

УДК 531.768:623.4.018



О. М. Крюков



Р. С. Мельников



В. А. Музичук

## МЕТОД ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КАНАЛІВ СТВОЛІВ ТА БОЄПРИПАСІВ НА ОСНОВІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК БАЛІСТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОСТРІЛУ

*Проведено аналіз сучасних методів діагностування технічного стану каналів стволів та боєприпасів до вогнепальної зброї. Запропоновано перспективний метод діагностування, визначено його зміст. Обґрунтовано потребу у встановленні зв'язку між технічним станом каналів стволів та боєприпасів і характеристиками балістичних елементів пострілу. Визначено за доцільне розв'язування рівнянь внутрішньої балістики чисельним методом для моделювання перебігу процесу пострілу за наявності дефектів каналів стволів і боєприпасів. Розглянуто принципи побудови різницевої схеми.*

*К л ю ч о в і с л о в а:* канал ствола, боєприпаси, технічний стан, балістичний елемент пострілу, діагностування, дефект каналу ствола, рівняння внутрішньої балістики, різницева схема, чисельний метод.

**Постановка проблеми.** Важливою складовою ефективного застосування вогнепальної зброї та боєприпасів є контроль їх технічного стану в ході експлуатації. Так, велике значення мають дані про технічний стан каналів стволів (КС) та порохових зарядів боєприпасів.

Відхилення внутрішніх геометричних параметрів КС, наприклад, при їх зношуванні або роздутті, призводить до безповоротної втрати частини енергії порохових газів при пострілі. Внаслідок цього початкова швидкість снаряда зменшується, і при її падінні до значень, що виходять за допустимі межі, ресурс КС вважається вичерпаним [1, 2]. Окремий інтерес викликає не тільки діагностування технічного стану КС, а й можливість прогнозування його залишкового ресурсу. Особливо цінними дані про технічний стан КС можуть виявитися для зразків вогнепальної зброї з обмеженим ресурсом, з порівняно високою закупівельною вартістю, а також для зразків, стосовно яких висуваються підвищені вимоги до підтримання балістичних елементів пострілу в заданих межах (наприклад, артилерійські системи, снайперська та протитанкова зброя, кінетична зброя несмертельної дії).

Важливим завданням є контроль технічного стану боєприпасів, що надійшли з довготривалого зберігання, пошкоджені або навіть із бракованих партій. Під час довготривалого зберігання боєприпасів, особливо внаслідок порушення його режиму, змінюються енергетичні характеристики порохового заряду та швидкість його горіння. Застосування таких боєприпасів призводить до відхилення початкової швидкості снаряда, а в окремих випадках – і до небезпечного зростання максимального тиску порохових газів у каналі ствола, що може бути причиною виходу з ладу зразка озброєння та травмування особового складу.

На цей час методи експлуатаційного контролю озброєння полягають, головним чином, у використанні серії військових калібрів (прохідних, непрохідних, бракувальних). Деякі методи ґрунтуються на окомірному способі (застосування тінювих трикутників та кілець тощо) [3, 4]. Експлуатаційний контроль боєприпасів полягає в їх візуальному огляді (а в певних випадках – у зважуванні снарядів) за умов перебування на довгостроковому зберіганні або з причин порушення правил зберігання та експлуатації. У разі наявності відхилень від норми можуть проводитись лабораторні та полігонні випробування [5]. Слід відзначити, що на сьогодні в Україні залишилась лише одна спеціальна військова лабораторія, яка здатна перевіряти боєприпаси.

Технічна база для виконання контролю морально та технічно застаріла, дозволяє лише констатувати поточний стан і не здатна забезпечити його прогнозування [6]. Таким чином, відомі методи і засоби діагностування технічного стану КС та боєприпасів до ствольних систем є малоефективними з погляду на достовірність, оперативність, а іноді й економічність, оскільки

ґрунтуються на застарілих принципах та передбачають застосування засобів вимірювань обмеженої точності.

Також зауважимо, що обидва різні за своєю природою явища: зношування (роздуття) КС та деградація порохового заряду, можуть призвести до спадання дульної швидкості снаряда. З огляду на це значний практичний інтерес становить діагностування причини зниження дії порохових газів на снаряд: чи то через геометричні відхилення КС, чи внаслідок застосування боєприпасів незадовільної якості. Можливості вирішення цього завдання на основі відомих методів оцінювання технічного стану вкрай обмежені.

Тим самим створюється проблемна ситуація, яка полягає у невідповідності можливостей існуючих методів і засобів діагностування зростаючим потребам практики. Тому удосконалення системи експлуатаційного вимірювального контролю параметрів зброї та боєприпасів є актуальним завданням.

Одним з перспективних напрямів удосконалення експлуатаційного контролю озброєння є реалізація діагностування технічного стану каналів стволів та боєприпасів на основі аналізу балістичних елементів пострілу.

**Аналіз публікацій.** Рівняння внутрішньої балістики [7, 8] встановлюють зв'язок між миттєвими значеннями балістичних елементів пострілу (БЕП), а саме:  $l$  – шляхом снаряда у КС від початку його руху;  $V$  – швидкістю руху снаряда відносно КС;  $\psi$  – відносним об'ємом порохового зерна, що згорів, та  $p$  – середнім тиском порохових газів на снаряд і стінки КС у заснарядному просторі. Найбільш доцільним для діагностування технічного стану КС та боєприпасів є застосування залежностей тиску порохових газів  $P(t)$ ,  $P(l)$  та швидкості руху снаряда  $V(t)$ ,  $V(l)$  у функції часу  $t$  або шляху  $l$  його руху в КС.

Опису методів і засобів експериментального визначення БЕП присвячена значна кількість публікацій. Наприклад, у працях Н. П. Медведєвої [9] досконало викладено методи вимірювання тиску порохових газів усередині КС. У працях [10–12] питання експериментального визначення БЕП також дістали ґрунтовного відображення. Втім у цих джерелах не розкрито зв'язок між БЕП та типовими дефектами каналів стволів і боєприпасів.

Опису методів і засобів визначення БЕП шляхом вимірювань тиску порохових газів і швидкості руху снаряда присвячені праці [13, 14]. Однак у цих джерелах не отримали розвитку науково-методичні основи аналізу і інтерпретації результатів таких вимірювань для встановлення виду і ступеня прояву дефекту КС або боєприпасів.

Таким чином, огляд джерел інформації свідчить про те, що у відомій літературі не дістали висвітлення методичні основи діагностування технічного стану КС та боєприпасів, які базуються на аналізі експериментально отриманих кривих для балістичних елементів пострілу.

**Метою статті** є викладення та обґрунтування методу діагностування технічного стану каналів стволів вогнепальної зброї та боєприпасів до неї, який ґрунтується на експериментальному отриманні та аналізі характеристик балістичних елементів пострілу.

**Виклад основного матеріалу.** Вигляд кривих БЕП  $P(t)$ ,  $V(t)$  визначається параметрами перебігу процесу пострілу, зокрема геометричними характеристиками КС, а також енергетичними характеристиками порохового заряду і швидкістю його горіння [15]. Таким чином, між геометричними характеристиками КС та характеристиками порохового заряду і виглядом кривих для БЕП існує певний зв'язок.

Вважатимемо номінальним перебіг процесу пострілу, якщо він здійснюється за номінальних значень умов заряджання (із застосуванням технічно справного КС та боєприпасів) і нормальних атмосферних умов. Такому процесу пострілу відповідають номінальні криві для БЕП  $P_n(t)$ ,  $V_n(t)$ .

Зміна технічного стану КС та боєприпасів веде до відхилення умов заряджання і зміни параметрів перебігу процесу пострілу, що можна спостерігати за зміною вигляду відповідних кривих  $P_\delta(t)$ ,  $V_\delta(t)$  відносно кривих  $P_n(t)$ ,  $V_n(t)$ .

Як показує попередній аналіз, певним дефектам КС відповідають пов'язані з ними відхилення кривих  $P_\delta(t)$ ,  $V_\delta(t)$ . Наприклад, на рис. 1 роздуття КС внаслідок прориву порохових газів і втрати частини їх енергії призводить до спадання тиску порохових газів (“провал” кривої  $P_\delta(t)$  відносно  $P_n(t)$ ) на ділянці, що відповідає місцю розташування такого дефекту. Відповідні зміни (див. рис. 2) спостерігатимуться й на кривій  $V_\delta(t)$  (“завал” кривої від початку ділянки роздуття). Аналогічні

міркування є справедливими й для випадків зношування КС та застосування боєприпасів із порохом зарядом, що почав деградувати.

Кожний з дефектів, які ідентифікують (наприклад, роздуття, зношування КС, зменшення сили пороху, зростання швидкості горіння пороху), характеризується відповідними характерними ознаками, а масштаб відхилення визначає ступінь прояву дефекту.

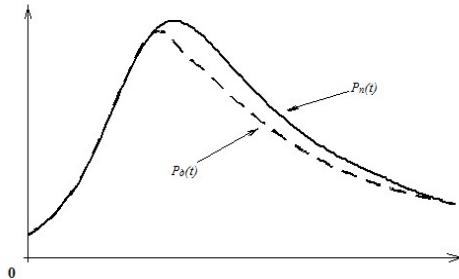


Рис. 1. Залежності  $P(t)$  за наявності роздуття в казенній частині КС

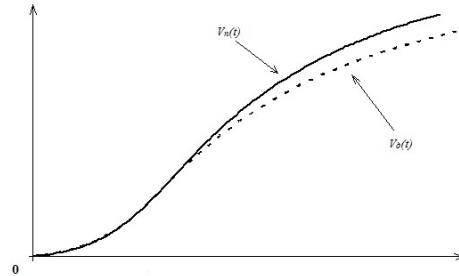


Рис. 2. Залежності  $V(t)$  за наявності роздуття в казенній частині КС

Таким чином, за виглядом кривих  $P_o(t)$ ,  $V_o(t)$ , а точніше – за характером та ступенем відхилень цих кривих від номінальних кривих  $P_n(t)$ ,  $V_n(t)$  можна встановити характер та місце знаходження дефекту КС або характер і ступінь деградації порохового заряду.

Для отримання об'єктивних даних про реальні БЕП  $P_o(t)$ ,  $V_o(t)$ , що відповідають поточному технічному стану КС і боєприпасів, потрібна реалізація їх визначення шляхом вимірювань [17]. Для таких вимірювань можуть бути застосовані як засоби вимірювання миттєвих значень тиску порохових газів, так і засоби вимірювання миттєвих значень швидкості руху снаряда, принципи побудови і характеристики яких детально розглянуті у працях [9, 16, 17].

Номінальні криві  $P_n(t)$ ,  $V_n(t)$  можуть бути визначені як експериментальним шляхом (реєстрація кривих для БЕП при здійсненні пострілу за наявності технічно справних КС і боєприпасів), так і розрахунковим методом (як розв'язок рівнянь внутрішньої балістики за номінальних значень умов заряджання).

Ключовим питанням для практичної реалізації такого методу діагностування залишається встановлення залежностей між видом дефекту КС (боєприпасів) і ступенем його прояву та виглядом кривих  $P(t)$ ,  $V(t)$ . Такі залежності можуть бути встановлені на основі розв'язування системи рівнянь внутрішньої балістики за умови інтеграції до неї виразів, які моделюють відхилення відповідних геометричних параметрів КС та енергетичних параметрів порохового заряду.

Система рівнянь внутрішньої балістики [7] складається з таких рівнянь.

1. Основного рівняння піродинаміки (рівняння перетворення енергії)

$$ps(l_{\psi} + l) = f\omega\psi - \frac{\theta}{2}\varphi m v^2, \quad (1)$$

де  $s$  – площа поперечного перерізу каналу ствола (включаючи нарізи);  $l_{\psi}$  – зведена довжина вільного об'єму камори;  $f$  – сила пороху;  $\omega$  – маса порохового заряду;  $\theta$  – параметр розширення порохових газів;  $\varphi$  – коефіцієнт урахування другорядних робіт (коефіцієнт фіктивності маси);  $m$  – маса снаряду.

2. Рівняння, що виражають закон горіння пороху:

$$\psi = xz(1 + \lambda z); \quad (2)$$

$$\frac{de}{dt} = u = u_1 p; \quad (3)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_1}{A_1} \sigma u_1; \quad p = \frac{x}{e_1} \sigma u_1 p, \quad (4)$$

де  $\chi$ ,  $\lambda$  – геометричні характеристики порохового зерна;  $z$  – відносна товщина шару порохового зерна, що згоріло;  $u$  – швидкість горіння пороху;  $u_1$  – швидкість горіння пороху за атмосферного тиску;  $e$  – товщина шару порохового зерна, що згоріло;  $e_1$  – половина початкової товщини зводу пороху;  $\sigma$  – відносна поверхня порохового зерна.

3. Рівняння руху снаряда каналом ствола:

$$v = \frac{dl}{dt} = l'; \quad l'' = \frac{d^2 l}{dt^2}. \quad (5)$$

Аналітичний шлях розв'язання рівнянь внутрішньої балістики передбачає виконання складних перетворень, прийняття припущень та застосування спрощень, що веде до обмеженої точності отриманих результатів. Тому аналітичні розв'язки рівнянь внутрішньої балістики є наближеними.

З огляду на можливості сучасних засобів обчислювальної техніки, доцільним є розв'язування рівнянь внутрішньої балістики чисельним шляхом. Він дозволяє отримати розв'язки із заданою точністю, яка визначатиметься розміром кроку інтегрування за часом та точністю підготовки вихідних даних. Чисельним методам можна віддати перевагу і в таких складних випадках, коли, наприклад, один або декілька параметрів змінюються у процесі пострілу (наприклад, змінним є перетин каналу ствола внаслідок його роздуття або зношування), що вкрай важко врахувати при застосуванні аналітичних методів.

Однак відомі чисельні методи розв'язування рівнянь внутрішньої балістики не адаптовані до випадків моделювання дефектів зброї, оскільки не дозволяють урахувати втрати порохових газів внаслідок їх прориву. Тому доцільним є подальший розвиток чисельних методів у цьому напрямку.

За основу при побудові різницевої схеми для чисельного розв'язування рівнянь внутрішньої балістики у статті застосовано підхід, запропонований М. Є. Серебряковим [7].

Для побудови різницевої схеми слід виконати такі операції:

- визначити перелік шуканих елементів пострілу;
- визначити перелік змінних, що входять до рівнянь внутрішньої балістики;
- сформулювати перелік умов заряджання, які є вихідними даними для моделювання процесу пострілу;
- визначити початкові умови для першого і другого періодів пострілу;
- скласти рекурентні вирази для покрокового обчислення шуканих елементів пострілу для першого і другого його періодів.

Рекурентні вирази, які відповідають системі рівнянь внутрішньої балістики (1) – (5), отримуються на основі розкладання в ряд Тейлора. Таким чином, стає можливим основні БЕП виразити як функції від часу та їх похідні до третього порядку включно. При цьому основні рівняння внутрішньої балістики у різницевому вигляді можна подати так:

$$v_{n+1} = l'_{n+1} = l'_n + h l''_n + \frac{h^2}{2} l'''_n; \quad (6)$$

$$l_{n+1} = l_n + h l'_n + 0,5 h^2 l''_n + \frac{h^3}{6} l'''_n; \quad (7)$$

$$P_{n+1} = k_2 \frac{1 - k_3 v_{n+1}^2}{l_{\Delta} - a + l_{n+1}}; \quad (8)$$

$$l_{n+1}'' = k_4 P_{n+1}; \quad (9)$$

$$l_{n+1}''' = 2l_{n+1}'' / h - 2l_n'' / h - l_n''', \quad (10)$$

де коефіцієнти визначаються за виразами

$$k_1 = \frac{\varphi m}{s I_k}; \quad k_2 = \frac{f \omega}{s}; \quad k_3 = \frac{\theta \varphi m}{2 f \omega}; \quad k_4 = \frac{s}{\varphi m}. \quad (11)$$

На першому (оціночному) етапі розв'язування рівнянь (6) – (10) крок за часом  $\Delta t = h$  доцільно вибирати такий, щоб отримати криві тиску  $P(t)$  і швидкості  $V(t)$ , які складаються з 20 – 30 точок від початку руху снаряда до його виходу з КС. На другому (уточнюючому) етапі розв'язування рівнянь крок за часом слід послідовно зменшувати до певного значення, після якого його подальше зменшення не призводить до змінювання кривих  $P(t)$  та  $V(t)$ , більшого ніж задана межа відхилення  $\varepsilon$ .

Таким чином, запропонований метод діагностування технічного стану каналів стволів та боеприпасів на основі ідентифікації характеристик балістичних елементів пострілу полягає у експериментальному отриманні кривих для БЕП:  $P_{\delta}(t)$  або  $V_{\delta}(t)$ , співставленні їх з відповідними номінальними кривими  $P_n(t)$  або  $V_n(t)$ , які відповідають технічно справному стану КС та боеприпасів, визначенні характеру і обсягу відхилень цих кривих та встановленні за формалізованими характерними ознаками виду дефекту та ступеня його прояву.

### Висновки

У статті запропоновано метод діагностування технічного стану КС та боеприпасів, який ґрунтується на отриманні і аналізі характеристик балістичних елементів пострілу: тиску порохових газів у каналі ствола та швидкості руху снаряда каналом ствола.

Застосування такого методу дозволить:

- підвищити достовірність діагностування та експлуатаційного контролю технічного стану вогнепальної зброї і боеприпасів до неї та внаслідок цього зменшити ймовірність використання несправної зброї;
- прогнозувати технічний стан окремих зразків основних видів вогнепальної зброї на основі дослідження змінювання БЕП у часі та за напрацюванням;
- забезпечити можливість дослідження і оптимізації характеристик дослідних зразків зброї під час їх випробувань;
- досліджувати вплив умов експлуатації та режимів стрільби на темпи зношування КС.

Застосування запропонованого методу та відповідних засобів відкриває шлях для реалізації експлуатаційного контролю зброї і боеприпасів у польових умовах, що виключатиме її транспортування до стаціонарних місць проведення контролю. Отже, може бути суттєво підвищена оперативність контролю.

Подальші дослідження у даному напрямку доцільно спрямувати на моделювання дефектів КС і боеприпасів, а також на встановлення зв'язку між виглядом залежностей  $P(t)$ ,  $V(t)$  та характером дефектів КС або боеприпасів.

### Список використаних джерел

1. Біленко, О. І. Вплив параметрів заряджання на початкову швидкість кулі [Текст] / О. І. Біленко // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – Харьков : НТУ “ХПИ”, 2007. – № 11. – С. 33–37.
2. Біленко, О. І. Формування вимог до розкиду дульних швидкостей металевих елементів

- кінетичної зброї [Текст] / О. І. Біленко // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. – Харків : Акад. ВВ МВС України, 2013. – Вип. 1. – С. 16–20.
3. Руководство по эксплуатации войсковых калибров и приборов для РАВ [Текст]. – Москва : Воениздат, 1983. – 45 с.
4. Потапов, А. А. Искусство снайпера [Текст] / А. А. Потапов. – Москва : Фаир-Пресс, 2005. – 404 с.
5. Руководство по эксплуатации РАВ [Текст]. – Москва : Воениздат, 1989. – Ч. 1. – 233 с.
6. Наказ про затвердження Інструкції про порядок категорювання ракетно-артилерійського озброєння [Копія] / МВС. – Київ, 08.11.2017, № 912.
7. Серебряков, М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет [Текст] / М. Е. Серебряков. – Москва : Оборонгиз, 1962. – 702 с.
8. Корнер, Дж. Внутренняя баллистика орудий [Текст] : монография : пер. с англ. ; под ред. проф. И. П. Граве. — Москва : Изд-во лит. на иностр. яз., 1953. – 462 с.
9. Медведева, Н. П. Экспериментальная баллистика. Часть 1. Методы измерения давления [Текст] / Н. П. Медведева. – Томск : ТГУ, 2006. – 148 с.
10. Михайлов, К. В. Экспериментальная баллистика. Приборы и методы баллистических измерений [Текст] / К. В. Михайлов. – София : ВТС, 1976. – 388 с.
11. Шкворников, П. Н. Экспериментальная баллистика [Текст] / П. Н. Шкворников, Н. М. Платонов. – София : ВТС, 1976. – 392 с.
12. Королев, А. А. Баллистика ракетного и ствольного оружия [Текст] / А. А. Королев, В. А. Комочков. – Волгоград : ВГТУ, 2010. – 242 с.
13. Крюков, О. М. Перспективи експериментального визначення балістичних елементів пострілу [Текст] / О. М. Крюков, В. Г. Мудрик // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. – Харків : Акад. ВВ МВС України, 2013. – Вип. 1 (21). – С. 21–24.
14. Крюков, А. М. Дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия объектов со световозвращающей поверхностью [Текст] / А. М. Крюков, Г. Н. Доля, В. Г. Мудрик // Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – Т. 12, № 3. – С. 436–441.
15. Біленко, О. І. Підвищення стабільності дульної швидкості поразяючих елементів кінетичної зброї не смертельної дії [Текст] / О. І. Біленко, В. В. Пашенко // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. – Харків : Акад. ВВ МВС України, 2010. — Вип 2 (16). – С. 5–10.
16. Крюков, О. М. Шляхи підвищення точності моделювання внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. – Харків : Акад. ВВ МВС України, 2009. – Вип. 1 (13). – С. 11–14.
17. Крюков, О. М. Проблеми вимірювального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – Харків : ХНУПС, 2009. – Вип. 1 (19). – С. 150–152.

*Стаття надійшла до редакції: 18.10.2018 р.*

**УДК 623.442:623.522**

**А. М. Крюков, Р. С. Мельников, В. А. Муzychук**

## **МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КАНАЛОВ СТВОЛОВ И БОЕПРИПАСОВ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСТРЕЛА**

*Проведен анализ современных методов диагностирования технического состояния каналов стволов и боеприпасов к огнестрельному оружию. Предложен перспективный метод диагностирования, определено его содержание. Обоснована потребность в установлении связи между техническим состоянием каналов стволов и боеприпасов и характеристиками баллистических элементов выстрела. Признано целесообразным для моделирования течения процесса выстрела при наличии дефектов каналов стволов и боеприпасов решение уравнений*

*внутренней баллистики осуществлять численным методом. Рассмотрены принципы построения разностной схемы.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: канал ствола, боеприпасы, техническое состояние, баллистический элемент выстрела, диагностирование, дефект канала ствола, уравнение внутренней баллистики, разностная схема, численный метод.*

**UDC 623.442:623.522**

**O. M. Kriukov, R. S. Melnikov, V. A. Muzychuk**

**METHOD OF DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF THE BARRELS AND AMMUNITION ON THE BASIS OF THE IDENTIFICATION CHARACTERISTICS OF THE BALLISTIC ELEMENTS OF THE SHOT**

*Deviations of the internal geometric parameters of the barrel bore at its wear or blow-up, leads to irretrievable loss of energy of powder gases at the shot. As a result, the initial velocity of the projectile decreases, and when it falls to values beyond the permissible limits, the resource of the barrel channel is considered exhausted. An important task is to monitor the technical condition of ammunition received from long-term storage, damaged or even from defective batches.*

*Currently, the methods of operational control of weapons are technically and morally obsolete. Known methods and means of diagnosing the technical condition of the channels of barrels and ammunition for barrel systems are ineffective, because they are based on outdated principles and provide for the use of measuring instruments of limited accuracy.*

*The paper proposes a promising method for diagnosing the technical condition of the channels of barrels and ammunition based on the analysis of ballistic elements of the shot, determined its content. This method consists in obtaining experimental curves for the ballistic elements of the shot, comparing them with the respective nominal curves, which correspond to the technically sound condition of the barrel and ammunition, determining the nature and extent of the deviations of these curves, and installing formalized the characteristics of the type of defect and degree of its manifestation.*

*The need to establish a connection between the technical condition of the channels of barrels and ammunition and the characteristics of ballistic elements of the shot is substantiated. It is determined that it is appropriate to solve the equations of internal ballistics by numerical method for modeling the process of the shot in the presence of defects in the channels of barrels and ammunition. The principles of constructing a difference scheme for solving equations by numerical method are considered.*

*The advantages of using the proposed method of diagnosis and the direction of further research in this scientific direction are formulated.*

*К е у в о р д с: barrel bore, ammunition, technical condition, ballistic element of the shot, diagnosis, defect of the barrel bore, equation of internal ballistics, difference scheme, numerical method.*

**Крюков Александр Михайлович** – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного центру службово-бойової діяльності НГУ Національної академії Національної гвардії України.

ORCID 0000-0003-4194-6081

**Мельніков Роман Сергійович** – ад'юнкт Національної академії Національної гвардії України.

ORCID 0000-0003-3517-2040

**Музичук Володимир Антонович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ракетно-артилерійського озброєння Національної академії Національної гвардії України.

ORCID 0000-0001-6856-1857