

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-78>

УДК 343.98

ДОЦЕНКО ОЛЕГ

Хмельницький науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

<https://orcid.org/0009-0005-1050-1823>

e-mail: ukrdotsenko@gmail.com

ШЕЛЕСТИЮК ОЛЕКСАНДР

Хмельницький науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

<https://orcid.org/0000-0002-1377-8802>

e-mail: shelestyk1975@ukr.net

АНТОНЮК ОЛЕКСАНДР

Хмельницький науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

<https://orcid.org/0009-0008-7045-6325>

e-mail: antonykseva@gmail.com

СТРЕМЕЦЬКИЙ ОЛЕКСАНДР

Хмельницький науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

<https://orcid.org/0000-0001-6137-4557>

e-mail: aistrem@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ СВИНЦЮ В ПРОДУКТАХ ПОСТРІЛУ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛІЗУ

У роботі досліджено залежність інтенсивності рентгенівських спектральних ліній свинцю в продуктах пострілу від відстані до цілі та від його радіального розподілу на цілі, проведено моделювання за допомогою штучного інтелекту, оброблені та проаналізовані отримані експериментальні результати. Моделювання поширення газопорохового струменя та використана якісна модель розподілу свинцю в продуктах пострілу загалом знаходить своє підтвердження в експерименті. Встановлена закономірність у розподілі свинцю в продуктах пострілу набою .22 LR від відстані до цілі та від його радіального розподілу на цілі, яку можна встановити, вимірюючи інтенсивність ліній рентгенівського випромінювання свинцю.

Ключові слова: продукти пострілу, рентгенофлуоресцентний аналіз, свинець, газопороховий струмінь, моделювання, Elvax Pro, відстань пострілу.

DOTSSENKO OLEH

SHELESTIUK OLEKSANDR

ANTONIUK OLEKSANDR

STREMETS'KYI OLEKSANDR

Khmelnytskyi Scientific Research Forensic Center
of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine

INVESTIGATION OF LEAD DISTRIBUTION IN GUNSHOT RESIDUES BY THE X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS METHOD

The study investigates the dependence of the intensity of lead X-ray spectral lines in gunshot residues on the shooting distance and their radial distribution on the target surface. Artificial intelligence methods were employed for modeling, while the obtained experimental data were processed and analyzed. Modeling of the propellant gas jet propagation made it possible to estimate the distance at which an intensive transfer of gunshot residues occurs, which was found to be less than 50 cm and was experimentally confirmed. The qualitative model of lead distribution in gunshot residues generally agrees with the experimental results. A significant qualitative difference was established between the experimental data of lead X-ray line intensities and the relative concentration obtained along the shooting axis compared to other radial positions. This difference is explained by the transport of gunshot residues along the bullet surface, which is not accounted for in the model. A regularity in the distribution of lead in gunshot residues from a .22 LR cartridge was found, depending on both the distance to the target and its radial distribution on the target, which can be determined by measuring the intensity of lead X-ray emission lines. It has been shown that the Elvax Pro X-ray fluorescence spectrometer can be used to study gunshot residues and to determine the distribution pattern of lead depending on the shooting distance and its radial distribution on the target, which has potential significance for forensic examinations and ballistic investigations. Once the dependence of the lead emission intensity on the shooting distance and radial distribution on the target has been experimentally established, it becomes possible to determine the distance from which the shot was fired.

Keywords: gunshot residues, X-ray fluorescence analysis, lead, propellant gas jet, modeling, Elvax Pro, shooting distance.

Стаття надійшла до редакції / Received 27.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми

Злочини з використанням вогнепальної зброї є серйозною проблемою. Це пов'язано з кількома факторами, включаючи: збільшення доступності зброї, як законної, так і незаконної; збільшення можливостей для отримання зброї незаконним шляхом; високий рівень суспільної небезпеки. Вони створюють безпосередню загрозу життю та здоров'ю людей, підривають почуття безпеки в суспільстві.

Під час пострілу утворюються специфічні сліди, які можна виявити на різних об'єктах: зброї, перешкодах, предметах на місці злочину, руках та одязі стрільця, а також у вхідних та вихідних ранах

потерпілого. Аналіз цих слідів, зокрема виявлення унікальних речовин, таких як свинець, цинк, мідь, стибій та дифеніламін, дозволяє: встановити факт пострілу; визначити дистанцію, з якої було здійснено постріл; отримати інформацію про тип зброї та використані боєприпаси [1-4].

Аналіз останніх джерел

Дослідження продуктів пострілу є надзвичайно актуальною темою, особливо в контексті криміналістики та безпеки. Постійний розвиток нових технологій та методів дослідження дозволяє покращити точність і швидкість аналізу. Використання електронної мікроскопії, оптико-емісійної спектроскопії, зокрема й рентгено-флуоресцентного аналізу дозволяють точно ідентифікувати сліди пострілу та отримати важливу інформацію для розслідувань. В попередніх дослідженнях з використанням рентгенофлуоресцентного аналізу встановлено відносно високий вміст свинцю у продуктах пострілу, значну інтенсивність ліній в енергетичному спектрі, чіткі залежності інтенсивності спектральних ліній від відстані до цілі [1-3].

Метою представленої роботи було дослідження залежності інтенсивності рентгенівських спектральних ліній свинцю в продуктах пострілу від відстані до цілі та від його радіального розподілу на цілі.

Для досягнення мети необхідне вирішення ряду завдань, а саме:

1. Дослідити теоретичну модель утворення газопорохового струменя при пострілі малокаліберним патроном та якісну модель розподілу свинцю в продуктах пострілу для порівняння з експериментальними даними.
2. Проаналізувати, як інтенсивність спектральних ліній змінюється в залежності від відстані до цілі, та встановити наявність закономірностей між інтенсивністю рентгенівського випромінювання та відстанню;
3. Проаналізувати, як інтенсивність спектральних ліній змінюється в радіальному напрямку на цілі, та встановити наявність закономірностей між інтенсивністю рентгенівського випромінювання та відстанню в радіальному напрямку на цілі.
4. Зробити порівняння експериментальних результатів з результатами моделювання процесів пострілу.

Об'єктом дослідження є продукти пострілу, які утворюються при використанні вогнепальної зброї.

Предметом дослідження є залежність розподілу свинцю в продуктах пострілу від відстані до цілі та від його радіального розподілу на цілі.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення поставлених завдань використовували постріл з використанням малокаліберного набою у бавовняне трикотажне полотно (зразок), яке фіксувало продукти пострілу на відстані L , яка дорівнює 0, 50, 100, 200 см від дульного зрізу, що також дозволяло вивчити розподіл свинцю на цих відстанях в радіальному напрямку зі значенням радіуса R , який дорівнює 0, 2, 5, 10 см (рисунк 1). Значення $R=0$ означає, що вимірювання було проведено на ділянці полотна пошкодженого кулею. Матеріал верхньої частини кулі – латунь. Для кожного пострілу використовували один зразок полотна.

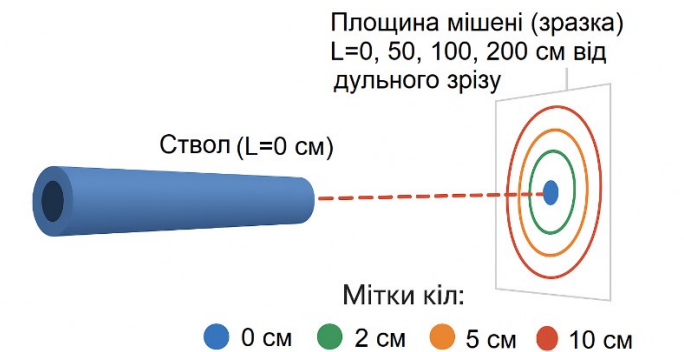


Рис. 1. Схема отримання зразків для дослідження продуктів пострілу

Всі дослідження були виконані на спектрометрі енергій рентгенівського випромінювання Elvax Pro. Для отримання спектрів важких елементів, зокрема свинцю, використовували настройки для звичайних задач, параметри яких наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри випромінювача

Напруга і фільтри		Струми і стабілізація завантаження	
Параметри	Задача	Параметри	Задача
	Звичайна		Звичайна
Напруга, кВ	45	Струм трубки, мкА	270
Фільтр, мкм	Ni, 300+Al, 300	Стабілізація, імп/с	99000

Обробка результатів дослідження відбувалася з використанням вбудованого програмного забезпечення, яке поставляється разом зі спектрометром.

В умовах, коли елементи, які визначаються, знаходяться в легкій матриці (рідина, полімери, тканина), отримати якісні результати кількісного аналізу складно. В цьому випадку доцільно зупинитися на дослідженні

якісного складу об'єктів дослідження. При обробці результатів використовували не концентрацію елементів у зразку, а інтенсивність сигналу К-серій або L-серій у разі відсутності К-серій визначених елементів, яка також може характеризувати кількість речовини в точці виміру. Отже за результатами виміру інтенсивності рентгенівського випромінювання свинцю можна скласти картину його розподілу по осі пострілу та в радіальному напрямку до осі пострілу.

За результатами попередніх досліджень звертали увагу на наступні елементи: Pb, Sb, Sn, Zn, Cu [1], але через значну інтенсивність L-серії свинцю та однозначну залежність інтенсивності випромінювання від відстані для аналізу результатів був вибраний свинець. Вплив фону виключений, оскільки трикотажне полотно, за результатами вимірювань, не містить сліди свинцю.

Всі дані є результатом усереднення трьох вимірів, для $R = 0$ три виміри робили в безпосередній близькості один від одного, для $R > 0$ – по вершинах рівностороннього трикутника, вписаного в коло радіуса R .

Базову математичну модель газопорохового струменя, яка відображає зміну осьової швидкості $u(x)$ та радіуса струменя $r(x)$ за відстанню x від дула та відповідні графічні залежності (рисунк 2, 3) створено з використанням штучного інтелекту [4-7]. Для стислого струменя з невеликою надзвуковою швидкістю (як у набою .22 LR, після виходу кулі):

- потенційне ядро має постійну швидкість: $u(x) = u_0, 0 < x < L_c$;
- після ядра – експоненційне спадання швидкості через турбулентне змішування:

$$u(x) = u_0 e^{-k(x-L_c)}, x \geq L_c \quad (1)$$

- радіус струмені зростає приблизно лінійно: $r(x) = r_0 + \alpha(x - L_c)$.

Вихідні дані для розрахунку параметрів газопорохового струменя для набою .22 LR представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Вихідні дані для набою .22 LR

Параметр	Позначення	Значення
Початкова швидкість газу	u_0	800 м/с
Діаметр дула	d	5,6 мм
Початковий радіус струменя	$r_0 = d/2$	2,8
Довжина потенційного ядра	L_c	0,05 м
Коефіцієнт дисипації	k	3 м^{-1}
Кут розкриття (тангенс)	α	0,2

Просту якісну модель розподілу свинцю або іншого елементу в продуктах пострілу в залежності від фіксованої відстані та радіуса у відносних концентраціях (нормована так, щоб $C(0,0)=1$) та відповідні графічні залежності (рисунк 4, 5) створено з використанням штучного інтелекту [4-7].

В основі простої якісної моделі розподілу концентрації лежить залежність:

$$C(x, r) = e^{-\beta x} \cdot e^{-2(r/\sigma(x))^2}, \sigma(x) = r_0 + \alpha(x - L_c) \quad (2)$$

де $\beta = 1,5 \text{ м}^{-1}$ (центричне згасання).

На рисунку 2 зображені профілі швидкості та радіуса газопорохового струменя набою .22 LR. Синя лінія – осьова швидкість, на початковому етапі видно збереження сталої швидкості в потенційному ядрі (до 0.05 м), далі – експоненційне спадання через турбулентне змішування. Червона пунктирна лінія – радіус струменя, який лінійно зростає із відстанню.

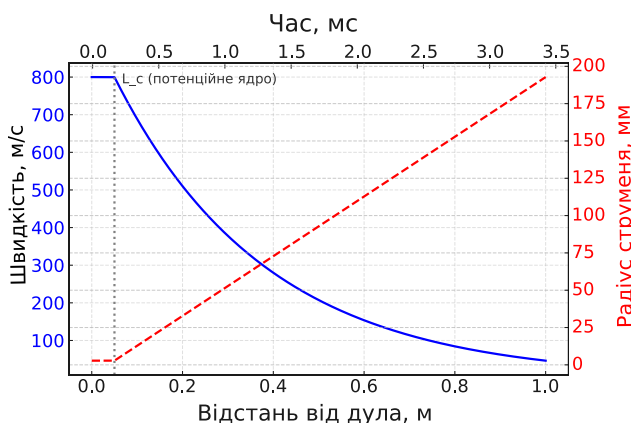


Рис. 2. Газопороховий струмінь (.22 LR): профілі швидкості та радіуса

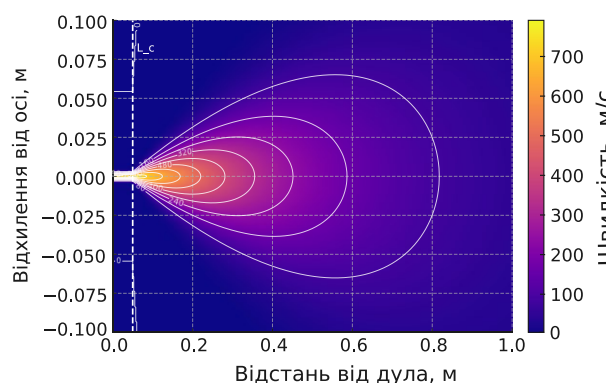


Рис. 3. 2D-профіль газопорохового струменя (.22 LR) з ізолініями швидкості

2D-візуалізація газопорохового струменя представлена на рисунку 3. Колір показує розподіл швидкості – від найвищої (жовто-біла зона вздовж осі) до нижчої (темно-фіолетові краї). Вертикальна пунктирна лінія позначає межу потенційного ядра – після неї струмінь швидко розширюється та втрачає енергію. Ширина профілю зростає із відстанню, демонструючи турбулентне змішування з навколишнім повітрям. Ізолнії швидкості (білі контури) на 2D-профілі нанесено для візуалізації турбулентної структури потоку.

Наведені графічні залежності, отримані розрахунком, дають можливість оцінити перенос з газопороховим потоком продуктів пострілу. На підставі розрахунків можна прогнозувати, що найбільша частина продуктів пострілу буде перенесено в межах 0,5 метрів, де зберігаються достатньо високі швидкості та відсутнє сильне розпорошення.

Використання якісної моделі розподілу концентрації дозволяє спрогнозувати вигляд залежності розподілу свинцю в залежності від відстані від дульного зрізу при фіксованих значеннях радіуса (рисунок 4) та вигляд залежності розподілу свинцю в залежності від радіуса (відстані від осевої лінії пострілу) при фіксованих значеннях відстані до дульного зрізу (рисунок 5). Найбільша концентрація спостерігається для випадків, які стосуються розрахунків, виконаних для відстані $L = 0$ та радіуса $R = 0$. Важливо порівняти отримані під час моделювання результати з експериментом.

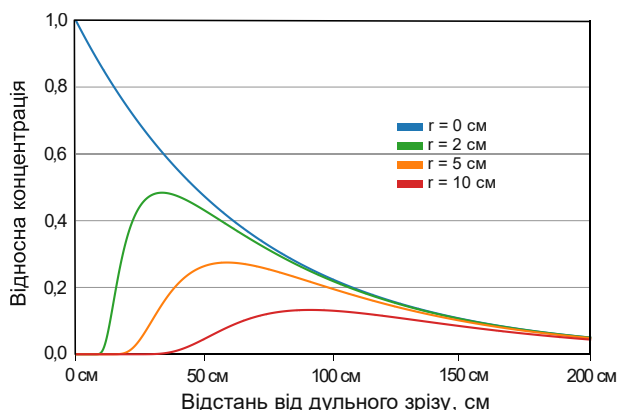


Рис. 4. Профіль відносної концентрації свинцю в газопороховому струмені в залежності від відстані від дульного зрізу при фіксованих радіусах

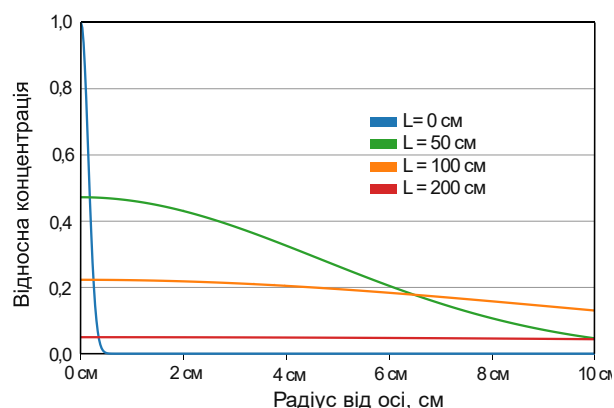


Рис. 5. Профіль відносної концентрації свинцю в газопороховому струмені в залежності від радіуса при фіксованих значеннях відстані

Для спрощення аналізу експериментальних даних окремо розглянемо залежність інтенсивності випромінювання від відстані при фіксованих значеннях радіуса та залежність інтенсивності випромінювання від радіуса при фіксованих значеннях відстані. Експериментальні графічні залежності подані у парах (рисунок 6, 7 та рисунок 8, 9): один графік відтворює весь діапазон значень інтенсивності, другий деталізує область низьких значень інтенсивності.

Отримані результати (рисунок 6, 7) дозволяють оцінити розподіл свинцю в продуктах пострілу в залежності від відстані при різних значеннях радіуса. Найбільша інтенсивність спостерігається коли зразок був розміщений в площині дульного зрізу при нульовому відхиленні від осі пострілу ($L = 0$, $R = 0$), що є очікуваним. При збільшенні відстані помітно значне зменшення інтенсивності випромінювання, на відстані 50 см вона змінюється на порядок, подальша зміна не так відчутна. Для інших значень радіусів ($L = 0$, $R = 2, 5, 10$) характерним є зниження інтенсивності випромінювання для зразка розміщеного в площині дульного зрізу в порівнянні з інтенсивністю на відстані 50 см, що пояснюється швидким виносом газопороховим потоком продуктів пострілу та ускладненим їх відкладенням в перпендикулярному до осі пострілу напрямку. В подальшому інтенсивність при збільшенні відстані монотонно зменшується. Відносне розміщення графіків залежності інтенсивності від відстані при різних радіусах можна проаналізувати, якщо звернути увагу на деталізацію низьких значень інтенсивності. Найбільші значення інтенсивності для всіх значень радіусів характерне для точки де куля попадала в зразок ($R = 0$), для інших значень радіусів при збільшенні відстані значення інтенсивності поступово наближаються, а при відстані у 2 метри повністю співпадають.

Результати розподілу свинцю в радіальному напрямку при різних значеннях відстані до цілі (рисунок 8, 9) вказують на дуже швидке зменшення інтенсивності випромінювання свинцю вже при віддаленні від осі пострілу на 2 см, що може свідчити про те, що значна частина продуктів пострілу переноситься кулею, а не швидкісним газопороховим потоком. Відображення інтенсивності в деталізованій області дозволяє стверджувати, що значне зменшення інтенсивності по радіусу характерно для відстані $L = 0$, пояснення такої поведінки вже мало місце, вона пов'язана з ускладненим переносом продуктів пострілу в площині дульного зрізу. На відстані від $L = 0$ до $L = 50$, відбувається відчутний перенос продуктів пострілу, оскільки найбільше значення інтенсивності в порівнянні з іншими відстанями спостерігається до радіуса $R = 5$.

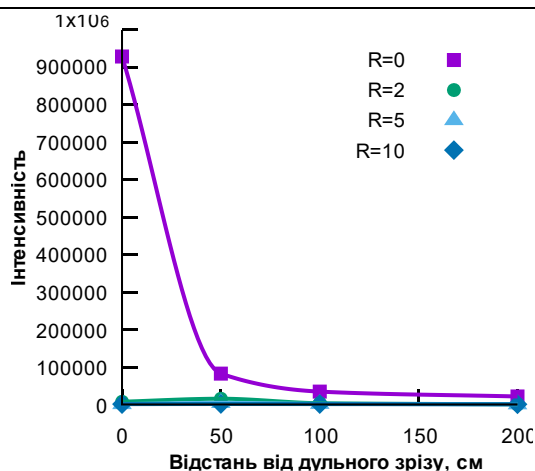


Рис. 6. Інтенсивність випромінювання свинцю в залежності від відстані від дульного зрізу при фіксованих радіусах (високі значення)

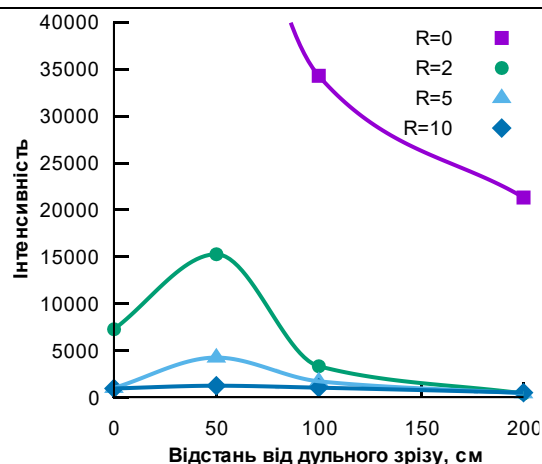


Рис. 7. Інтенсивність випромінювання свинцю в залежності від відстані від дульного зрізу при фіксованих радіусах (низькі значення)

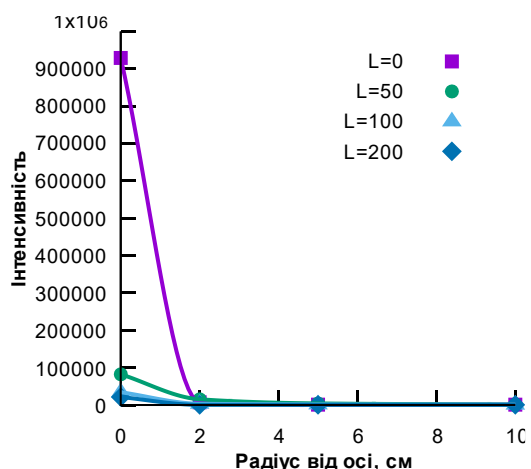


Рис. 8. Інтенсивність випромінювання свинцю в залежності від радіуса при фіксованих значеннях відстані (високі значення)

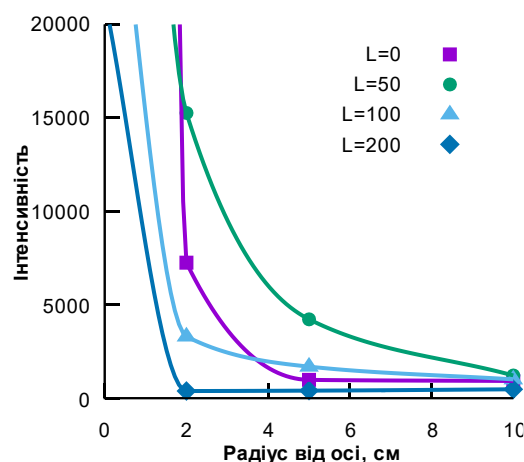


Рис. 9. Інтенсивність випромінювання свинцю в залежності від радіуса при фіксованих значеннях відстані (низькі значення)

Порівняння результатів моделювання та експериментальних даних показує, що модельний розподіл концентрації та розподіл інтенсивності якісно співпадають. Значне перевищення інтенсивності по осі пострілу пов'язано з переносом продуктів пострілу поверхнею кулі, що якісна модель не враховує. Оцінка інтенсивного переносу продуктів пострілу зроблена на основі моделі газопорохового струменя підтверджується в експерименті і складає менше 50 см.

Висновки

В результаті дослідження залежності інтенсивності рентгенівських спектральних ліній свинцю в продуктах пострілу від відстані до цілі та від його радіального розподілу на цілі, проведення моделювання із використанням штучного інтелекту, обробки та аналізу отриманих експериментальних результатів можна зробити ряд висновків.

Моделювання поширення газопорохового струменя дозволило встановити відстань, на якій відбувається інтенсивний перенос продуктів пострілу, яка становить менше 50 см, що підтверджено експериментом. Якісна модель розподілу свинцю в продуктах пострілу знаходить своє якісне підтвердження в експерименті. Суттєва відмінність експериментальних даних інтенсивності та відносної концентрації в моделі, отриманих по осі пострілу, в порівнянні з іншими радіальними відстанями пояснюється переносом продуктів пострілу поверхнею кулі.

Має місце закономірність в розподілі свинцю в продуктах пострілу набою .22 LR від відстані до цілі та від його радіального розподілу на цілі, яку можна встановити вимірюючи інтенсивність ліній рентгенівського випромінювання свинцю.

Прилад Elvax Pro для рентгенофлуоресцентного аналізу може бути використаний для дослідження продуктів пострілу та встановлення закономірності розподілу свинцю в залежності від відстані до цілі та від його радіального розподілу на цілі. Маючи заздалегідь встановлену залежність розподілу інтенсивності випромінювання свинцю від відстані до експериментальної цілі та радіального розподілу на ній можна встановити відстань, з якої був здійснений постріл.

Література

1. Дослідження продуктів пострілу з використанням рентгенофлуоресцентного аналізу / О. Доценко та ін. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 3(2), Т. 337. С. 321–327.
2. López-López M., García-Ruiz C. Recent non-chemical approaches to estimate the shooting distance. *Forensic Science International*. 2014. Vol. 239. P. 79–85.
3. Fonseca J. F., Cruz M. M., Carvalho M. L. Muzzle-to-target distance determination by X-ray fluorescence spectrometry. *X-Ray Spectrometry*. 2014. №43. P. 49–55.
4. Кірсанов М. А., Сокол В. П. Аеродинаміка пострілу: підручник. Київ: КНУ ім. Т. Шевченка, 2012. 248 с.
5. McDonald J. D. *Internal Ballistics of Guns*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 512 p.
6. McCoy R.L. *Modern Exterior Ballistics: The Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles*. 2nd ed. New York : Schiffer, 2012. 326 p.
7. ChatGPT (GPT-5). Бесіда з користувачем про формування газопорохового струменя та побудову ілюстрацій (.22 LR). OpenAI, 2025. URL: <https://chat.openai.com> (дата звернення: 14.10.2025).

References

1. Doslidzhennia produktiv postrilu z vykorystanniam renthenofluorestsentnoho analizu / O. Dotsenko ta in. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*. 2024. № 3(2), T. 337. S. 321–327.
2. López-López M., García-Ruiz C. Recent non-chemical approaches to estimate the shooting distance. *Forensic Science International*. 2014. Vol. 239. P. 79–85.
3. Fonseca J. F., Cruz M. M., Carvalho M. L. Muzzle-to-target distance determination by X-ray fluorescence spectrometry. *X-Ray Spectrometry*. 2014. №43. P. 49–55.
4. Kirsanov M. A., Sokol V. P. *Aerodynamika postrilu: pidruchnyk*. Kyiv: KNU im. T. Shevchenka, 2012. 248 s.
5. McDonald J. D. *Internal Ballistics of Guns*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 512 p.
6. McCoy R.L. *Modern Exterior Ballistics: The Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles*. 2nd ed. New York : Schiffer, 2012. 326 p.
7. ChatGPT (GPT-5). Besida z korystuvachem pro formuvannia hazoporokhovoho strumenia ta pobudovu iliustratsii (.22 LR). OpenAI, 2025. URL: <https://chat.openai.com> (data zvernennia: 14.10.2025).