

Б.В. Лащонов, І.П. Сініцин

ПРОГРАМНО-АПАРАТНА СИСТЕМА БЕЗКОНТАКТНОГО ВИЯВЛЕННЯ МІН НА ОСНОВІ НЕПРУЖНОГО РОЗСІЮВАННЯ НЕЙТРОНІВ ТА МАШИННОЇ ОБРОБКИ СПЕКТРІВ ХАРАКТЕРИСТИЧНОГО γ -ВИПРОМІНЮВАННЯ

Запропоновано програмно-апаратну систему дистанційного виявлення мін з використанням методу нейтронного неруйнівного аналізу. Метод заснований на аналізі взаємодії швидких нейтронів з ядрами азоту, вуглецю та кисню у складі вибухових речовин і машинному обробленні спектрів характеристичного γ -випромінювання, що виникає в результаті непружного розсіювання. Проведено моделювання γ -спектрів для типових компонентів мін, розглянуто можливості реалізації методу в польових умовах, а також надано рекомендації щодо вибору джерел нейтронів і методик розрахунку спектрів з урахуванням спотворювальних факторів.

Ключові слова: нейтронне розсіювання, γ -спектроскопія, розмінування, вибухові речовини, азот, неруйнівний аналіз, дистанційне виявлення мін, машинне навчання, нейронні мережі, штучний інтелект.

B.V. Lashchonov, I.P. Sinitsyn

SOFTWARE-HARDWARE SYSTEM FOR CONTACTLESS MINE DETECTION BASED ON INELIGIBLE NEUTRON SCATTERING AND MACHINE PROCESSING OF CHARACTERISTIC γ -RADIATION SPECTRA

This paper proposes a software-hardware system for remote mine detection using the neutron nondestructive analysis method. The method is based on the analysis of the interaction of fast neutrons with nitrogen, carbon, and oxygen nuclei in explosives and computer processing of the spectra of characteristic γ -radiation resulting from inelastic scattering. The γ -spectra are simulated for typical mine components, the possibilities of implementing the method in field conditions are considered, and recommendations are given for the selection of neutron sources and methods for calculating spectra, taking into account distorting factors.

Keywords: neutron scattering, γ -spectroscopy, demining, explosives, nitrogen, non-destructive analysis, remote mine detection, machine learning, neural networks, artificial intelligence.

Вступ

Розмінування залишається гострою гуманітарною проблемою. Традиційні методи розмінування передбачають контакт із вибухонебезпечними об'єктами, що пов'язано з високим ризиком. Сучасні фізичні методи, включаючи застосування різних типів іонізуючого випромінювання, дозволяють успішно розвивати безконтактні підходи до пошуку мін. Одним із найперспективніших методів є нейтронний аналіз складу речовини з реєстрацією характеристичного γ -випромінювання – метод миттєвого нейтронно-активаційного аналізу (prompt gamma neutron activation analysis, PGNAА) [1–9]. Однак використання цього або інших відомих методів

пошуку мін за допомогою дронів, а також застосування нейронних мереж для аналізу спектрів випромінювання на даний момент видається дуже перспективним.

Для кращого розуміння можливості реалізації цього завдання розглянемо всі компоненти, необхідні для його вирішення: джерела нейтронів (табл. 1), хімічний склад вибухових речовин (ВР) (табл. 2), приклади спектрів γ -випромінювання, методики обробки результатів.

Опис запропонованої галузі автоматизації

Спочатку розглянемо існуючі джерела нейтронів та їхні характеристики.

Енергетичний спектр нейтронів від різних джерел зображено на рис.1 [6], де:

- 1 – ядерний реактор;
- 2 – циклотрон з пучком дейтронів енергії 40 MeV;
- 3 – $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ -джерело;
- 4 – 4-14 MeV нейтронний генератор.

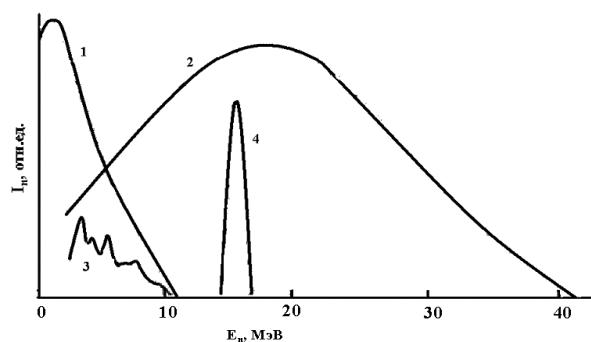


Рис. 1. Енергетичний спектр нейтронів

Таблиця 1

Джерела нейтронів

Тип джерела	Розміри (мм)	Вага (кг)	Вихід нейтронів (нейтронів/сек)	Примітки
Am-Be (AMN.PE4)	$\varnothing 30.1 \times 60.2$	~ 0.1	$\sim 2 \times 10^6$ на Сі	Постійне джерело
Thermo Fisher P-320	$\varnothing 190 \times 440$	~ 9	до 1×10^8	Компактний, портативний
Starfire nGen TM -310	$\varnothing 70 \times 480$	~ 7	до 1×10^8	Ультракомпактний, інтегрований
Коаксіальний генератор	$\varnothing 280 \times 260$	~ 18	до 1.2×10^{12} (D-D) / 3.5×10^{14} (D-T)	Висока продуктивність

Таблиця 2

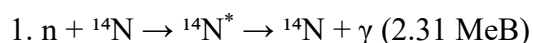
Хімічний склад вибухових речовин

Назва	Формула	Хімічна назва
HMX	$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$	Octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine
LX-17	92.5% TATB, 7.5% Kel-F 800 ($\text{C}_8\text{H}_2\text{Cl}_3\text{F}_{11}$) _n	LX-17-0
TNT	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$	2-methyl-1,3,5-trinitrobenzene
Composition B	63% RDX ($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$), 36% TNT, 1% wax	--
TATB	$\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$	2,4,6-trinitro-1,3,5-benzenetriamine
PBX-9501	95% HMX, 2.5% Estane ($\text{C}_{5.14}\text{H}_{7.50}\text{N}_{0.19}\text{O}_{1.76}$) _n	
2.5% BDNPA-F	--	
PBX-9502	95% TATB, 5% Kel-F 800	--
NM	CH_3NO_2	Nitromethane
ANFO	95% Ammonium Nitrate ($\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$), 5% fuel oil	Ammonium nitrate-fuel oil mixture
Black Powder	75% KNO_3 , 15% charcoal, 10% sulfur	--
TATP	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}_6$	Triacetone triperoxide

Процеси, що відбуваються під час взаємодії потоку нейтронів з вибуховою речовиною

Процеси, що відбуваються у разі опромінення будь-якого матеріалу потоком нейтронів високих енергій, а також ядерні реакції (n, n) , (n, p) , (n, α) або $(n, 2n)$ досить добре вивчені в широкому діапазоні енергій нейтронів і досліджуваних матеріалів – N (азот), O (кисень). Для вирішення вказаної задачі мають значення γ -спектри. Зі збільшенням енергії налітаючих нейтронів (рис. 2) на кілька порядків буде менше переріз реакції (n, γ) у діапазоні енергії доступних нам джерел нейтронів.

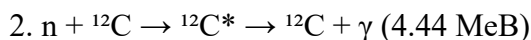
Тому зупинимося на розгляді реакції непружного розсіювання $(n, n\gamma)$ на хімічних елементах, що входять до складу ВР. Ця реакція дає спектри, котрі мають декілька характерних піків (рис.3):



Енергія збудження: 2.31 MeV.

Рівень добре видно у процесі опромінення швидкими нейтронами.

Є ключовим маркером наявності азоту – основний елемент RDX, TNT, ANFO та ін.



Дуже характерна γ -лінія.

Вуглець – основа всіх органічних речовин, включаючи корпус міни та ВР.

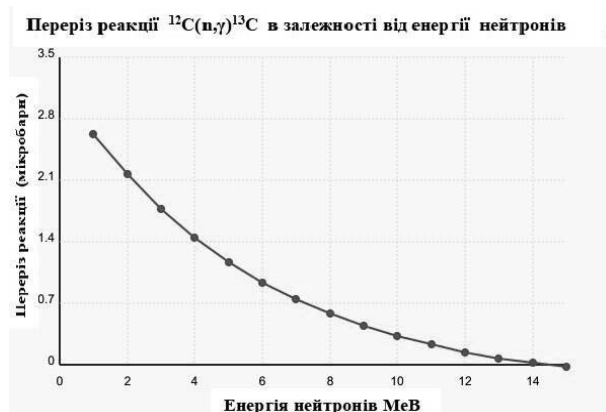
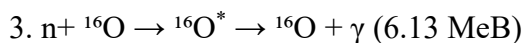


Рис. 2. Характерний переріз реакції (n,γ) [6]

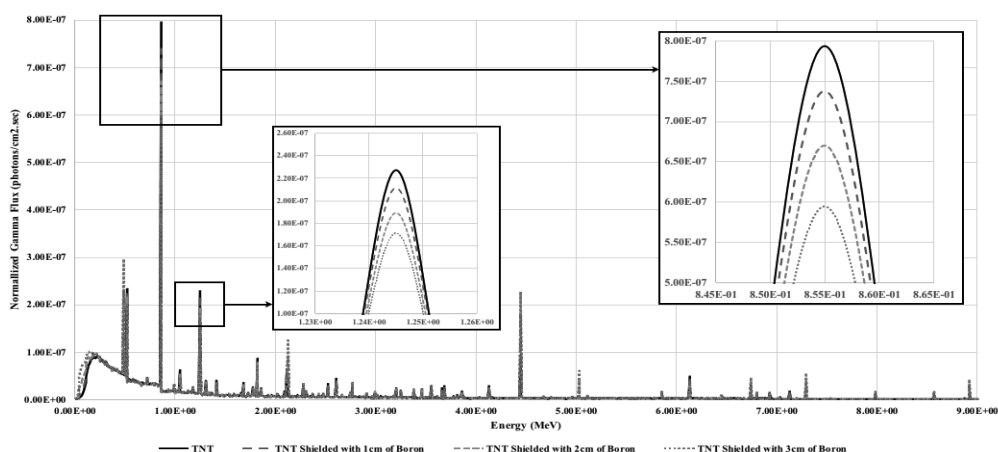


Figure 1. Sample of PGNAA obtained gamma spectra for TNT when shielded with boron.

Рис. 3. Характерний спектр реакції $(n, n\gamma)$, отриманий на зразку TNT

Алгоритм та обчислювальні методи

Як видно з розглянутих раніше матеріалів, в ідеальному випадку сама фізика процесу взаємодії нейтронів з ВР дає можливість виявляти ці речовини за характерними піками, але у реальних польових

умовах виникає ціла низка труднощів у вирішенні цього завдання.

Оскільки міни можуть мати зовнішню оболонку, а також знаходитися в шарі ґрунту, то реальні спектри будуть спотворені γ -випромінюванням від сторонніх хімічних речовин. Тому останнім часом для аналізу таких спектрів почали використо-

увати можливості штучного інтелекту (AI) [9], зокрема глибоку нейронну мережу (deep neural network), яку тренували на спектрах, змодельованих з використанням методу Monte Carlo (MCNP Code) [7]. Вдалося отримати 95%-у точність визначення відомої ВР при попередньому навчанні моделі AI на наборі відомих зразків ВР, а також 80%-у точність визначення невідомої ВР.

У роботі [8] розраховували співвідношення N/C і N/O у спектрах γ -випромінювання, отриманих методом MCNP. Ці співвідношення є хорошими індикаторами наявності ВР. Подальше порівняння цих розрахунків із вимірюваннями, проведеними на реальних зразках, підтвердило хороший збіг (рис. 4).

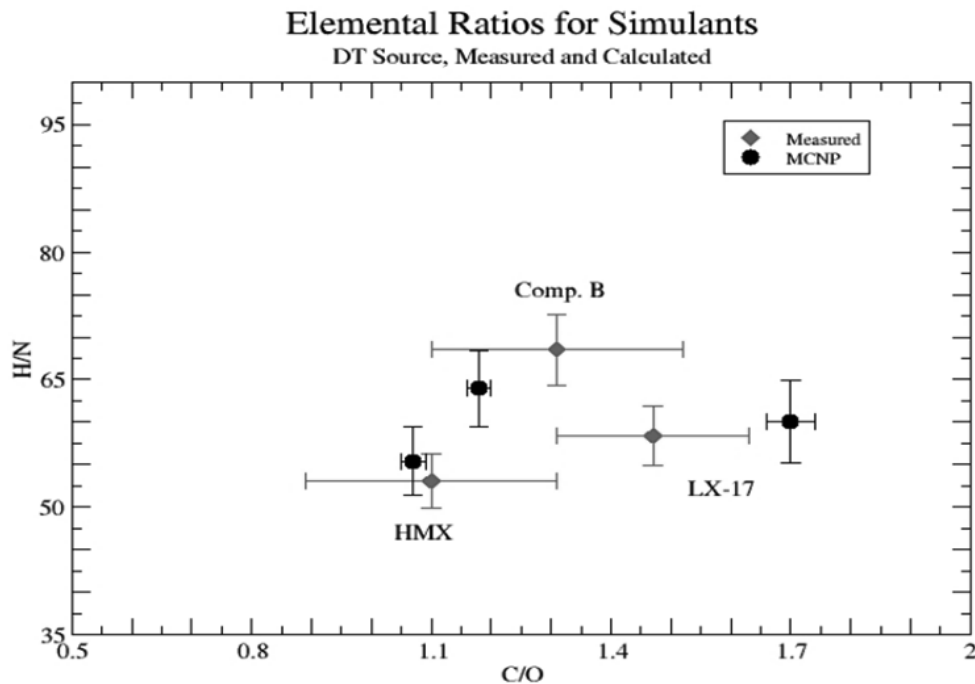


Рис. 4. Порівняння розрахованого та виміряного співвідношень N/C та N/O у ВР

Алгоритм обліку втрат у повітрі

Для створення програмно-апаратної системи (ПАС) виявлення ВР з використанням дронів, додатковим ускладнюючим фактором є наявність шару повітря між джерелом нейтронів і землею. Оскільки цей фактор у випадку з дроном буде присутнім завжди, то є сенс його оцінити, розрахувати і розрахункові значення (як функцію відстані від джерела до землі) вводити як поправку ще на етапі реєстрації спектрів.

Розглянемо основні види взаємодії швидких нейтронів у повітрі:

- Пружне розсіювання (в основному на N та O);
- Непружне розсіювання (генерація γ -квантів від повітря);

- Захоплення нейтронів (незначно для швидких нейтронів);
- Незначне уповільнення (в тому числі внаслідок розсіювання).

Для оцінки ослаблення потоку нейтронів при проходженні через 100 см повітря, використовуємо приблизно експоненційне згасання:

$$\Phi = \Phi_0 \times e^{-\Sigma_t x},$$

де $\Phi_0 = 1 \times 10^8$ н/сек початковий потік,

Φ – потік після проходження шару повітря;

Σ_t – макроскопічний коефіцієнт ослаблення (total macroscopic cross-section);

$x = 100$ см = 1 м – товщина шару повітря.

Для швидких нейтронів (14 MeV) у повітрі значення повного перерізу взаємодії σ_t буде невеликим — близько 0.6 барн

на атом у середньому за складом повітря ($N_2 \approx 78\%$, $O_2 \approx 21\%$).

Макроскопічний переріз:

$$\Sigma_t = N * \sigma_t,$$

де N – кількість ядер в 1 см^3 повітря, тобто

$$N = \rho * N_A \approx 2.7 * 10^{19} \text{ ядер/см}^3.$$

Для повітря $\Sigma_t \approx 0.003\text{--}0.005\text{ см}^{-1}$ при 14 MeV . Візьмемо $\Sigma_t \approx 0.004\text{ см}^{-1}$.

$$\Phi = 1 \times 10^8 * e^{-\Sigma_t x} = 1 \times 10^8 * e^{-0.4} = 6.7 * 10^7 \text{ н/сек.}$$

Разом:

Початковий потік нейтронів 10^8 н/сек після проходження 1 метра повітря зменшиться до $6.7 * 10^7\text{ нейтронів/сек}$, що видається цілком прийнятним для використання методу (PGNAA) у вирішенні поставленого завдання.

Труднощі реалізації програмно-апаратної системи

Дана робота присвячена не тільки огляду існуючих методів пошуку та виявлення ВР, але й опису етапів реалізації ПАС, що включає вже наявні напрацювання і передбачувані програмні рішення для їх комплексного використання в реальних польових умовах із застосуванням дронів або, як мінімум, роботизованих компактних наземних пристроїв.

У зв'язку з цим слід зазначити низку додаткових труднощів та передбачувані шляхи їх вирішення задля створення цієї ПАС.

Труднощі	Рішення
Високий γ -фон	Комплексний аналіз (N/C/O співвідношення, форма сигналів, часові залежності, колімація) Застосування нейромереж в аналітиці спектрів
Невелика кількість речовини	Навчання моделей на симульованих даних (MCNP)
Радіаційна безпека	Використання нейтронних генераторів, імпульсний режим

Результати

Проведений аналіз робіт [1–9] і деякі попередні розрахунки показують, що існуючі методики розрахунків і сучасна апаратура дозволяють:

- з 95% -ю точністю знаходити відомі за складом ВР (див. табл. 1).
- з 80% -ю точністю знаходити невідомі за складом ВР за допомогою виділення характерних піків ^{14}N , ^{12}C та ^{16}O .

Здійснено оцінювання та представлено алгоритм розрахунку додаткових факторів, що впливають на отримання кінцевого результату розв'язання задачі пошуку мін та інших ВР.

Огляд вже існуючих методів дистанційного виявлення мін і наявного на даний момент обладнання дає змогу сподіватися на реалізацію програмно-апаратної системи, яка забезпечить вирішення цього завдання із застосуванням дронів або, як мінімум, роботизованих наземних комплексів. На підставі зазначеного раніше можна запропонувати такі етапи реалізації ПАС.

Етапи реалізації ПАС

1. Використання компактних нейтронних генераторів (див. табл. 1).
2. Розрахунок (за допомогою MCNP) найбільш ефективної геометрії установки.
3. Симулювання рядів даних за допомогою MCNP для різних конфігурацій та ефективностей детекторів, складів ВР, фонового γ -випромінювання.
4. Навчання моделей на симульованих даних.
5. Розшифровування отриманих спектрів за допомогою навчених моделей.
6. Визначення місця знаходження мін та інших ВР.

Література

1. Csikai J. Handbook of Fast Neutron Generators and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2021. 300 p.

2. Chichester D. L., McMurdo J., Priestley K. Fast neutron interrogation of explosives. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2007. Vol. 261. P. 838–841.

3. IAEA. Humanitarian Demining Using Nuclear Techniques. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002. 150 p.
4. Eleon C., Perot B., Carasco C. Gamma ray spectroscopy with LaBr₃ detectors for explosive detection. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2011. Vol. 58, no. 5. P. 2310–2316.
5. Majewski S., Gozani T., Gottesman S. Neutron-based detection of landmines. *Applied Radiation and Isotopes*. 2005. Vol. 63, no. 5-6. P. 669–674.
6. Азаренков Н. А., Кириченко В. Г., Левенець В. В., Неклюдов І.М. Ядерно-фізичні методи в матеріалознавстві: навч. посіб. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2011. 300 с.
7. X-5 Monte Carlo Team. MCNP-Version 5, Vol. I. Overview and Theory. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2003. (LA-UR-03-1987).
8. Hossny K., Hany A. Explosives Detection and Identification by PGNA. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2006. (INL/EXT-06-01210).
9. Hossny K., Magdi S., Soliman A. Y., Hossny M. Detecting shielded explosives by coupling prompt gamma neutron activation analysis and deep neural networks. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, article 13467.

References

1. Csikai J. Handbook of Fast Neutron Generators and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2021. 300 p.
2. Chichester D. L., McMurdo J., Priestley K. Fast neutron interrogation of explosives. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2007. Vol. 261. P. 838–841.
3. IAEA. Humanitarian Demining Using Nuclear Techniques. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002. 150 p.
4. Eleon C., Perot B., Carasco C. Gamma ray spectroscopy with LaBr₃ detectors for explosive detection. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2011. Vol. 58, no. 5. P. 2310–2316.
5. Majewski S., Gozani T., Gottesman S. Neutron-based detection of landmines.

- Applied Radiation and Isotopes*. 2005. Vol. 63, no. 5-6. P. 669–674.
6. Azarenkov N. A., Kirichenko V. G., Levenets V. V., Neklyudov I. M. Nuclear physics methods in materials science: a textbook. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2011. 300 p. [in Ukrainian]
7. X-5 Monte Carlo Team. MCNP-Version 5, Vol. I. Overview and Theory. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2003. (LA-UR-03-1987).
8. Hossny K., Hany A. Explosives Detection and Identification by PGNA. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2006. (INL/EXT-06-01210).
9. Hossny K., Magdi S., Soliman A. Y., Hossny M. Detecting shielded explosives by coupling prompt gamma neutron activation analysis and deep neural networks. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, article 13467.

Одержано: 12.02.2025

Внутрішня рецензія отримана: 19.02.2025

Зовнішня рецензія отримана: 08.03.2025

Про авторів:

Лацонов Борис Вікторович,
кандидат фізико-математичних наук,
<https://orcid.org/0009-0006-2055-2058>.

Сініцин Ігор Петрович,
доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України,
<https://orcid.org/0000-0002-4120-0784>

Місце роботи авторів:

Інститут програмних систем НАН України,
03187, м. Київ-187,
проспект Академіка Глушкова, 40.
Тел.: (044) 526 3559.
E-mail: ips2014@ukr.net