

Б. В. Кайдик^{1,2,*}, Т. В. Бібік¹, В. І. Гаврилюк², С. С. Драпей², О. П. Романова²¹ НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: kaidyk-bohdan@ukr.net

**ЗАСТОСУВАННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ
ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ**

На навчально-тренувальному майданчику «Комплекс інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту» Інституту ядерних досліджень НАН України проведено експериментальні дослідження можливості застосування гіпергеометричного розподілу для перевірки працездатності технічних засобів систем фізичного захисту радіаційно-небезпечних об'єктів. Розглянуто два випадки відносно стану технічних засобів системи фізичного захисту: випадок 1 – у сукупності відсутні непрацездатні датчики, випадок 2 – у сукупності не більше одного непрацездатного датчика. Представлено основну та альтернативну гіпотези, щодо запропонованих випадків. Застосування випадків 1 та 2 демонструє значну економію часових ресурсів і вказує на прийнятність використання даної методики для перевірки працездатності технічних засобів систем фізичного захисту радіоактивних матеріалів і пов'язаних з ними установок.

Ключові слова: система фізичного захисту, працездатність, технічні засоби, гіпергеометричний розподіл.

1. Вступ

Щоб упевнитися, що система фізичного захисту радіаційно-небезпечних об'єктів виконує покладені на неї завдання, законодавство вимагає проведення регулярних перевірок ефективності систем фізичного захисту, у першу чергу працездатності технічних засобів системи фізичного захисту. Вчасне виявлення непрацездатних технічних засобів і виправлення небажаних відхилень від установлених норм є необхідною умовою експлуатації системи фізичного захисту [1, 2].

У той же час як на АЕС, так і на об'єктах, призначених для поводження з радіоактивними відходами, є безліч однотипних засобів виявлення (наприклад, вібраційні датчики засобу «Peridest», що встановлюються на огороженнях захищеної зони; магнітоконтактні датчики типу «Геркон», що встановлюються на дверях із метою контролю та управління доступом у приміщення, у приладах блоків обробки сигналів та приладах приймально-контрольних, а також як сповіщувачі відкриття вікон та дверей), перевірка яких займає значний час і потребує затрат додаткових людських ресурсів. Виходячи з цього, метою роботи є встановлення можливості застосування статистичних методів, що показали себе дієвими в обліку та контролі ядерних матеріалів, для перевірки працездатності технічних засобів системи фізичного захисту й надання рекомендацій експлуатуючим організаціям щодо застосування цих методів, що у свою чергу дозволить економити як часові, так і людські ресурси.

2. Метод і результати розрахунку

Практика експлуатації систем фізичного захисту показує, що часто неможливо провести перевірку працездатності всіх технічних засобів системи в термін, визначений експлуатаційною документацією. Застосовуючи статистичні методи, можна підібрати такий розмір вибірки з певної сукупності однотипних технічних засобів, який дозволить за результатами випробувань технічних засобів, що входять у вибірку, отримати дані про працездатність всієї сукупності засобів зі встановленою наперед допустимою ймовірністю.

Для забезпечення репрезентативності вибірки необхідно дотримуватися принципу випадковості відбору відповідних технічних засобів, який передбачає, що на включення або виключення кожного засобу з вибірки не може вплинути будь-який інший фактор, окрім випадку.

Для проведення експерименту вихідними параметрами при визначенні випадкової вибірки згідно з гіпергеометричним розподілом були:

 N – наявна кількість датчиків, $N = 120$; p – норма дефектності, $p = 5\%$ (рекомендується застосовувати величину не більшу, ніж 5%); γ – рівень довіри, $\gamma = 0,95$ ($0,95$ – прийнятий рівень довіри при проведенні дослідження); n – кількість датчиків у вибірці; d – кількість дефектних засобів.

Для підтвердження прийнятності застосування статистичних методів при перевірці працездатності технічних засобів систем фізичного захисту користуємося рівнем значущості α ($\alpha = 1 - \gamma$)

[3], який указує на ймовірність існування непрацездатних засобів виявлення.

Під час планування перевірки працездатності з використанням гіпергеометричного розподілу розглядалися два випадки, для яких було встановлено основну H_0 та альтернативну H_1 гіпотези.

Випадок 1. У сукупності відсутні непрацездатні датчики ($k = 0$) (називаємо його так відповідно до встановленої основної гіпотези).

Основна гіпотеза H_0 . У сукупності відсутні непрацездатні датчики ($k = 0$).

Альтернативна гіпотеза H_1 – у сукупності присутні непрацездатні датчики ($k > 0$).

Розмір вибірки при цьому визначатиметься за формулою [1]

$$P(k=0, N, d, n) = \frac{\binom{d}{0} \binom{N-d}{n}}{\binom{N}{n}} = \frac{(N-d)! (N-n)!}{N! (N-d-n)!} \leq \left(1 - \frac{n}{N}\right) \left(1 - \frac{n}{N-1}\right) \dots \left(1 - \frac{n}{N-d+1}\right) \leq \left[1 - \frac{n}{N}\right]^d, \quad (1)$$

де $P = \alpha = 0,05$.

У ситуаціях, коли ми припускаємо наявність одного непрацездатного датчика, потрібно розглянути випадок 2.

Випадок 2. У сукупності не більше одного непрацездатного датчика ($k \leq 1$) (називаємо його так відповідно до встановленої основної гіпотези).

Основна гіпотеза H_0 . У сукупності не більше одного непрацездатного датчика ($k \leq 1$).

Альтернативна гіпотеза H_1 – у сукупності більше одного непрацездатного датчика ($k > 1$).

У цьому випадку, для того щоб підтвердити достовірність отриманих результатів, розрахунок вибірки проводиться як для двох взаємовиключних (несумісних) подій із рівнем значущості $\alpha = Pr = 0,05$ [1]:

$$Pr = Pr_1(k=0, N, d, n) + Pr_2(k=1, N, d, n) \leq \left(1 - \frac{n}{N}\right)^d + \left(\frac{dn}{N-d+1}\right) \left(1 - \frac{n}{N}\right)^{d-1}. \quad (2)$$

Відповідно до запропонованих гіпотез було визначено ймовірну кількість дефектних датчиків у сукупності з нормою дефектності $p = 0,05$:

$$d = N \cdot p = 120 \cdot 0,05 = 6 \text{ (датчиків)}. \quad (3)$$

Розмір вибірки для випадку 1 для перевірки основної та альтернативної гіпотез розраховували, здійснивши такі перетворення:

$$\alpha = \left(1 - \frac{n}{N}\right)^d \Rightarrow \quad (4)$$

$$n = N \left(1 - \sqrt[d]{\alpha}\right). \quad (5)$$

Отже, розмір вибірки становив

$$n = 120 \cdot \left(1 - \sqrt[6]{0,05}\right) = 47 \text{ (датчиків)}. \quad (6)$$

Розмір вибірки для випадку 2 аналітично розрахувати неможливо, тому він розраховувався згідно з рівнянням (2) шляхом ітерацій.

$$Pr = Pr_1(k=0 | 120, 6, n) + Pr_2(k=1 | 120, 6, n) \leq \left(1 - \frac{n}{120}\right)^6 + \left(\frac{6n}{115}\right) \left(1 - \frac{n}{120}\right)^5 = 0,05. \quad (7)$$

Якщо взяти $n = 71$, то

$$Pr = Pr_1(k=0 | 120, 6, 71) + Pr_2(k=1 | 120, 6, 71) = 0,046687. \quad (8)$$

Отже, розмір вибірки приймався рівним $n = 71$ датчик.

Для підтвердження або спростування запропонованих гіпотез і розрахунків на основі їх були поставлені експерименти.

3. Постанова і проведення експериментів

Об'єктом дослідження були вібраційні засоби виявлення («Тополь» та «Peridect»), що встановлені на навчально-тренувальному майданчику «Комплекс інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту» Навчального центра з фізичного захисту, обліку та контролю ядерних матеріалів Інституту ядерних досліджень НАН України.

Перед проведенням експерименту здійснювалася комплексна перевірка працездатності всіх досліджуваних датчиків вібраційного засобу виявлення. При цьому вимірювався затрачений час на виконання комплексної перевірки 120 датчиків: $T = 9$ год 30 хв.

Затрачений час на проведення такої перевірки перевищує час однієї робочої зміни, а це у свою чергу збільшує ймовірність впливу людського фактора на результати перевірки – збільшується можливість допущення помилок людиною, яка

безпосередньо перевіряє датчики, наприклад таких, як ненавмисне пошкодження контактів підключення чи інших елементів датчика, що з часом може призвести до нестабільної роботи датчика або виведення його з ладу.

Після підтвердження працездатності вібраційних засобів виявлення з метою перевірки прийнятих гіпотез оператором пульта фізичного захисту навмання в кожному із експериментів було відключено один датчик, переводячи його до атрибуту непрацездатних. При цьому дослідник, який проводив перевірку, не знав місця розташування непрацездатного датчика.

У рамках одного експерименту перевірка працездатності вібраційних засобів виявлення із застосуванням статистичного методу здійснювалася шляхом:

перевірки зовнішнього стану датчиків засобів виявлення, відсутності механічних пошкоджень та укомплектованості засобів відповідно до технічної документації;

відображення на пульті фізичного захисту поточної інформації про стан та режим роботи засобів виявлення;

формування сигналу тривоги шляхом фізичного впливу на огороження із встановленим на ньому датчиком (імітування дій правопорушника, що робить спробу подолати або пошкодити

огороження);

реєстрації сигналу на пульті фізичного захисту в разі спрацювання датчика. Якщо сигнал тривоги не передавався на пульт фізичного захисту після впливу на один із датчиків, вплив на нього повторювався з метою підтвердження непрацездатного стану;

відображення отриманої інформації щодо працездатності засобу виявлення у протоколі проведення експерименту.

У кожному експерименті впливу зазнавала одна й та ж кількість датчиків, розрахована за допомогою гіпергеометричного розподілу відповідно до встановлених гіпотез, та проводилася випадкова вибірка датчиків із сукупності однотипних датчиків типу «Тополь» та «Peridect».

Перевірка випадків 1 та 2 проводилася в рамках одного експерименту. Спочатку проводилася перевірка визначеної частини датчиків згідно з розрахунком для випадку 1, а для випадку 2 проводилася перевірка додатково 23 датчиків ($48 + 23 = 71$), щоб їхня кількість згідно з розрахунком для випадку 2 становила 71.

Загалом було проведено 21 експеримент із перевірки працездатності вібраційного засобу виявлення, отримані експериментальні результати для кожного випадку наведено на рис. 1 і 2.

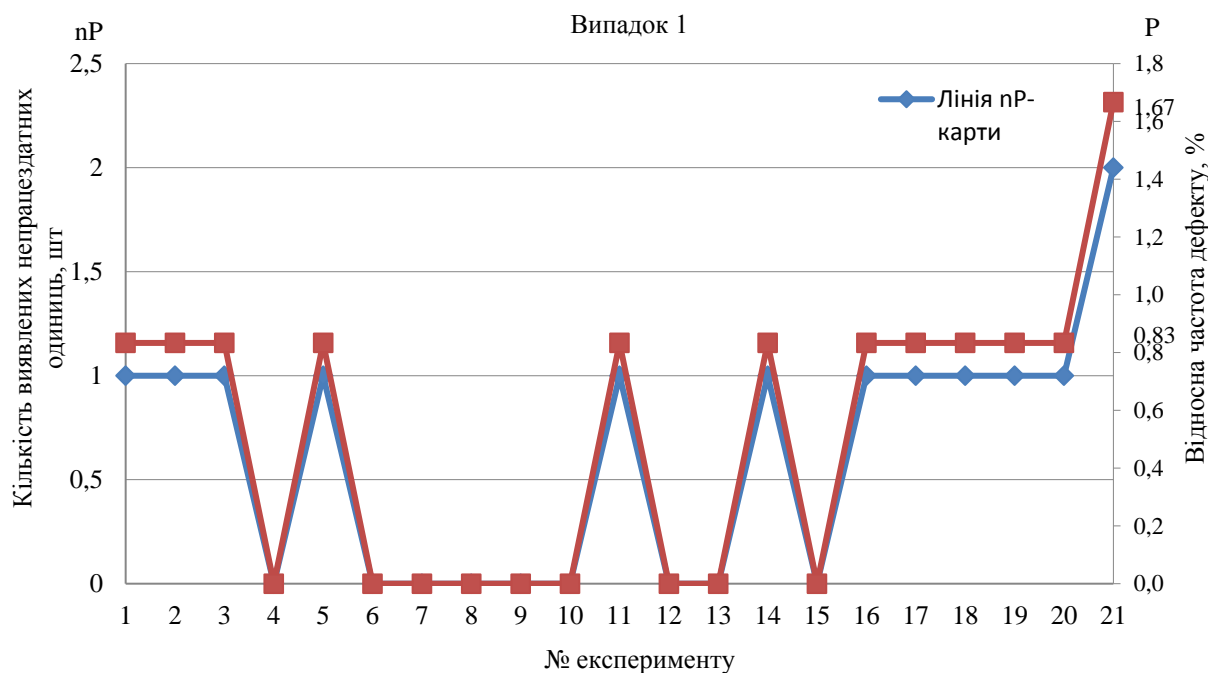


Рис. 1. Контрольна PnP-карта для випадку 1. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Результати, отримані у випадку 1, відхиляють основну гіпотезу, проте не дають однозначного результату щодо застосування випадку 1 у зв'язку з тим, що в 9 експериментах із 21, а це становить 43 %, не було виявлено непрацездат-

ного датчика. Час одного такого експерименту становив 3 год 30 хв. Виграш у часі очевидний, але результати є не лише незадовільними, а й неприйнятними з точки зору фізичного захисту.

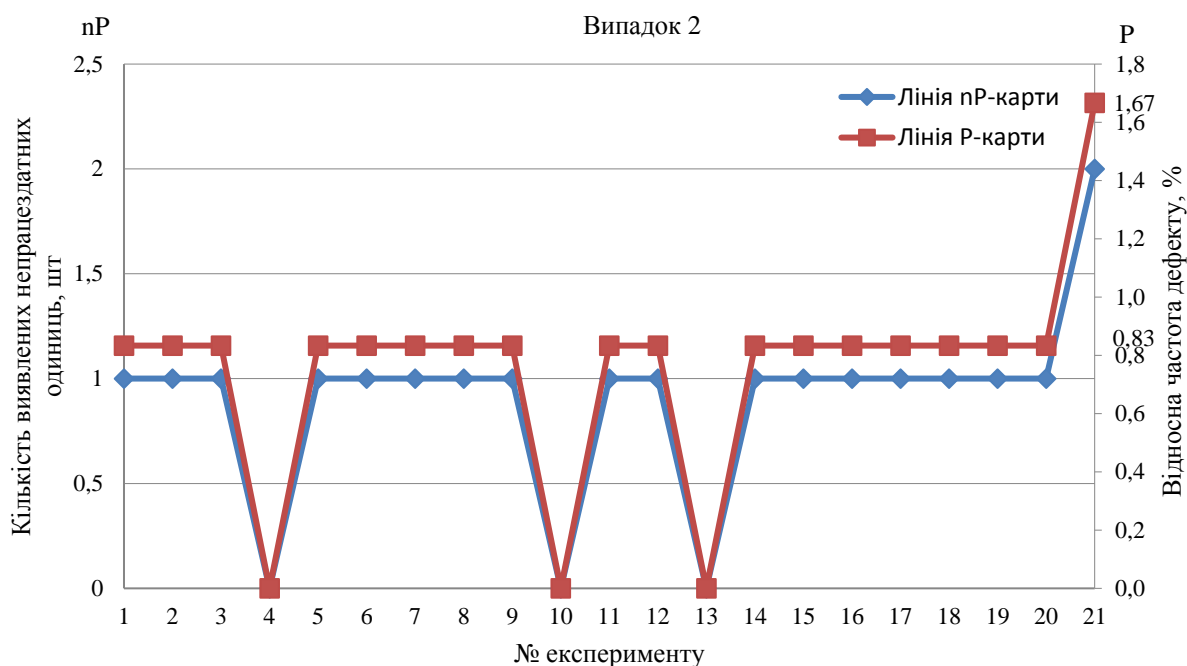


Рис. 2. Контрольна PnP-карта для випадку 2.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

В експерименті 21 було виявлено 2 непрацездатні датчики. Поява другого непрацездатного датчика в експерименті 21 пов'язана із вичерпанням технічного ресурсу датчика. Після вияву другого непрацездатного датчика проводилася комплексна повномасштабна перевірка працездатності вібраційних засобів виявлення з метою підтвердження, що технічні умови проведення експерименту не змінилися.

Для наглядної оцінки динаміки зміни отриманих результатів була побудована контрольна PnP-карта, за допомогою якої в реальних умовах на об'єкті при накопиченні статистики можна прогнозувати стан досліджуваної системи. Вона включає в себе два типи контрольних карт – P- і nP-карту, при цьому в P-картах відображається відносна частота дефекту, тобто відношення числа виявлених дефектів до числа перевірених одиниць, у nP-картах відображається число дефектів (у виборці на момент випробування працездатності). Дані карти доповнюють одна одну, тому для відстеження кількісної та якісної оцінки тенденції вияву непрацездатних одиниць зручно об'єднати дані типи діаграм.

Отримані експериментальні результати для визначеного об'єму вибірки відповідно до випадку 2 підтверджують основну гіпотезу та вказують на можливість застосування випадку 2 для проведення перевірок працездатності, адже лише в 3 експериментах із 21 ми не виявили непрацездатний технічний засіб. Усереднений час на перевірку працездатності технічних засобів відповідно до випадку 2 становив 5 год 30 хв. Отже,

виграш у часі 4 год, що є значною величиною і це лише в межах одного засобу виявлення.

З огляду на можливість застосування не лише випадку 2, який показав себе дієвим, а й випадку 1, для якої ми отримали неоднозначні результати, то до останнього можна запропонувати застосувати так званий фактор кінцевого коригування. Фактор кінцевого коригування, хоча й застосовується для повторної вибірки, але як показала практика, його доцільно застосовувати й для випадку 1 у ситуаціях, коли в персоналу виникають сумніви щодо отриманих результатів. У цьому випадку фактор кінцевого корегування становить [1]

$$n' = \frac{n}{\left(1 + \frac{n}{N}\right)} = \frac{47}{\left(1 + \frac{47}{120}\right)} = 33,7725 = 34 \text{ (датчики)}, \quad (9)$$

тобто потрібно додатково перевірити ще 34 датчики (загалом 81 датчик). Після здійснення перевірки додаткових датчиків результат експерименту цілком збігся з результатом, отриманим при перевірці випадку 2 (71 датчик).

При застосуванні випадку 1 можна встановити більш жорсткі умови до значень величин:

норму дефектності – значно менше 5 %, якщо це не зазначено в технічному паспорті;
рівень довіри – підвищити довірчу ймовірність від 95 до 99 %.

При цьому розмір вибірки буде відповідно збільшуватися, що буде впливати як на точність отриманих результатів, так і на їхню якісну оцінку, і витрачений на перевірку час також буде зростати.

4. Висновки

Нами було експериментально доведено прийнятність застосування статистичних методів для перевірки працездатності технічних засобів систем фізичного захисту. Експеримент виконувався на навчально-тренувальному майданчику «Комплекс інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту» Інституту ядерних досліджень НАН України. Для перевірки працездатності технічних засобів застосовувався гіпергеометричний розподіл, що дозволяє відстежувати характеристику об'єкта за встановленим атрибутом. Було досліджено два випадки щодо стану технічних засобів системи фізичного захисту: випадок 1 – у сукупності непрацездатні датчики відсутні; випадок 2 – у сукупності є один непрацездатний датчик. Сформульовано аналітичні вирази розв'язання рівнянь в обох випадках.

Отримані експериментальні результати:

1) указують на доцільність застосування випадку 1 з урахуванням фактора кінцевого коригування, у даному випадку результати аналогічні результатам при застосуванні випадку 2;

2) підтвердили прийнятність застосування випадку 2 при перевірці працездатності технічних засобів (18 експериментів із 21 завершилися виявленням непрацездатного датчика).

Проведені експерименти вказали на прийнятність застосування статистичних методів на практиці, адже економія часових ресурсів (разом з тим і людських) становить 63 % для випадку 1 без урахування фактора кінцевого коригування та 42 % для випадку 2, що є досить вагомим аргументом з економічної точки зору. Також результати дозволяють стверджувати, що статистичні методи доцільно застосовувати при перевірці працездатності технічних засобів системи фізичного захисту АЕС України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Загальні вимоги до систем фізичного захисту ядерних матеріалів при їх перевезенні: Наказ Держатомрегулювання України від 28.08.2008 № 156. [Офіційний вісник України 81 \(2008\) 2753](#).
2. Про затвердження Порядку експлуатації інженерно-технічних засобів систем фізичного захисту ядерних установок, об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами, іншими джерелами іонізуючого випромінювання: Наказ Міністерства палива та енергетики України, Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, Міністерства внутрішніх справ України від 23 червня 2010 року № 252/492/267. [Офіційний вісник України 58 \(2010\) 2043](#).
3. [Учебно-методический центр по учету и контролю ядерных материалов. Статистические методы для учета и контроля ядерных материалов \(Обнинск, 2005\)](#).

Б. В. Кайдык^{1,2,*}, Т. В. Бык¹, В. И. Гаврилюк², С. С. Драпей², Е. П. Романова²

¹ НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

² Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

*Ответственный автор: kaidyk-bohdan@ukr.net

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

На учебно-тренировочной площадке «Комплекс инженерно-технических средств системы физической защиты» Института ядерных исследований НАН Украины проведены экспериментальные исследования возможности применения гипергеометрического распределения для проверки работоспособности технических средств системы физической защиты радиационно-опасных объектов. Рассмотрены два случая относительно состояния технических средств системы физической защиты: случай 1 – в совокупности отсутствуют неработоспособные датчики; случай 2 – в совокупности не более одного неработоспособного датчика. Представлены основная и альтернативная гипотезы относительно предложенных случаев. Применение случаев 1 и 2 демонстрирует значительную экономию временных ресурсов и указывает на приемлемость применения данной методики для проверки работоспособности технических средств систем физической защиты.

Ключевые слова: система физической защиты, работоспособность, технические средства, гипергеометрическое распределение.

B. V. Kaidyk^{1,2,*}, T. V. Bibik¹, V. I. Gavryliuk², S. S. Drapey², O. P. Romanova²

¹ *National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*

² *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: kaidyk-bohdan@ukr.net

STATISTICAL METHODS FOR PERFORMANCE TESTING OF THE TECHNICAL MEANS OF THE PHYSICAL PROTECTION SYSTEM

On the exterior training site «Complex of engineering and technical means of the physical protection system» of the Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine there was carried out experimental research on the possibility of applying a hypergeometric distribution to verify the performance testing of technical means of the physical protection system of radiation-hazardous facilities. There were considered two cases concerning the status of technical means of the physical protection system, namely: the case 1 – disabled sensors are missing in aggregate and the case 2 – there is no more than one disabled sensor in aggregate. There are presented the main and the alternative hypothesis for the proposed cases. The use of cases 1 and 2 demonstrates significant savings in time resources and indicates the acceptability of using this methodology for performance testing of technical means of physical protection system of radioactive materials and associated facilities.

Keywords: physical protection system, performance, technical means, hypergeometric distribution.

REFERENCES

1. General requirements for systems of physical protection of nuclear materials during their transportation: Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine dated 28.08.2008 No. 156. [Ofitsiyyny Visnyk Ukrayiny 81 \(2008\) 2753](#). (Ukr)
2. On Approval of the Procedure for the Utilization of Engineering Equipment of Physical Protection Systems for Nuclear Installations, Facilities Designed for Radioactive Waste Management, and Other Sources of ionizing Radiation: The Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, the Ministry of Emergencies and Affairs of Population Protection from the consequences of the Chernobyl catastrophe of Ukraine, the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated 23 June 2010 No. 252/492/267. [Ofitsiyyny Visnyk Ukrayiny 58 \(2010\) 2043](#). (Ukr)
3. [Training center for accounting and control of nuclear materials. Statistical methods for accounting and control of nuclear materials \(Obninsk, 2005\)](#). (Rus)

Надійшла 14.11.2018
Received 14.11.2018