

## Моделювання процесу пострілу на основі чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики

О. М. Крюков, Р. С. Мельніков, О. І. Біленко, А. В. Зозуля, С. В. Герасимов, М. В. Борисенко, В. О. Павлій, С. І. Хмелевський, Д. В. Абрамов, В. А. Сівак

*Дослідження процесу пострілу з вогнепальної зброї з урахуванням ступеня зносу ствола потребує оцінювання втрат порохових газів внаслідок їх прориву між стінками каналу ствола та снарядом. На цей час відомі методи розв'язання рівнянь внутрішньої балістики не передбачають отримання рішень з урахуванням втрати частки порохових газів. Внаслідок цього з'явилась необхідність у подоланні протиріччя між потребами прикладної балістики та можливостями наявного науково-методичного апарату розв'язання рівнянь внутрішньої балістики. Викладено принципи побудови різницевої схеми для чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики за умов урахування впливу типових дефектів каналів стволів і боєприпасів. Наведено рекурентні вирази для покрокового обчислення балістичних елементів пострілу, визначено початкові умови для першого і другого періодів пострілу. Проведено практичну апробацію різницевої схеми шляхом чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики для характерних сполучень вихідних даних та підтверджено її адекватність.*

*Обґрунтовано доцільність створення бази даних балістичних елементів пострілу для типових дефектів каналів стволів і порохових зарядів.*

*В результаті досліджень отримано різницеву схему для чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики за умов забезпечення можливості урахування впливу типових дефектів каналів стволів і боєприпасів на балістичні елементи пострілу. Це відкриває шлях до удосконалення експлуатаційного контролю технічного стану зброї та боєприпасів за рахунок підвищення його достовірності і оперативності.*

*На основі чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики відкривається можливість моделювання впливу відхилення геометричних параметрів каналу ствола та деградації порохового заряду на перебіг процесу пострілу. Цим зумовлена важливість та корисність роботи для прикладної балістики*

*Ключові слова: канал ствола, боєприпас, технічний стан, балістичний елемент пострілу, внутрішня балістика, різницева схема, чисельний метод*

### 1. Вступ

Ефективність застосування вогнепальної зброї з відповідними боєприпасами залежить від стабільності її основних балістичних характеристик та відповідності значень цих характеристик встановленим нормам [1]. Балістичні характеристики значною мірою залежать від технічного стану зброї та боєприпасів,

який впливає на протікання процесу пострілу і, таким чином, визначає закони змінювання балістичних елементів пострілу.

До основних балістичних елементів пострілу відносяться шлях  $l$  снаряду в каналі ствола, швидкість  $v$  руху снаряду відносно каналу ствола та середній тиск  $p$  порохових газів на снаряд і стінки каналу ствола в заснарядному просторі [2].

Найважливішою частиною вогнепальної зброї є її ствол, в каналі якого відбувається процес пострілу. Протягом терміну експлуатації канал ствола будь-якого зразка зброї піддається механічному зносу, а також, за певних умов, є можливим його роздуття. Відхилення внутрішніх геометричних параметрів каналу ствола при зношуванні або роздутті веде до втрати частини енергії порохових газів при пострілі, що відбивається на балістичних елементах пострілу, внаслідок цього початкова швидкість снаряда зменшується. Ці фактори можуть призвести до неможливості забезпечення потрібних балістичних характеристик зброї і заданої ефективності стрільби.

Під час довготривалого зберігання боєприпасів, особливо внаслідок порушення його режиму, змінюються енергетичні характеристики пороху та швидкість його горіння. Це відбивається на балістичних елементах пострілу і призводить до відхилення початкової швидкості снаряда, а в окремих випадках – і до небезпечного зростання максимального тиску порохових газів в каналі ствола.

Дослідження залежностей балістичних характеристик вогнепальної зброї від технічного стану зброї і боєприпасів пов'язане з необхідністю моделювання впливу параметрів каналу ствола та порохового заряду на балістичні елементи пострілу.

Можливості побудови таких моделей впливу емпіричним методом є вельми обмеженими внаслідок складності практичного відтворення, інструментальної ідентифікації і опису реальних дефектів каналів стволів і параметрів деградації боєприпасів. Разом з цим є добре відомими та апробованими рівняння внутрішньої балістики [3, 4], які встановлюють зв'язок між балістичними елементами пострілу і умовами заряджання. Під умовами заряджання розуміють сукупність параметрів, що характеризують конструктивні особливості ствола і боєприпасу та фізико-хімічні характеристики порохового заряду, і які впливають на балістичні характеристики зброї та елементи пострілу. Тому більш перспективною виглядає можливість побудови моделей впливу відхилення геометричних параметрів каналу ствола та деградації порохового заряду на балістичні елементи пострілу розрахунковим шляхом, наприклад, шляхом чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики.

Таким чином, актуальність роботи полягає у подоланні протиріччя між потребами прикладної балістики та можливостями наявного науково-методичного апарату розв'язання рівнянь внутрішньої балістики. В межах цього наукового напрямку відкривається шлях до моделювання впливу відхилення геометричних параметрів каналу ствола та деградації порохового заряду на перебіг процесу пострілу.

## 2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Аналітичний шлях розв'язання рівнянь внутрішньої балістики передбачає виконання складних перетворень, що веде до суттєвого обмеження точності отриманих рішень, тому аналітичні рішення рівнянь внутрішньої балістики є наближеними [5, 6]. Крім того, варіювання будь-яких параметрів заряджання, які за класичним підходом вважаються незмінними у процесі пострілу, не виявляється можливим [7]. Так, наприклад, неможливим є урахування змінних за довжиною каналу ствола відхилень його геометричних розмірів.

Відомі способи вирішення часткових задач внутрішньої балістики, зокрема для каналу ствола конічної форми, а також з урахуванням прориву порохових газів, що має місце при стрільбі з міномета [4]. Але у першому випадку розв'язання спрощується внаслідок лінійного змінення діаметру каналу ствола по довжині, а у другому – через те, що зазор між стінками ствола та міною є постійним, отже розхід порохових газів через зазор залежить лише від їх тиску. У випадку ж роздуття або зносу каналу ствола його діаметр може змінюватися за складним нелінійним законом, встановлення якого є окремим завданням. Внаслідок цього отримати аналітичне рішення зазначеного вище завдання у кінцевому виді не представляється можливим.

В роботі [7] викладено підхід до урахування зношування каналу ствола, але лише в зоні зарядної камори та кульного входу, при цьому знос каналу ствола за його довжиною не розглядається.

В праці [8] викладено методи вимірювання тиску порохових газів всередині каналу ствола. В роботах [9–11] дістали відображення окремі питання експериментального визначення балістичних елементів пострілу. Втім, в жодній з праць [8–11] не розкрито зв'язок між балістичними елементами пострілу та типовими дефектами каналів стволів і боєприпасів.

Експериментальне ж визначення балістичних елементів пострілу реалізоване авторами робіт [8, 9] лише для випадків застосування технічно справних стволів та боєприпасів, а дослідження впливу дефектів каналу ствола та деградації порохових зарядів не проводилося.

Враховуючи наведені вище [4–7] суттєві обмеження аналітичних та емпіричних методів для моделювання процесу пострілу, а також можливості сучасних засобів обчислювальної техніки, доцільним виглядає отримання рішень рівнянь внутрішньої балістики чисельним шляхом. Чисельне розв'язання рівнянь внутрішньої балістики дозволяє здобути рішення із заданою точністю, яка визначатиметься розміром кроку інтегрування за часом та точністю підготовки вихідних даних [12]. Попередня оцінка можливостей чисельних методів свідчить про те, що ним можна віддати перевагу і в таких складних випадках, коли, наприклад, один або декілька параметрів змінюються протягом перебігу процесу пострілу (наприклад, змінним є розміри перетину каналу ствола внаслідок його роздуття або зношування), що вкрай важко урахувати при застосуванні аналітичних методів. Однак відомі чисельні методи розв'язання рівнянь внутрішньої балістики [5, 7, 13] не передбачають урахування втрати частки порохових газів внаслідок їх прориву між стінками пошкодженої ділянки каналу ство-

ла складної форми та снарядом. Таким чином, ці методи не можуть вважатися придатними для випадків моделювання дефектів зброї.

Проведений огляд інформації [4–13] свідчить про те, що на цей час методичні основи моделювання зв'язку між балістичними елементами пострілу та типовими дефектами каналів стволів і боєприпасів не дістали належного висвітлення. Тому доцільним є подальший розвиток чисельних методів розв'язання рівнянь внутрішньої балістики в цьому напрямку.

### 3. Мета і завдання досліджень

Дослідження мали за мету визначити принципи побудови різницевої схеми для чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики за умов урахування впливу типових дефектів каналів стволів і боєприпасів на балістичні елементи пострілу.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- сформулювати перелік вихідних даних для чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики;
- скласти рекурентні вирази для покрокового обчислення шуканих балістичних елементів пострілу;
- визначити початкові умови для першого і другого періодів пострілу;
- провести практичну апробацію різницевої схеми шляхом чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики для характерних сполучень вихідних даних.

### 4. Чисельний метод моделювання процесу пострілу на основі розв'язання рівнянь внутрішньої балістики

Характер перебігу процесу пострілу залежить від технічного стану каналу ствола та боєприпасу і визначається виглядом залежностей балістичних елементів пострілу від часу  $t$  руху снаряду каналом ствола:  $p(t)$  і  $v(t)$ .

Значення балістичних елементів пострілу в певний момент часу встановлюється рівняннями внутрішньої балістики [14], до яких належать:

1. Основне рівняння піродинаміки (рівняння перетворення енергії)

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

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

2. Рівняння, що виражають закон горіння пороху:

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

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

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

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

3. Рівняння руху снаряду

$$ps = \phi m \frac{d\nu}{dt} = \phi m \frac{d^2 l}{dt^2} = \phi m l_t'', \quad (5)$$

де

$$v = \frac{dl}{dt} = l' \quad l'' = \frac{d^2 l}{dt^2}, \quad (6)$$

причому  $v$  зв'язане з  $z$  рівнянням

$$v = \frac{sl_k}{\phi m} (z - z_0), \quad (7)$$

звідки

$$z = z_0 + \frac{\phi m}{sI_k} \nu, \quad (8)$$

де  $z_0$  – відносна товщина шару порохового зерна, що згорів, на момент початку руху снаряду.

Дослідження рівнянь внутрішньої балістики показує, що елементи  $\nu, \psi$  та  $p$  можуть бути виражені як функції від  $l$  або його похідних  $l', l'', l'''$  за часом  $t$  (до третього порядку включно). Якщо прийняти час  $t$  руху снаряду каналом ствола за незалежну змінну, а шлях  $l$  снаряду в каналі ствола за змінну, що розкладається в ряд, то можна застосувати ряд Тейлора [15] для знаходження значень шляху  $l_{n+1}$  і його похідних на суміжній ділянці, яка відповідає часу  $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ , при цьому мають бути відомі значення  $l_n$  і його похідних для попереднього моменту часу  $t_n$ . Таким чином можливо знайти усі елементи горіння пороху і руху снаряду:  $z, \psi, \nu, p, l$  та  $t$ .

За основу при побудові різницевої схеми для чисельного вирішення рівнянь внутрішньої балістики в роботі застосовано підхід, запропонований в роботі [16].

#### 4. 1. Формування переліку вихідних даних для чисельного розв'язання рівнянь внутрішньої балістики

Вирішення цього завдання передбачає виконання таких операцій.

1. Визначення переліку шуканих елементів пострілу:  $l$ ,  $v$  або  $l'$ ,  $p$ ,  $\psi$ .
2. Визначення переліку змінних, що входять до рівнянь внутрішньої балістики:  $z$ ,  $l''$  друга похідна від шляху снаряду за часом,  $l'''$  – третя похідна від шляху снаряду за часом.

3. Формування переліку умов заряджання, які є вихідними даними для моделювання процесу пострілу:  $s$ ,  $m$ ,  $\varphi$ ,  $u_1$ ,  $e_1$ ,  $f$ ,  $\omega$ ,  $\theta$ ,  $\chi$ ,  $\lambda$ , а також  $W_0$  – початковий об'єм зарядної камери,  $p_0$  – тиск форсування,  $\delta$  – щільність пороху,  $\alpha$  – коволюм порохових газів.

Для того, щоб виключити плутанину при розрахунках та при виведенні результатів обчислень усі параметри, які характеризують умови заряджання, подаються в міжнародній системі одиниць фізичних величин (незважаючи на те, що в деяких джерелах інформації вони подаються авторами у позасистемних одиницях).

4. Визначення сукупності параметрів та коефіцієнтів, які є похідними від умов заряджання і характеризують процес пострілу та обчислюються за значеннями наведених вихідних даних.

До таких параметрів відносяться:

$$I_k = \frac{e_1}{u_1} \text{ – повний імпульс тиску газів на час закінчення горіння пороху;}$$

$$\Delta = \frac{\omega}{W_0} \text{ – щільність заряджання;}$$

$$\psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta}}{\frac{f}{p_0} + \alpha - \frac{1}{\delta}} \text{ – частка порохового заряду, що згоріла до початку руху}$$

снаряду;

$$\sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda}{\chi} \psi_0} \text{ – відносна поверхня порохового зерна на момент початку}$$

руху снаряду;

$$z_0 = \frac{2\psi_0}{\chi(\sigma_0 + 1)} \approx \frac{\psi_0}{\chi} \text{ – відносна товщина шару порохового зерна, що згорів}$$

на момент початку руху снаряду;

$$l_0 = \frac{W_0}{s} \text{ – зведена довжина зарядної камери;}$$

$$l_{\Delta} = \frac{1}{s} \left( W_0 - \frac{\omega}{\delta} \right) = l_0 \left( 1 - \frac{\Delta}{\delta} \right) - \text{зведена довжина вільного простору зарядної}$$

камори;

$l_{\psi_0} = l_{\Delta} - a\psi_0$  – зведена довжина вільного об'єму (простору) зарядної камори в момент початку руху снаряду.

Крім того, вводяться коефіцієнти, застосування яких дозволить скоротити запис окремих виразів і спростити розрахунки:

$$a = \frac{\omega}{s} \left( \alpha - \frac{1}{\delta} \right),$$

$$k_1 = \frac{\phi m}{s I_k}, \quad k_2 = \frac{f \omega}{s}, \quad k_3 = \frac{\theta \phi m}{2 f \omega}, \quad k_4 = \frac{s}{\phi m}. \quad (9)$$

#### 4. 2. Складання рекурентних виразів для покрокового обчислення шуканих елементів пострілу

Для першого періоду пострілу рекурентні вирази мають такий вигляд:

$$l'_{n+1} = l'_n + h l''_n + \frac{h^2}{2} l'''_n, \quad (10)$$

$$v_{n+1} = l'_{n+1}, \quad (11)$$

$$z_{n+1} = z_0 + k_1 v_{n+1}, \quad (12)$$

$$\psi_{n+1} = \chi z_{n+1} + \chi \lambda z_{n+1}^2, \quad (13)$$

$$l_{n+1} = l_n + h l'_n + 0,5 h^2 l''_n + \frac{h^3}{6} l'''_n, \quad (14)$$

$$p_{n+1} = k_2 \frac{\psi_{n+1} - k_3 v_{n+1}^2}{l_{\Delta} - a \psi_{n+1} + l_{n+1}}, \quad (15)$$

$$l''_{n+1} = k_4 p_{n+1}, \quad (16)$$

$$l'''_{n+1} = 2l''_{n+1} / h - 2l''_n / h - l'''_n. \quad (17)$$

Подальший розрахунок елементів пострілу для другого його періоду базується на тих самих різницевих виразах, що й для першого, за винятком відсутності потреби у виразах для обчислення  $\psi$  та  $z$ . У вираз для  $p$  підставляємо зна-

чення  $\psi$ , що для усіх кроків за часом дорівнює 1. Таким чином, сукупність різницевих виразів для другого періоду пострілу отримує вигляд:

$$v_{n+1} = l'_{n+1} = l'_n + hl''_n + \frac{h^2}{2} l'''_n, \quad (18)$$

$$l_{n+1} = l_n + hl'_n + 0,5h^2 l''_n + \frac{h^3}{6} l'''_n, \quad (19)$$

$$p_{n+1} = k_2 \frac{1 - k_3 v_{n+1}^2}{l_{\Delta} - a + l_{n+1}}, \quad (20)$$

$$l''_{n+1} = k_4 p_{n+1}, \quad (21)$$

$$l'''_{n+1} = 2l''_{n+1} / h - 2l''_n / h - l'''_n. \quad (22)$$

#### 4. 3. Визначення початкових умов для першого і другого періодів пострілу

Оскільки відлік часу  $t$  ведеться з моменту початку руху снаряду, при  $t=0$  початкові умови для першого періоду пострілу матимуть вигляд

$$l(0) = 0, \quad p(0) = p_0, \quad z(0) = z_0, \quad \psi(0) = \psi_0, \quad (23)$$

$$l'(0) = v(0) = 0, \quad l''(0) = k_4 p_0,$$

$$l'''(0) = k_4 k_2 \frac{\chi \sigma_o}{I_k} \frac{l_{\Delta}}{l_{\psi_0}^2} p_0 = l''(0) k_2 \frac{\chi \sigma_o}{I_k} \frac{l_{\Delta}}{l_{\psi_0}^2}. \quad (24)$$

Момент  $t_{k1}$  закінчення першого періоду пострілу визначається за досягненням змінною  $\psi$  значення  $\psi=1$ . Для моменту часу  $t_{k1}$  фіксуються значення усіх елементів пострілу, що відповідають кінцю горіння пороху:  $v_{k1}$ ,  $l_{k1}$ ,  $p_{k1}$ . Ці значення визначають початкові умови для другого періоду пострілу:

$$l(0) = l_{k1}, \quad l'(0) = v(0) = v_{k1},$$

$$l''(0) = k_4 p_{k1}, \quad l'''(0) = -k_4(1 + \theta) \frac{v_{k1} p_{k1}}{2l_{k1}}. \quad (25)$$

Кінцем другого періоду пострілу вважається виконання умови досягнення снарядом дульного зрізу:



$$l \geq l_d, \quad (26)$$

де  $l_d$  – довжина нарізної частини каналу ствола.

На першому (оціночному) етапі розв’язання рівнянь крок за часом  $\Delta t = h$  обирається таким, щоб отримати криві тиску  $p(t)$  і швидкості  $v(t)$ , які складаються з 20–30 точок від початку руху снаряду до його виходу з каналу ствола.

На другому (уточнюючому, або завершальному) етапі розв’язання рівнянь крок за часом послідовно зменшується до такого значення, за якого його подальше зменшення не приводить до змінювання ходу кривих  $p(t)$  і  $v(t)$ , більшого, ніж задана межа відхилення  $\varepsilon$ .

### 5. Практична апробація різницевої схеми шляхом чисельного розв’язання рівнянь внутрішньої балістики та її результати

Для апробації різницевої схеми та отримання чисельних розв’язків рівнянь внутрішньої балістики для декількох характерних сполучень вихідних даних в роботі було застосовано табличний процесор Microsoft Excel.

Зокрема, змодельовані процеси пострілу для таких зразків зброї, як 7,62 мм снайперська гвинтівка СВД з 7,62×54 гвинтівковим патроном та 122-мм гаубиці Д-30 з 122-мм пострілом з осколково-фугасним снарядом і повним зарядом за номінальних значень усіх параметрів заряджання.

Приклади результатів моделювання наведено на рис. 1–4.

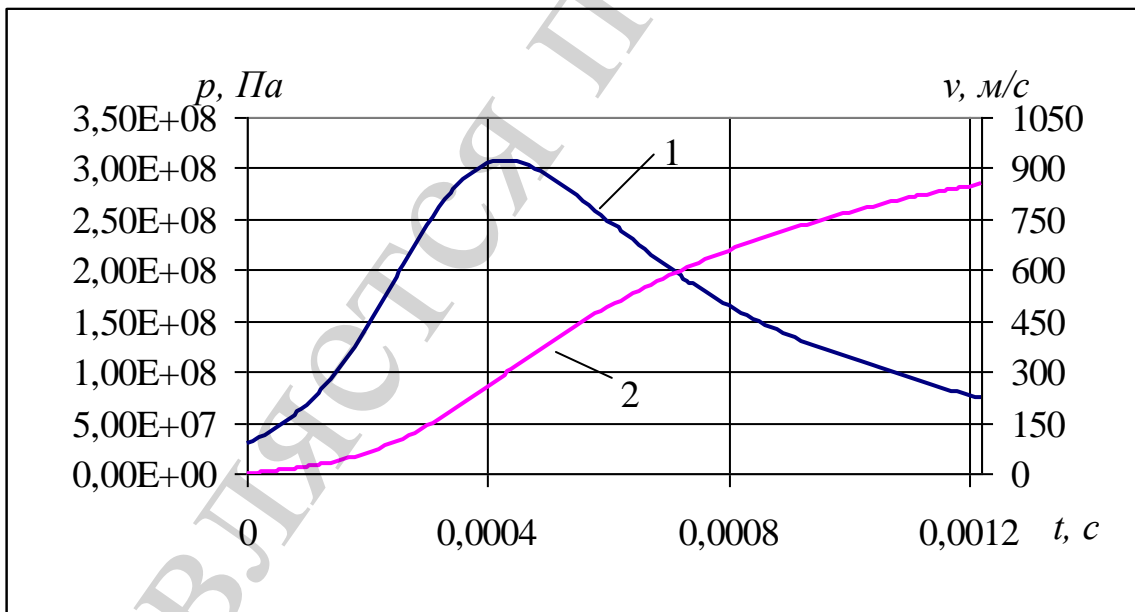


Рис. 1. Залежності  $p(t)$ ,  $v(t)$ , для 7,62 мм снайперської гвинтівки СВД:  
1 – залежність  $p(t)$ , 2 – залежність  $v(t)$

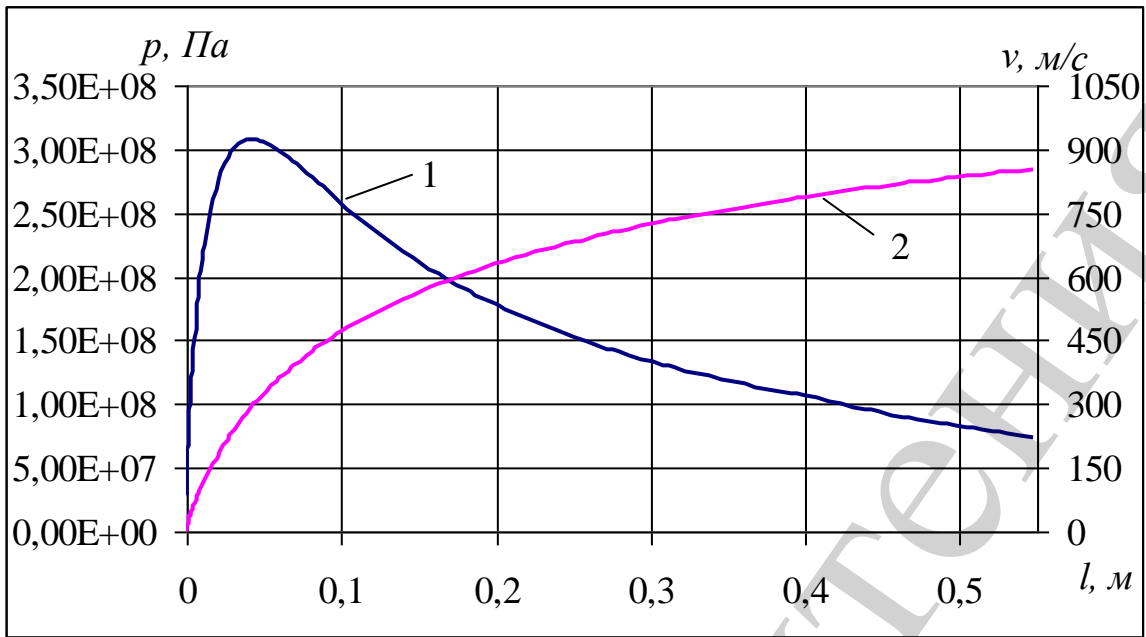


Рис. 2. Залежності  $p(l)$ ,  $v(l)$  для 7,62 мм снайперської гвинтівки СВД:  
 1 – залежність  $p(l)$ , 2 – залежність  $v(l)$

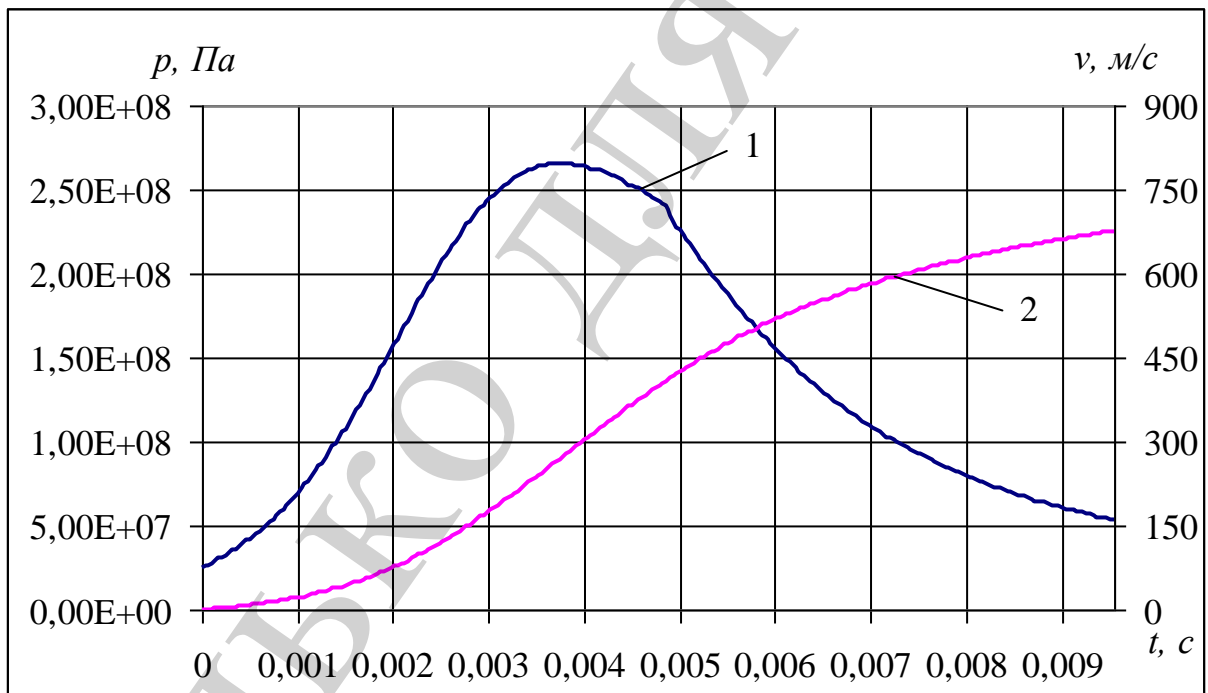


Рис. 3. Залежності  $p(t)$ ,  $v(t)$  для 122 мм гаубиці Д-30:  
 1 – залежність  $p(t)$ , 2 – залежність  $v(t)$

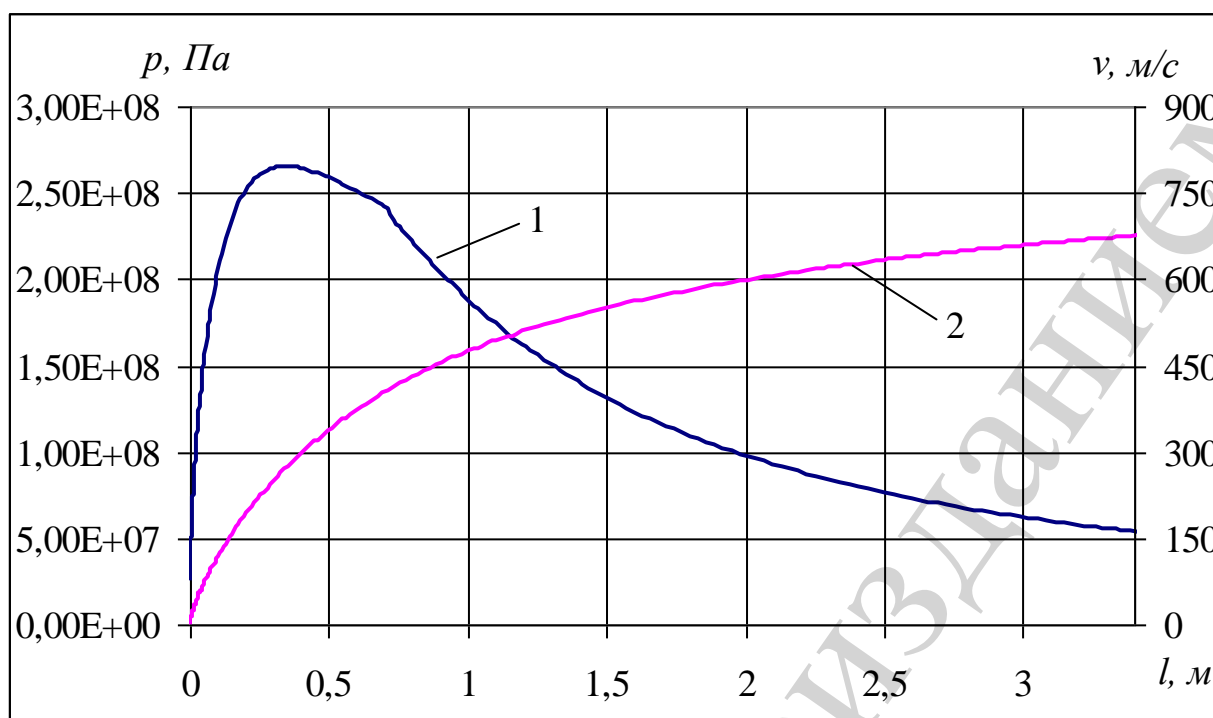


Рис. 4. Залежності  $p(l)$ ,  $v(l)$  для 122 мм гаубиці Д-30:  
1 – залежність  $p(l)$ , 2 – залежність  $v(l)$

За графіками 1 на рис. 1–4 добре ідентифікуються перший та другий періоди пострілу, а також момент часу  $t_m$  і шлях снаряду  $l_m$ , які відповідають максимальному тиску порохових газів. Крім того, за графіками 1, 2 на рис. 1–4 визначаються максимальний  $p_m$  і дульний  $p_d$  тиск, дульна  $v_d$  швидкість снаряду і його швидкість  $v_m$  при максимальному тиску.

Аналіз отриманих результатів показав, що вони співпадають з даними таблиць внутрішньої балістики [17] в контрольних точках, а саме – в точці, де реєструється максимальний тиск:  $(p_m, t_m)$ ,  $(v_m, t_m)$ ,  $(p_m, l_m)$ ,  $(v_m, l_m)$ , а також у кінцевій точці руху снаряду каналом ствола  $(p_d, t_d)$ ,  $(v_d, t_d)$ ,  $(p_d, l_d)$ ,  $(v_d, l_d)$ .

Крім того, проведено моделювання процесу пострілу для випадків відхилення параметрів порохового заряду від номінальних значень. Зокрема, отримані рішення для випадків зменшення сили пороху  $f$ , яке може мати місце внаслідок деградаційних процесів під час старіння порохових зарядів, наприклад, при їх тривалому зберіганні. Приклади результатів цього моделювання наведено на рис. 5, 6.

Як видно з рис. 5, зменшення сили пороху  $f$  веде до падіння тиску порохових газів на ділянці очікуваного його максимуму, внаслідок чого швидкість горіння пороху уповільнюється, тиск досягає максимального значення із певним запізненням, а тривалість процесу пострілу, і зокрема, його першого періоду, збільшується. На графіках 2–4 рис. 6 від самого початку руху снаряду спостерігається «завал» кривих відносно кривої для технічно справного боеприпасу. Ефект від даного явища є не критичним лише при незначному (до 3...7%) зменшенні сили пороху (криві 3, 4), оскільки падіння дульної швидкості при цьому не перевищує гранично допустимого значення, яке зазвичай

складає 5 %. При подальшому зменшенні сили порошу ефект стає критичним (падіння дульної швидкості значно перевищує 5 %. Як криві  $p(t)$ , так і криві  $v(t)$  є достатньо інформативними, оскільки зменшення сили порошу за ними ідентифікується добре.

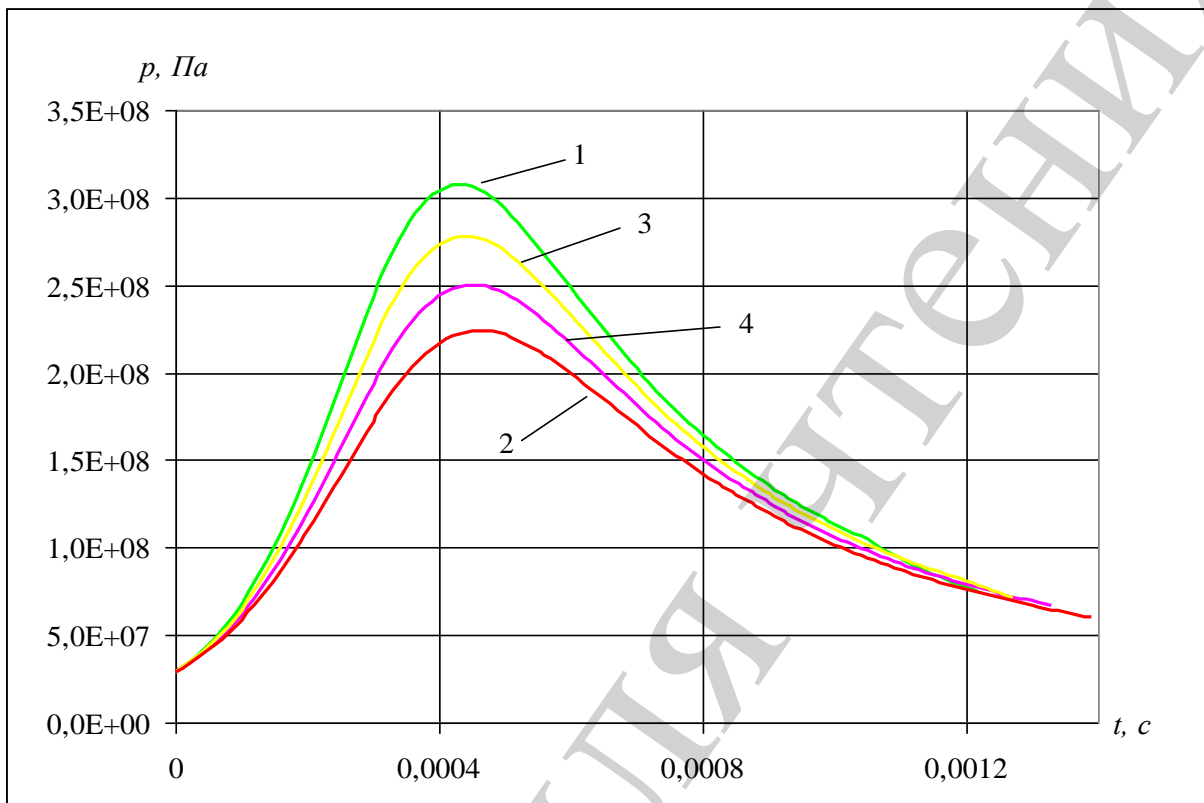


Рис. 5. Залежності  $p(t)$  для змодельованого зменшення сили порошу:  
1 – технічно справний боєприпас, 2 – критичне зменшення сили порошу,  
3, 4 – некритичне зменшення сили порошу

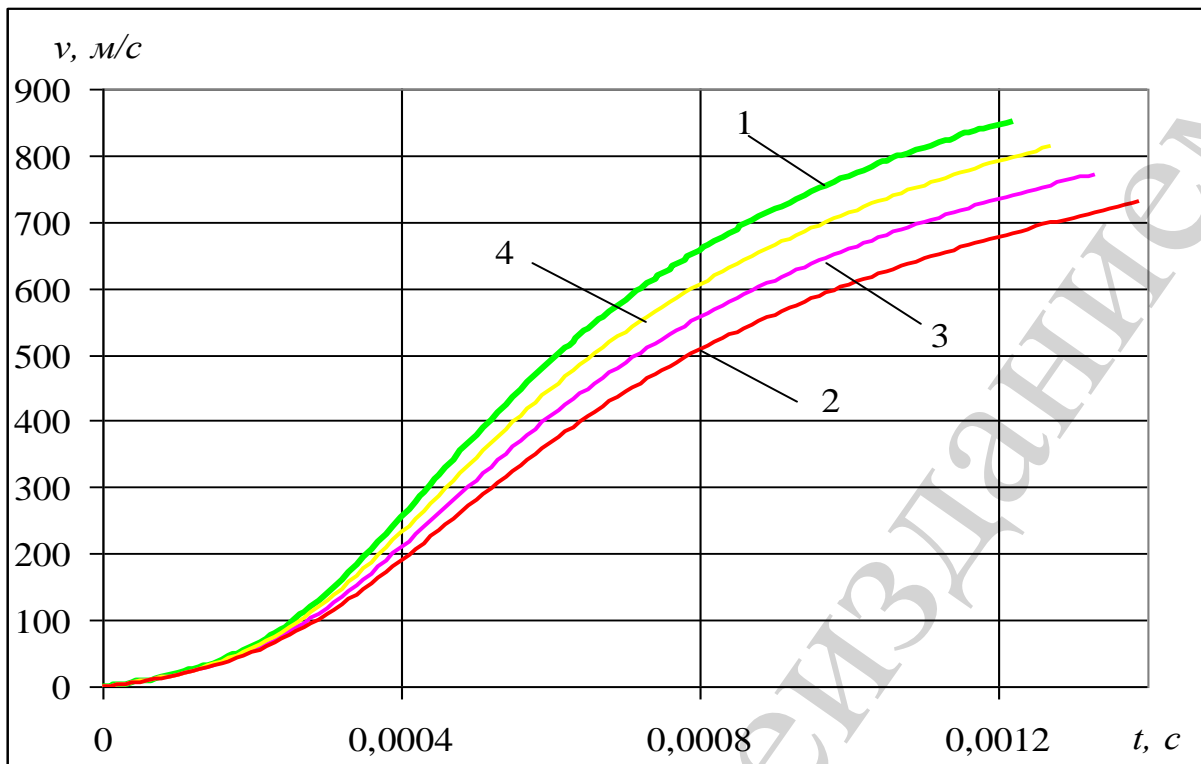


Рис. 6. Залежності  $v(t)$  для змодельованого зменшення сили пороху:  
 1 – технічно справний боєприпас, 2 – критичне зменшення сили пороху,  
 3, 4 – зменшення сили пороху

Таким чином, результати розв'язання рівнянь внутрішньої балістики чисельним методом за допомогою розглянутої різницевої схеми можна вважати достатньо адекватними. Запропонована різницева схема може бути застосована для отримання рішень рівнянь внутрішньої балістики, моделювання та аналізу впливу зміни вихідних даних на характер перебігу внутрішньобалістичних процесів під час пострілу.

## 6. Обговорення результатів побудови різницевої схеми та її апробації

Хід кривих  $p(t)$ ,  $v(t)$  визначається параметрами перебігу процесу пострілу і, зокрема, геометричними характеристиками каналу ствола, а також енергетичними характеристиками порохового заряду та швидкістю його горіння. Таким чином, між геометричними характеристиками каналу ствола та характеристиками порохового заряду і виглядом кривих для балістичних елементів пострілу існує об'єктивний зв'язок.

Зміна технічного стану каналів стволів та боєприпасів веде до відхилення умов заряджання і зміни параметрів перебігу процесу пострілу, що можна спостерігати за зміною вигляду відповідних кривих  $p(t)$ ,  $v(t)$ . Кожний з дефектів, які ідентифікуються (наприклад, роздуття, зношування каналу ствола, падіння сили пороху, зростання швидкості його горіння) характеризується відповідними характерними ознаками, а розмір відхилення визначає ступінь прояву дефекту.

Для отримання об'єктивних даних про реальні балістичні елементи пострілу, які відповідають поточному технічному стану каналу ствола і боєприпа-

су, потрібна реалізація їх визначення шляхом вимірювань [18, 19]. Для таких вимірювань можуть бути застосовані як засоби вимірювання миттєвих значень тиску порохових газів, так і засоби вимірювання миттєвих значень швидкості руху снаряду, принципи побудови і характеристики яких детально розглянуті в [16, 20].

Результати цієї роботи можуть бути застосовані для визначення еталонних кривих  $p(t)$ ,  $v(t)$ , які відповідають технічно справному стану каналу ствола та боєприпасів. Запропонована різницева схема дозволить моделювати вплив дефектів каналу ствола і деградації порохових зарядів на балістичні елементи пострілу. Крім того, запропонований підхід дозволяє розв'язувати інші часткові задачі внутрішньої балістики, які потребують врахування мінливості умов заряджання. До таких задач відносяться моделювання пострілу зі зброї з відносно низьким тиском форсування, з урахуванням впливу температури заряду на процес пострілу [21] тощо.

Результати такого моделювання стануть необхідною основою для створення бази даних балістичних елементів пострілу для типових дефектів каналів стволів та порохових зарядів з метою їх ідентифікації при діагностуванні зброї та боєприпасів до неї. За виглядом кривих  $p(t)$ ,  $v(t)$ , а точніше – за характером та ступенем відхилень цих кривих від тих, що отримані за номінальних значень параметрів заряджання, можна встановити характер та місце знаходження дефекту каналу ствола або характер і ступінь деградації порохового заряду.

Особливо цінними дані про технічний стан каналів стволів можуть виявитися для зразків зброї з обмеженим ресурсом, з високою закупівельною вартістю, з підвищеними вимогами до підтримання балістичних характеристик в заданих межах. До таких зразків зброї можна віднести артилерійські системи, снайперську та протитанкову зброю, кінетичну зброю несмертельної дії.

Слід також відзначити, що обидва різних за своєю природою явища – зношування (роздуття) каналу ствола або деградація порохового заряду – можуть призвести до падіння дульної швидкості снаряду. Значний практичний інтерес представляє діагностування причини зниження дії порохових газів на снаряд – чи то за рахунок геометричних відхилень каналу ствола, чи внаслідок застосування боєприпасів незадовільної якості. Можливості вирішення цього завдання на основі відомих методів оцінювання технічного стану вкрай обмежені.

Таким чином, запропонована в роботі різницева схема дозволяє моделювати процес пострілу за умов урахування типових дефектів каналів стволів і боєприпасів. Це стає можливим, зокрема, за рахунок введення відповідних корегувань, що відображають змінювану геометрію каналу ствола, до обчислюваних елементів пострілу на будь-якому кроці за часом.

Втім, не слід застосовувати розглянутий спосіб моделювання процесу пострілу, що здійснюється з порохами, при згорянні яких вторинні хімічні реакції суттєво впливають на створюваний тиск продуктів згорання. Інше обмеження стосується використання різницевої схеми для тих видів зброї, для яких не можна знехтувати втратою енергії за рахунок теплообміну між порохом і стінками каналу ствола. Крім того, запропонована різницева схема не дозволяє

отримати коректні рішення для систем, для яких за визначенням відсутній тиск форсування, хоча в межах цієї роботи такі системи і не розглядалися.

Подальші дослідження в даному напрямку доцільно спрямувати на моделювання типових дефектів каналів стволів і порохових зарядів і створення відповідної бази даних балістичних елементів пострілу для практичного застосування при діагностуванні зброї та боєприпасів до неї. Певні можливості з удосконалення різницевої схеми відкриватимуться при урахуванні реального закону змінювання параметру розширення порохових газів замість застосування усередненого значення цієї величини. Втрату ж енергії за рахунок теплообміну між пороховими газами і стінками каналу ствола можливо врахувати опосередковано, наприклад, шляхом відповідного зменшення сили пороху, але це питання потребуватиме додаткових досліджень.

## 7. Висновки

1. Визначено перелік умов заряджання, які є вихідними даними для моделювання процесу пострілу. До цих вихідних даних відносяться, зокрема, геометричні параметри каналу ствола і зарядної камери, фізико-хімічні параметри порохового заряду, а також його маса.

2. На основі розкладання рівнянь внутрішньої балістики в ряд Тейлора складено рекурентні вирази для покрокового обчислення шуканих балістичних елементів пострілу. Ці вирази дозволяють знаходити усі елементи горіння пороху і руху снаряду на послідовних кроках за часом.

3. Визначено початкові умови для розв'язання рівнянь окремо для першого і другого періодів пострілу, що дозволило врахувати зміну динаміки розгону снаряду після припинення притоку порохових газів.

4. Проведено моделювання процесу пострілу із застосуванням запропонованої різницевої схеми для характерних сполучень вихідних даних. Відхилення результатів моделювання від даних таблиць внутрішньої балістики в контрольних точках не перевищує 1–2 %. Це свідчить про адекватність різницевої схеми і можливість її подальшого застосування при моделюванні впливу дефектів каналів стволів і боєприпасів на характер перебігу процесу пострілу.

## Література

1. Біленко О. І. Формування вимог до розкиду дульних швидкостей металевих елементів кінетичної зброї // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. 2013. Вип. 1. С. 16–20.
2. Бурлов В. В. Баллистика ствольных систем. Москва, 2006. 464 с.
3. Беневольский С. В. Баллистика. Пенза, 2005. 510 с.
4. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. Москва, 1962. 702 с.
5. Carlucci D. E., Jacobson S. S. Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition. CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.
6. Stanovenie priebehu odporového tlaku proti pohybu strely v hlavni zbraňového systému. Univerzita Pardubice, 2011.
7. Corner J. Theory of the Interior Ballistics of Guns. John Wiley & Sons,

1950. 443 p.

8. Медведева Н. П. Экспериментальная баллистика. Методы измерения давления. Томск, 2006. 148 с.
9. Михайлов К. В. Экспериментальная баллистика. Приборы и методы баллистических измерений. Москва, 1976. 388 с.
10. Шкворников П. Н. Экспериментальная баллистика. Москва, 1976. 392 с.
11. Королев А. А. Баллистика ракетного и ствольного оружия. Волгоград, 2010. 242 с.
12. Крюков О. М., Мудрик В. Г. Перспективи експериментального визначення балістичних елементів пострілу // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. 2013. № 1. С. 21–24.
13. Longbridge J. A. Internal ballistics. Forgotten books, 2017. 284 p.
14. Kapur J. N. A Note on the Solution of the Equations of Internal Ballistics for the General Linear Law of Burning // Proceedings of Indian National Science Academy. 1958. Vol. 24, Issue 3.
15. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва, 1974. 832 с.
16. Горохов М. С. Внутренняя баллистика ствольных систем. Москва, 1985. 160 с.
17. Ермолаев С. И. Таблицы внутренней баллистики. Ч. 1-4. Москва, 1948. 160 с.
18. Доля Г. Н., Крюков А. М., Мудрик В. Г. Дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия объектов со световозвращающей поверхностью // Прикладная радиоэлектроника. 2013. Т. 12, № 3. С. 436–441.
19. Біленко О. І. Підвищення стабільності дульної швидкості поразючих елементів кінетичної зброї несмертельної дії // Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України. 2010. № 2. С. 5–10.
20. Крюков О. М., Александров О. А. Проблеми вимірювального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. 2009. Вип. 1. С. 150–152.
21. Біленко О. І., Пащенко В. В. Вдосконалення методів рішення прямої задачі внутрішньої балістики для випадку гладкоствольної стрілецької зброї // Збірник наукових праць Академії ВВ МВС України. 2011. Вип. 2 (18). С. 48–53.