

УДК 623.442:623.522



О. М. Крюков



Р. С. Мельніков

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОСТРІЛУ З УРАХУВАННЯМ РОЗДУТТЯ КАНАЛУ СТВОЛА ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ ЯК ЗАСІБ ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОНАННЯ СЛУЖБОВО-БОЙОВИХ ЗАВДАНЬ СИЛАМИ БЕЗПЕКИ

Відзначено роль і місце експлуатаційного контролю параметрів озброєння у забезпеченні заданої ефективності виконання службово-бойових завдань силами безпеки. Показано обмежені можливості відомих методів і засобів діагностування технічного стану каналів стволів вогнепальної зброї та боєприпасів до неї. Запропоновано математичний опис роздуття каналу ствола та принципи його імплементації у рівняння внутрішньої балістики. Одержано вдосконалену математичну модель пострілу, в якій ураховано втрату енергії порохівих газів за наявності роздуття каналу ствола. За результатами практичного моделювання отримано криві тиску порохівих газів та швидкості руху снаряда для різних зразків вогнепальної зброї за наявності роздуття. Показано, що за характером кривих тиску і швидкості можна встановити місце розташування роздуття каналу ствола та ступінь прояву цього дефекту.

Ключові слова: службово-бойове завдання, канал ствола, роздуття, технічний стан, балістичний елемент пострілу, процес пострілу, моделювання.

Постановка проблеми. Ефективність виконання службово-бойових завдань силами безпеки і, зокрема, Національною гвардією України, значною мірою залежить від бойових властивостей та технічного стану озброєння.

Специфіка завдань сил безпеки, способів та умов їх виконання висуває особливі вимоги до зброї. Наприклад, для запобігання ураженню сторонніх осіб, забезпечення влучення у малорозмірні цілі тощо потребують жорсткої регламентації влучності стрільби, максимальне значення забійної дії уражаючого елемента, межі діапазону допустимих значень дульної швидкості. Вирішення завдання забезпечення заданих характеристик озброєння має базуватися на реалізації контролю його параметрів протягом часу експлуатації у підрозділах НГУ.

Проблема вдосконалення методів експлуатаційного контролю та діагностування каналів стволів (КС) і боєприпасів привертає значну увагу фахівців у галузі ствольних систем [1]. Військові формування, експлуатуючи зразки [2] озброєння радянського виробництва, а також зразки та боєприпаси, що надходять з довготривалого зберігання, мають суттєво обмежені можливості для якісного

діагностування їх технічного стану [3]. Проблемні питання виникають також у галузі виробництва, технічного обслуговування та експлуатаційної діагностики новітніх зразків озброєння і боєприпасів, у тому числі в польових умовах або безпосередньо на бойових позиціях [4]. Окремий інтерес для підприємств, які задіяні у проектуванні, випробуваннях, модернізації та експлуатації основних видів озброєння, становить можливість отримання уточнених даних про динаміку зміни технічного стану вогнепальної зброї під час її експлуатації. Ця можливість відкриває шляхи до прогнозування технічного стану конкретних зразків зброї на основі дослідження зміни їх параметрів (характеристик) у часі та за напрацюванням.

Як свідчить аналіз [5–8], певні перспективи на шляху підвищення достовірності та точності експлуатаційного контролю відкриває метод діагностування технічного стану КС та боєприпасів до ствольних систем на основі ідентифікації характеристик балістичних елементів пострілу [9], до яких належать залежності тиску $p(t)$ порохівих газів і швидкості $v(t)$ руху снаряда у функції часу протягом першого і другого періодів пострілу.

© О. М. Крюков, Р. С. Мельніков, 2020

Зміна технічного стану КС та боеприпасів приводить до відхилення умов заряджання і зміни параметрів перебігу процесу пострілу, що можна спостерігати за певними ознаками у зміні вигляду кривих $p(t)$, $v(t)$. Наприклад, роздуття КС унаслідок прориву порохових газів і втрати частини їх енергії спричиняє відповідне падіння тиску порохових газів ("провал" кривої $p(t)$ на ділянці, що відповідає місцю розташування такого дефекту).

Отже, за виглядом кривих $p(t)$, $v(t)$, а точніше, за характером і ступенем відхилень цих кривих від їх номінальної форми можна встановити вид і місце знаходження дефекту КС або вид і ступінь деградації порохового заряду.

До найбільш поширених дефектів КС належить його роздуття. Дослідження процесу пострілу з вогнепальної зброї з урахуванням роздуття потребує оцінювання втрат порохових газів унаслідок їх прориву між стінками КС та снарядом. На цей час відомі методи розв'язання рівнянь внутрішньої балістики [10, 11] передбачають отримання рішення з урахуванням втрати частини порохових газів через коефіцієнт фіктивності ϕ . Методи врахування втрати частини порохових газів на змінних за поперечним перерізом ділянках КС на сьогодні не дістали належного розвитку. Розв'язання такого завдання стане можливим лише на основі відповідного вдосконалення моделі пострілу, яка базується на чисельному розв'язанні рівнянь внутрішньої балістики. Це, своєю чергою, потребує вирішення двох завдань:

– математичне моделювання профілю поперечного перерізу КС у випадку його роздуття;

– обґрунтування методичних основ імплементації математичної моделі роздуття КС у модель пострілу.

Таким чином, розроблення вдосконаленої моделі пострілу, яка враховує ефект від втрати частини порохових газів за наявності роздуття КС, є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень публікацій. У відомих публікаціях [12, 13] розглянуті поширеність та причини появи роздуття КС як наслідку зустрічі метаного елемента з перешкодою (пісок, вода, залишки матеріалів для обслуговування тощо). У класичних публікаціях стосовно внутрішньої балістики [14, 15] моделювання процесу пострілу відбувається без урахування можливих наявних дефектів КС, тобто за ідеальних умов. У публікаціях [16, 17] дефекти КС фактично подані лише в якісних описах та схематичних графічних зображеннях

профілів пошкоджених ділянок, наприклад, як наведено на рис. 1.

Інформації стосовно математичного опису профілів ділянок КС з роздуттям у літературних джерелах немає. Із цього можна зробити висновок про те, що, незважаючи на поширення явища роздуття КС, математичний опис цього дефекту не дістав належного відображення і не враховується під час моделювання процесу пострілу.

Метою статті є обґрунтування математичного опису роздуття КС і розроблення методичних основ його імплементації у модель пострілу.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо методичний підхід до математичного моделювання роздуття КС. За основу під час дослідження роздуття й отримання його математичного опису було взято матеріальні зразки КС з реальними дефектами даного типу, які попередньо були розрізані у поздовжньому напрямі. Вони використані у процесі проведення вимірювань геометричних характеристик дефектних ділянок із подальшою візуалізацією профілю роздуття у поздовжньому перерізі КС. За наявності графічного зображення профілю роздуття КС з'являється можливість пошуку класів апроксимуючих функцій, які б найбільшою мірою відповідали формі дефекту. У подальшому вибрані класи апроксимуючих функцій порівнюються, і на основі результатів їх порівняння обґрунтовано визначається найбільш прийнятна з них функція.

Для прикладу проілюструємо можливість застосування запропонованих вище методичних основ до конкретного зразка КС. Досліджено матеріальний зразок КС калібром 7,62 мм із роздуттям, який був попередньо розрізаний у поздовжньому напрямі. На рисунку 2 подано фотографію ділянки ствола, на якій розташоване роздуття. Для наочності масштаб зображення за поперечною віссю був збільшений.

За допомогою вимірювальних приладів (штангенциркуля із цифровим відліком і ціною одиниці молодшого розряду 0,01 мм, лінійки металевої) проведено визначення дійсних розмірів роздуття. Для зразка, що розглядається, ділянка роздуття віддалена на відстань $l_{\min} = 40$ мм від початку нарізної частини КС, а довжина пошкодженої ділянки Δl становить 30 мм, збільшення $2h_m$ діаметра КС у середній частині роздуття становить 1,72 мм. Вимірювання діаметра КС проводилося з кроком 2 мм, результати були табульовані, і за цими даними побудовано графік залежності збільшення h радіуса КС від поздовжньої координати його поперечного перерізу l (див. рис. 3).

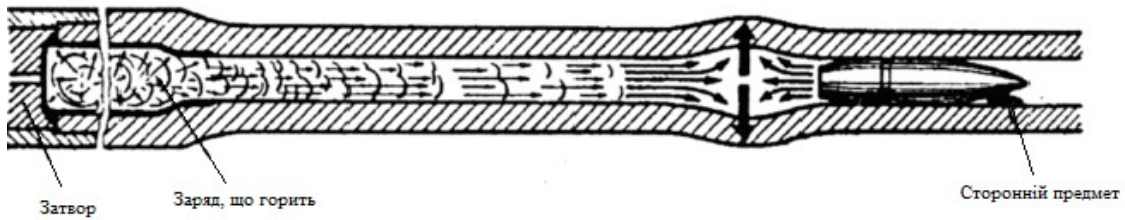


Рис. 1. Схематичне зображення профілю пошкодженого каналу ствола

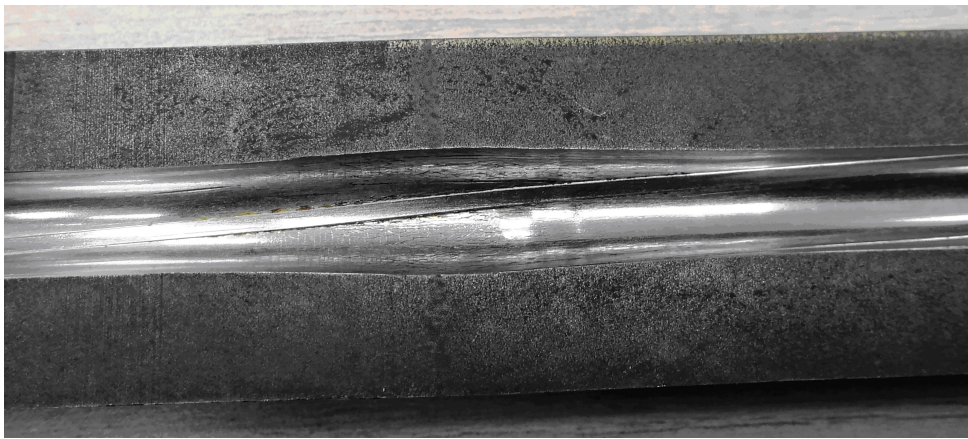


Рис. 2. Ділянка каналу ствола калібром 7,62 мм з роздуттям

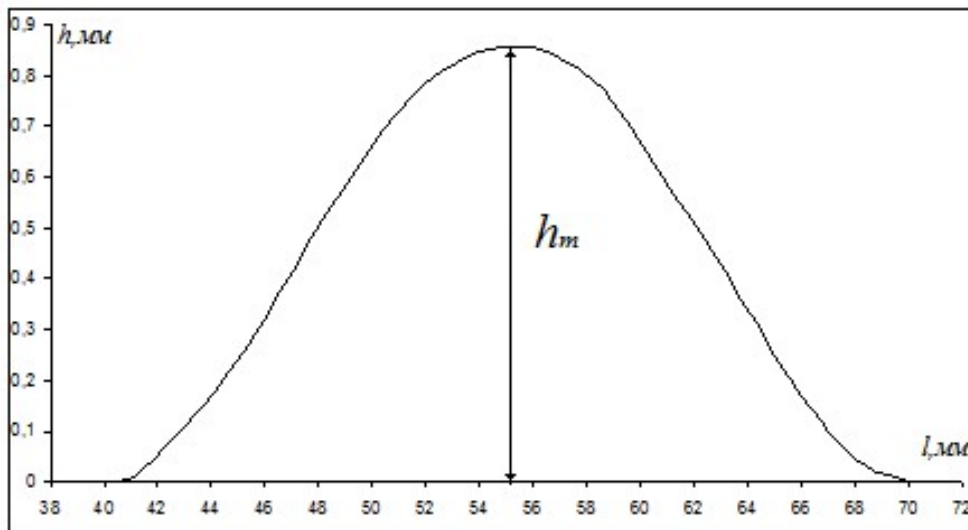


Рис. 3. Залежність збільшення h радіуса КС від поздовжньої координати його поперечного перерізу l

За виглядом кривої (рис. 3) шукатимемо апроксимуючі функції у класах тригонометричних та поліноміальних. Відзначимо, що шукана крива є симетричною відносно центра ділянки пошкодження і на її границях має похідну, що дорівнює нулю (пошкоджена ділянка плавно “примикає” до непошкодженої).

Таким чином, для апроксимації роздуття КС тригонометричною функцією доцільно

подавати пошкоджену частину КС ділянкою синусоїди

$$h = a + b \cdot \sin(c \cdot l - d), \quad (1)$$

де a , b , c , d – шукані параметри, що відображують відповідно зміщення синусоїди за віссю ординат, амплітуду, частоту та зміщення за віссю абсцис.

Шукані параметри знаходимо за виразами

$$a = \frac{h_m}{2}, \quad b = a = \frac{h_m}{2}, \quad c = \frac{2\pi}{\Delta l}, \quad (2)$$

$$d = \frac{2\pi}{\Delta l} \left(\frac{\Delta l}{4} + l_{\min} \right) = \frac{\pi}{2\Delta l} (3l_{\min} + l_{\max}),$$

де $l_{\max} = l_{\min} + \Delta l$.

За даними, що встановлені за результатами вимірювань ($h_m, l_{\min}, \Delta l$), отримуємо шукані коефіцієнти: $a = 0,429$; $b = 0,429$; $c = 0,209$; $d = 9,95$.

Таким чином, для наведеного прикладу ділянка роздуття апроксимується функцією (1):

$$h = 0,429 + 0,429 \cdot \sin(0,209l - 9,95). \quad (3)$$

Для апроксимації роздуття КС поліноміальною функцією доцільно застосувати криву четвертого порядку

$$h = a_4 \cdot l^4 + a_3 \cdot l^3 + a_2 \cdot l^2 + a_1 \cdot l + a_0, \quad (4)$$

оскільки, як зазначено вище, роздуття симетричне відносно центральної частини, а значення функції та похідних від неї в точках l_{\min} і l_{\max} дорівнює 0.

Для точок з абсцисами $l_{\min}, \frac{l_{\min} + l_{\max}}{2}$ та l_{\max} складаємо рівняння, що визначають зв'язок відповідних абсцис зі значеннями функції та похідної від неї. Отримаємо таку

систему рівнянь для шуканих коефіцієнтів полінома:

$$\begin{cases} a_4 l_{\min}^4 + a_3 l_{\min}^3 + a_2 l_{\min}^2 + a_1 l_{\min} + a_0 = 0; \\ a_4 l_{\max}^4 + a_3 l_{\max}^3 + a_2 l_{\max}^2 + a_1 l_{\max} + a_0 = 0; \\ a_4 l_{2h_m}^4 + a_3 l_{2h_m}^3 + a_2 l_{2h_m}^2 + a_1 l_{2h_m} + a_0 = 0,858; \\ 4a_4 l_{\min}^3 + 3a_3 l_{\min}^2 + 2a_2 l_{\min} + a_1 = 0; \\ 4a_4 l_{\max}^3 + 3a_3 l_{\max}^2 + 2a_2 l_{\max} + a_1 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

За даними, що встановлені за результатами вимірювань, отримуємо рішення системи (5):

$$a_4 = 1,70 \cdot 10^{-5}; \quad a_3 = -3,73 \cdot 10^{-3}; \quad a_2 = 0,30; \\ a_1 = -10,4; \quad a_0 = 1,33 \cdot 10^2.$$

Підставимо ці коефіцієнти до виразу (4) і дістанемо аналітичний опис ділянки роздуття:

$$h = 1,70 \cdot 10^{-5} \cdot l^4 - 3,73 \cdot 10^{-3} \cdot l^3 + 0,30 \cdot l^2 - 10,4 \cdot l + 1,33 \cdot 10^2. \quad (6)$$

На рисунку 4 наведені суміщені графіки функцій (3), (6) та крива, одержана за результатами вимірювань.

Як видно з рис. 4, профілі роздуття КС, апроксимовані поліномом четвертого порядку та тригонометричною функцією, є рівною мірою близькими до вихідної кривої. Із цього випливає, що під час моделювання процесу пострілу для аналітичного опису роздуття ділянки КС можливо використання будь-якої із цих функцій, і перевагу можна віддати тій формі опису, яка дасть змогу спростити подальші математичні перетворення (наприклад інтегрування).

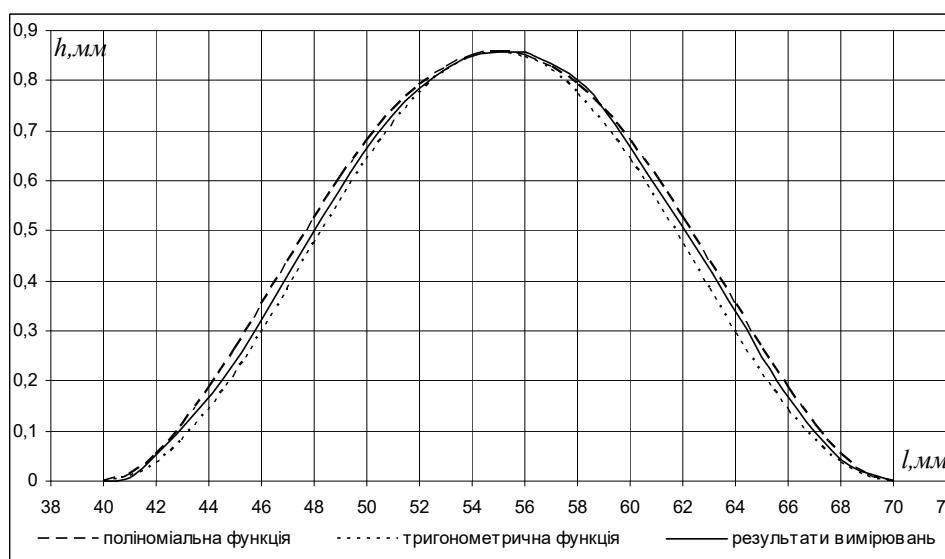


Рис. 4. Результати апроксимації ділянки роздуття каналу ствола тригонометричною та поліноміальною функціями

Збільшення діаметра КС під час роздуття супроводжується збільшенням площі його поперечного перерізу, унаслідок чого підсилюється ефект від явища прориву порохових газів між поверхнею КС та боковою поверхнею снаряда. Під час прориву порохових газів втрачається певна їх частина, яка була б здатна виконати корисну роботу, і тиск у заснарядному (закульному) просторі зменшується.

З урахуванням цього під час моделювання процесу пострілу ефект від прориву порохових газів може бути врахований коригуванням значення $\psi(t)$ (відносної частини пороху, що згорів) шляхом введення у різницеву модель пострілу [11] відповідного множника – коефіцієнта втрати маси порохових газів k_u при змінній ψ у виразі для обчислення тиску p :

$$\psi^* = k_u \psi, \quad (7)$$

де ψ^* – скориговане значення відносної частини пороху, що згорів.

При цьому слід урахувувати такі чинники:

– коефіцієнт втрати маси порохових газів дорівнює 1 за відсутності їх прориву (тобто значення ψ фактично не коригується) і приймає додатні значення, менші 1, за наявності прориву порохових газів (наприклад, у разі втрати 10 % маси порохових газів k_u дорівнюватиме 0,9);

– у міру збільшення втрати порохових газів унаслідок їх прориву коефіцієнт втрати маси порохових газів відповідно поступово зменшується, і після завершення проходження снарядом дефектної ділянки КС подальше його зменшення припиняється (k_u залишається на досягнутому рівні);

– коефіцієнт втрати маси порохових газів залежить від ступеня викривлення форми поверхні КС унаслідок дефекту: чим більшим є

приріст площі поперечного перерізу КС, тим більшою є втрата маси порохових газів на даній елементарній ділянці руху снаряда;

– коефіцієнт втрати маси порохових газів залежить від значення тиску p порохових газів: чим більшим є тиск, тим більшою є втрата маси порохових газів і сильніше проявляється відповідний ефект, і тим меншим стає значення k_u на даній елементарній ділянці руху снаряда.

Ці положення доцільно покласти в основу синтезованих виразів для k_u , за допомогою яких моделюється вплив дефекту КС на балістичні елементи пострілу.

Синтезуємо вираз для коефіцієнта втрати порохових газів k_u , спираючись на математичну модель роздуття КС, отриману вище.

За наявності роздуття коефіцієнт втрати порохових газів матиме такий вигляд:

$$k_u = 1 - \alpha p \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \Delta S(l) dl, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт, що залежить від параметрів зразка зброї та боєприпаса;

p – миттєве значення тиску порохових газів;

$\Delta S(l)$ – збільшення площі поперечного

перерізу КС унаслідок роздуття.

Позначимо номінальне значення радіуса КС як R_0 . Тоді радіус $R(l)$ КС на ділянці, де є наявним роздуття (рис. 5), визначатиметься виразом

$$R(l) = R_0 + h(l). \quad (9)$$

Збільшення площі поперечного перерізу КС унаслідок роздуття визначатимемо згідно з виразом

$$\Delta S = S(l) - S_0, \quad (10)$$

де $S(l)$ – площа КС за наявності дефекту;

S_0 – номінальна площа КС.

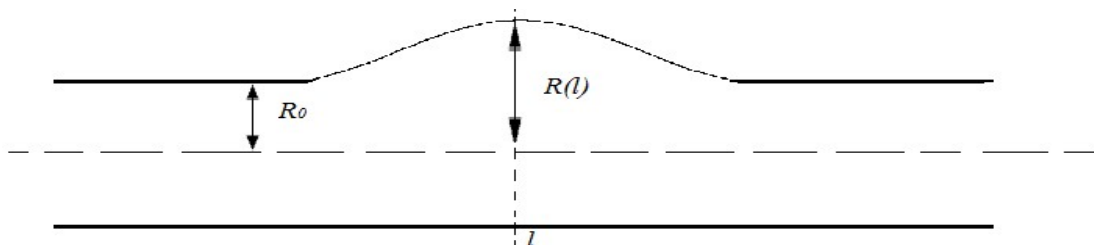


Рис. 5. Ділянка КС з роздуттям

Виконаємо підстановку виразу (8) до (9) й отримаємо вираз для ΔS :

$$\Delta S = \pi R^2(l) - \pi R_0^2 = \pi R_0^2 + 2\pi R_0 h(l) + \pi h^2(l) - \pi R_0^2 = \pi(2R_0 h(l) + h^2(l)). \quad (11)$$

Вважаючи, що $2R_0h(l) \gg h^2(l)$, остаточно дістанемо:

$$\Delta S = 2\pi R_0 h(l). \quad (12)$$

Підставивши вираз (12) до виразу (13), подамо вираз для k_u у вигляді

$$k_u = 1 - r p \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} h(l) dl, \quad (13)$$

де $r = 2\pi\alpha R_0$ – коефіцієнт, що визначається параметрами зразка зброї та боєприпаса.

Таким чином, у моделі пострілу буде використовуватися вираз для визначення скоригованого значення ψ^* у такому вигляді:

$$\psi^* = \psi \left(1 - r p \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} h(l) dl \right). \quad (14)$$

Визначення коефіцієнтів r (або α) для практичного застосування під час моделювання пострілу можливо здійснити виходячи з таких положень.

1. Із зразка вогнепальної зброї з роздуттям виконується постріл і шляхом вимірювання визначається дульна швидкість $v_{d.e.}$

2. Визначають параметри h_m , l_{\min} , Δl профілю КС на ділянці роздуття, отримують апроксимуючу криву за виразами (1) або (4).

3. Згідно з виразом (14) здійснюється підстановка скоригованого значення ψ^* відносної частини пороху, що згорів, у модель пострілу при довільно вибраному значенні $r = r_1$.

4. Проводиться чисельне розв'язання рівнянь внутрішньої балістики, тобто моделювання пострілу з урахуванням наявності роздуття з відомими параметрами. За результатами моделювання пострілу визначають розрахункове значення дульної швидкості $v_{d.p.}$

5. Порівнюють значення $v_{d.e.}$ та $v_{d.p.}$ Якщо $v_e < v_p$, то перед наступним моделюванням пострілу значення r підлягає коригуванню у бік зменшення. Якщо ж $v_e > v_p$, то перед наступним моделюванням пострілу значення r підлягає коригуванню у бік збільшення.

6. Повторюють операції 4 та 5, доки значення v_e, v_p не наблизяться одне до одного:

$v_e = v_p \pm \varepsilon$ (тут ε – припустима розбіжність

між швидкостями v_e, v_p , за якої вони вважатимуться рівними). Значення коефіцієнта $r = r_n$, за якого швидкості v_e, v_p зрівнялися, вважається таким, що відповідає параметрам даного зразка зброї.

7. Встановлюють відношення f_{zp} між характеристикою h_m роздуття та значенням r_n для даного зразка вогнепальної зброї:

$$f_{zp} = \frac{r_n}{h_m}. \quad (15)$$

8. За необхідності провести моделювання пострілу із такого самого зразка зброї, але за інших характеристик профілю роздуття КС (h'_m , l'_{\min} , $\Delta l'$) потрібно попередньо визначити коефіцієнт r' для підстановки його у вираз (14):

$$r' = f_{zp} h'_m. \quad (16)$$

Зазначимо, що у разі практичного застосування в моделі пострілу виразу (14) і пов'язаному із цим інтегруванням $h(l)$ не виникає ускладнень, оскільки під час моделювання та апроксимації профілю дефектної ділянки КС використовується тригонометрична (синусоїдна) функція або поліноміальна функція досить невисокого порядку.

Таким чином, удосконалену математичну модель пострілу, що являє собою сукупність результатів моделювання профілю поверхні КС на ділянці роздуття та виразів (1)–(16), згідно з якими модель роздуття імплементується у рівняння внутрішньої балістики, подано у кінцево-різницевої формі.

На основі застосування вдосконаленої моделі пострілу проведено моделювання процесу пострілу для різних зразків зброї за наявності роздуття КС на різних його ділянках. Приклади результатів такого моделювання наведено нижче на рис. 6–13 у вигляді графіків залежностей тиску $p(t)$ порохових газів і швидкості $v(t)$ руху снаряда в КС. На цих рисунках виділені криві, які відповідають умовним незначному та значному ступеням роздуття КС. Зауважимо, що умовний ступінь дефекту для певного зразка озброєння визначається розміром збільшення радіуса КС у центрі ділянки пошкодження та протяжністю останньої.

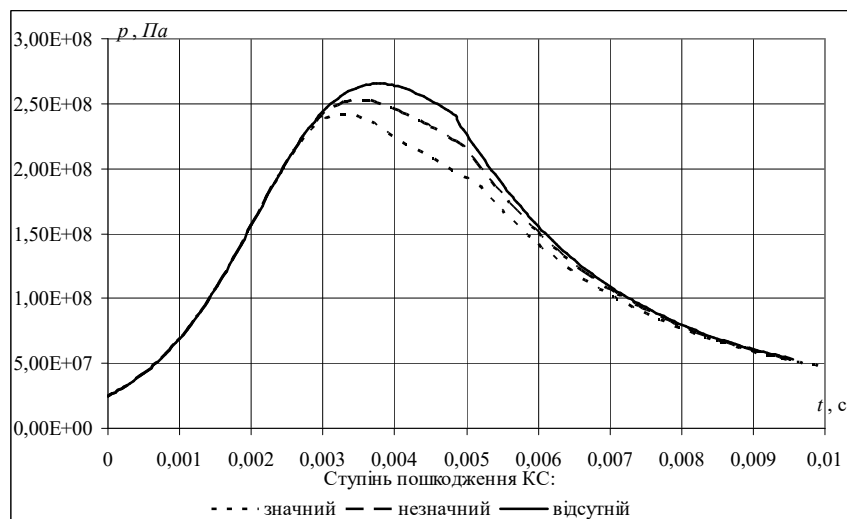


Рис. 6. Графіки залежностей $p(t)$ для 122 мм гаубиці Д-30 та випадку розташування роздуття у межах казенної частини ствола

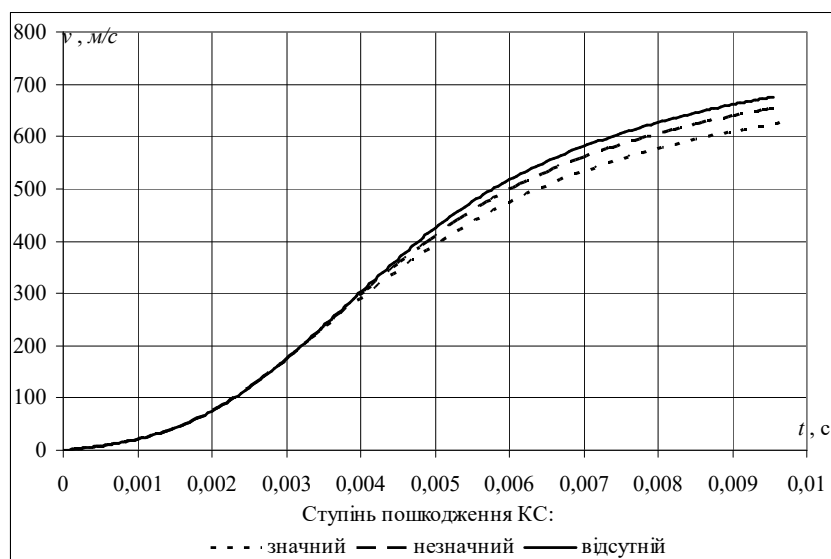


Рис. 7. Графіки залежностей $v(t)$ для 122 мм гаубиці Д-30 та випадку розташування роздуття у межах казенної частини ствола

На рисунку 8 для зручності аналізу у збільшеному масштабі зображені кінцеві частини графіків $p(t)$, наведених на рис. 6.

Як свідчить аналіз графіків (рис. 6, 7, 8), роздуття у межах казенної частини КС приводить до падіння (“провалу”) тиску порохових газів на ділянці очікуваного його максимуму, унаслідок чого швидкість горіння пороху уповільнюється, а тривалість пострілу і, зокрема, його першого періоду збільшується. З точки зору забезпечення заданих балістичних характеристик зброї значне роздуття є

критичним, оскільки падіння дульної швидкості перевищує 5 % від його номінального значення. Незначне роздуття не є критичним, оскільки падіння дульної швидкості не перевищує цієї межі.

Як за незначного, так і за значного ступеня дефекту наявність роздуття добре ідентифікується за виглядом графіків $p(t)$. Графіки залежності $v(t)$ також дозволяють ідентифікувати роздуття КС у межах казенної частини (спостерігається “завал” кривої $v(t)$ від

початку ділянки роздуття), але є дещо менш наочними та інформативними, ніж графіки $p(t)$.

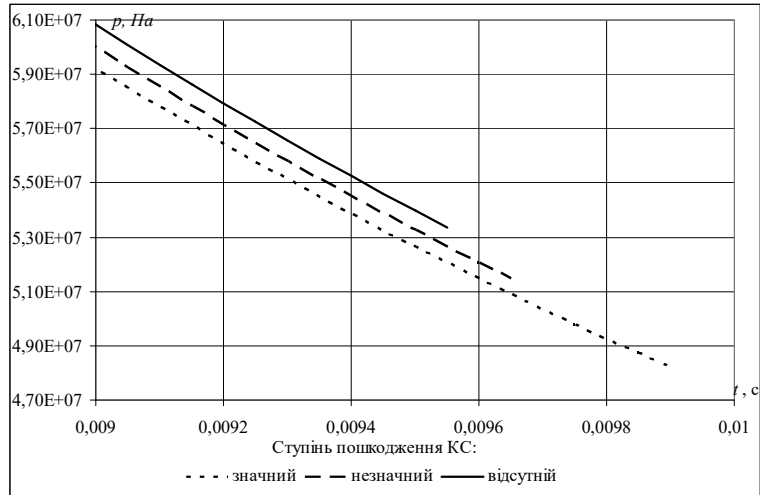


Рис. 8. Кінцеві частини залежностей $p(t)$ для 122 мм гаубиці Д-30

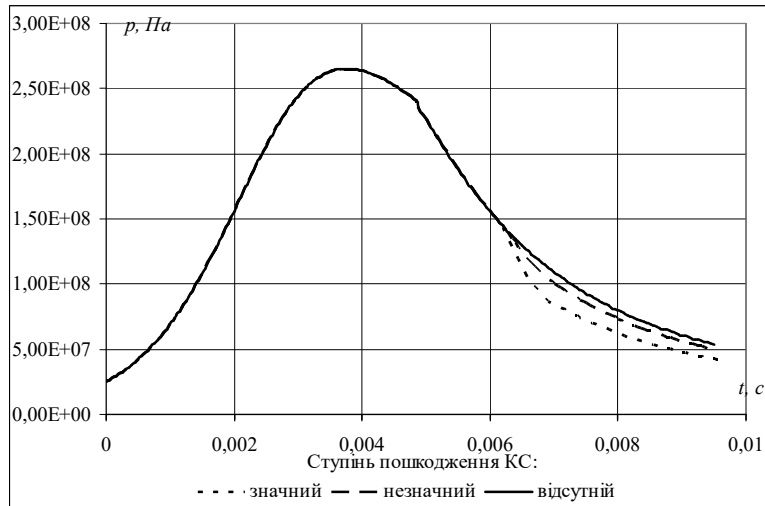


Рис. 9. Залежності $p(t)$ для ділянки роздуття, розташованої в межах середньої частини ствола 122 мм гаубиці Д-30

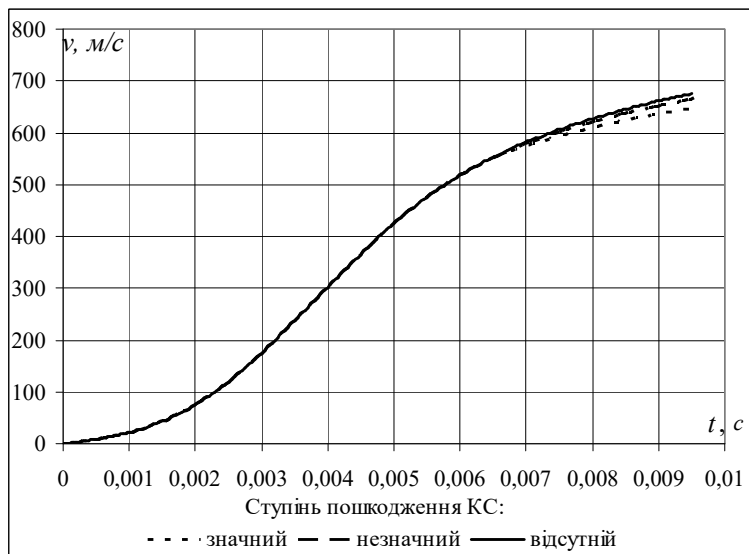


Рис. 10. Залежності $v(t)$ для ділянки роздуття, розташованої в межах середньої частини ствола 122 мм гаубиці Д-30

На рисунку 11 для зручності аналізу у збільшеному масштабі зображені кінцеві частини графіків $p(t)$, наведених на рис. 9.

Роздуття в межах середньої частини КС (рис. 9, 10, 11) також спричиняє падіння тиску порохових газів на відповідній ділянці. Однак вплив цього явища на рух снаряда є значно меншим, оскільки до моменту проходження ним ділянки роздуття порохові гази вже встигають здійснити переважну частину корисної роботи.

Так, навіть за значного роздуття цей дефект є не критичним, оскільки падіння дульної швидкості не перевищує 2–3 % від номінального значення, утім воно може бути ідентифіковане за виглядом графіка $p(t)$.

Графіки залежності $v(t)$ є значно менш наочними й інформативними, ніж графіки $p(t)$, і ідентифікація роздуття за виглядом цих залежностей може викликати труднощі.

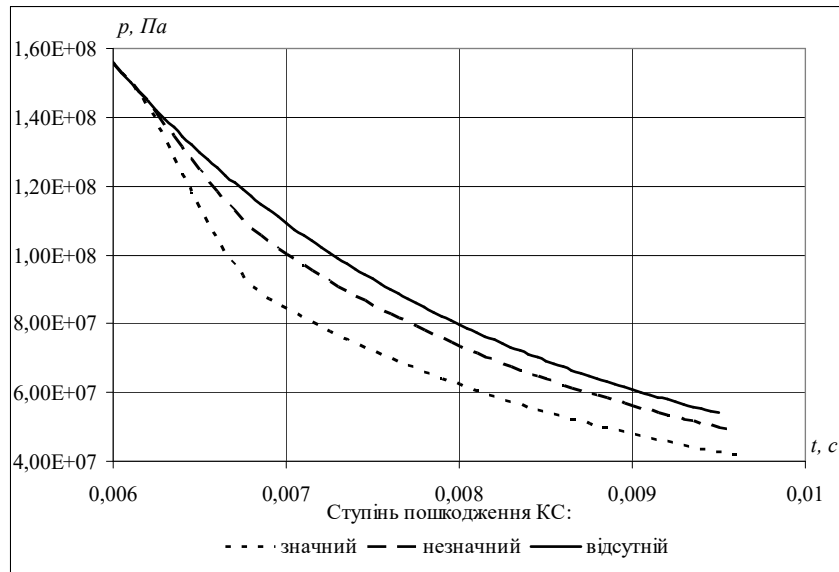


Рис. 11. Кінцеві частини залежностей $p(t)$ для ділянки роздуття, розташованої у межах середньої частини ствола 122 мм гаубиці Д-30

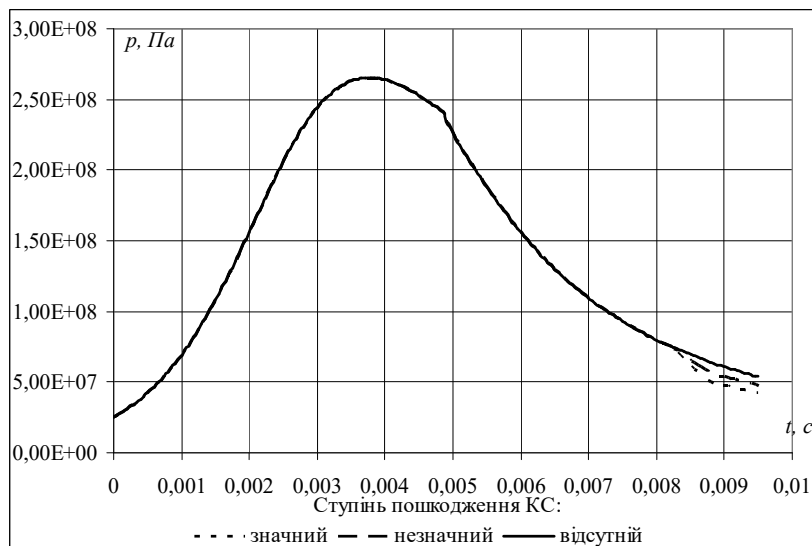


Рис. 12. Залежності $p(t)$ для роздуття, розташованого у межах кінцевої частини ствола 122 мм гаубиці Д-30

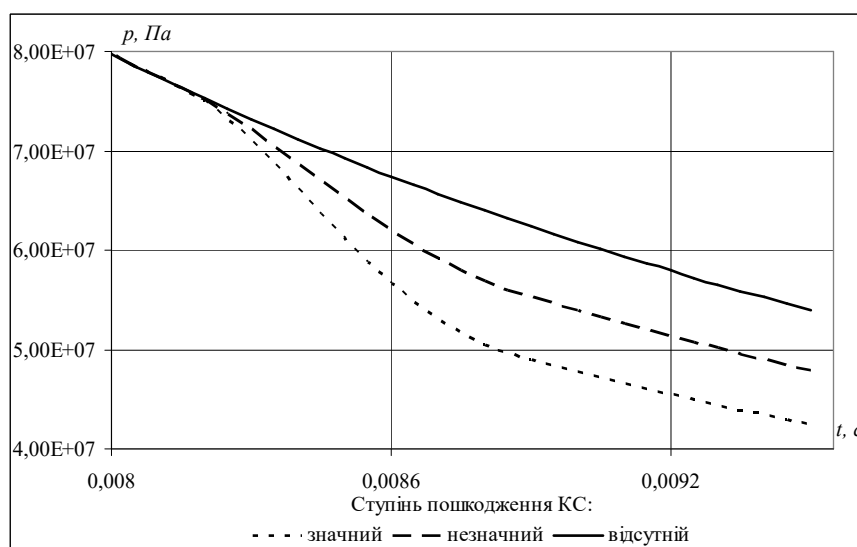


Рис. 13. Збільшені ділянки залежностей $p(t)$ для роздуття, розташованого у межах кінцевої частини ствола 122 мм гаубиці Д-30

На рисунку 13 для зручності аналізу у збільшеному масштабі зображені кінцеві частини графіків $p(t)$, наведених на рис. 12.

Графіки залежностей $v(t)$ для роздуття, розташованого у межах кінцевої частини ствола 122 мм гаубиці Д-30, не наведені, оскільки розбіжність кривих, отриманих для випадку відсутності дефекту та для випадків незначного і значного ступенів дефекту, є нехтовно малою.

Аналіз рис. 12 і 13 свідчить, що роздуття у межах кінцевої частини КС приводить до незначного падіння тиску порохових газів на відповідній ділянці. Вплив цього явища на закон руху снаряда всередині КС є невеликим, оскільки навіть за значного роздуття зменшення дульної швидкості від номінального значення не перевищує кількох десятків процента, тобто є сумірним з помилкою обчислень та природним розкидом умов заряджання. За виглядом графіка $p(t)$ впевнено можливо ідентифікувати лише значне роздуття. Графіки залежності $v(t)$ в цьому випадку є неінформативними, а ідентифікація роздуття у межах дульної частини КС за виглядом цих залежностей неможлива.

Таким чином, вплив роздуття у дульній частині КС на балістичні елементи пострілу і відповідні їм криві $p(t)$ та $v(t)$ є незначним.

Зауважимо, що мала значущість роздуття, розташованого у межах кінцевої частини КС, відзначається лише з точки зору внутрішньої

балістики та впливу на динаміку розгону снаряда, оскільки до моменту проходження ним ділянки роздуття порохові газі вже встигають практично повністю вичерпати запас енергії та здійснити всю корисну роботу. Негативний ефект від роздуття КС поблизу дульного зрізу може полягати лише у підвищеному розсіюванні траєкторій руху снаряда і в межах цієї статті не розглядається.

Висновки

Ефективність виконання службово-бойових завдань силами безпеки значною мірою залежить від якості експлуатаційного контролю параметрів озброєння. Певні перспективи до підвищення достовірності експлуатаційного контролю технічного стану КС відкриваються завдяки застосуванню методу діагностування технічного стану КС на основі ідентифікації характеристик балістичних елементів пострілу. Утім, практична реалізація цього методу потребує вдосконалення моделі пострілу з вогнепальної зброї з метою врахування, зокрема, такого типового дефекту КС, як роздуття.

Розроблено методичний підхід до математичного моделювання роздуття, який передбачає апроксимацію профілю роздуття у поздовжньому перерізі КС тригонометричною або поліноміальною функцією.

Запропоновано для врахування ефекту від прориву порохових газів унаслідок роздуття при чисельному моделюванні процесу пострілу

коригувати значення відносної частини пороху, що згорів, шляхом введення у різницеву модель пострілу коефіцієнта втрати маси порохових газів. Отримано вираз для визначення скоригованого значення відносної частини пороху, що згорів.

Одержану вдосконалену математичну модель пострілу, яка являє собою сукупність результатів моделювання профілю поверхні КС на ділянці роздуття та виразів, згідно з якими модель роздуття імплементується у рівняння внутрішньої балістики, подано у кінцево-різницевої формі.

На основі застосування вдосконаленої математичної моделі пострілу проведено чисельне моделювання процесу пострілу для різних зразків зброї за наявності роздуття КС на різних його ділянках. Виконано аналіз графіків для балістичних елементів пострілу – тиску порохових газів та швидкості руху снаряда.

Установлено, що наявність роздуття поблизу казенної частини ствола добре ідентифікується за виглядом графіків тиску та швидкості для різних ступенів цього дефекту.

Роздуття у межах середньої частини КС добре ідентифікується за виглядом графіка тиску, але графіки швидкості є значно менш наочними та інформативними, і ідентифікація роздуття за виглядом цих залежностей може викликати труднощі.

У разі розташування роздуття поблизу дульної частини КС за виглядом графіка тиску впевнено можливо ідентифікувати лише значне роздуття. Графіки швидкості в цьому випадку є неінформативними, а ідентифікація роздуття за виглядом цих залежностей неможлива.

Перелік джерел посилання

1. Основы устройства и конструкция орудий и боеприпасов наземной артиллерии. URL: <https://studfile.net/preview/5082433/page:40> (дата звернення: 04.05.2020).

2. Сучасна та модернізована зброя і техніка Збройних Сил України. URL: http://loippo.lviv.ua/files/2017/zbroyi_ZSU.pdf (дата звернення: 04.05.2020).

3. Крюков О. М., Александров О. А. Шляхи підвищення точності моделювання внутрішньобалістичних процесів. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ*. Харків : Акад. ВВ МВС України, 2009. Вип. 1. С. 11–14.

4. Матеріали VI Міжнародної НПК МО ЦНДІ ОБТ ЗСУ 9-12.10.2018. URL:

<https://mon.gov.ua/storage/app/media/innovatsii-transfer-tehnologiy/publikatsiy/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-tezi-dopovidey.pdf> (дата звернення: 04.05.2020).

5. Бурлов В. В. Баллистика ствольных систем. Москва, 2006. 464 с.

6. Беневольский С. В. Баллистика. Пенза, 2005. 510 с.

7. Carlucci D. E., Jacobson S. S. *Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.

8. Stanovenie priebehu odporového tlaku proti pohybu strely v hlavni zbraňového systému. Univerzita Pardubice, 2011.

9. Крюков О. М., Мельников Р. С., Музичук В. А. Метод діагностування технічного стану каналів стволів та боеприпасів на основі ідентифікації характеристик балістичних елементів пострілу. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків : НАНГУ, 2018. Вип. 2. С. 5–12.

10. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. Москва, 1962. 702 с.

11. Kriukov O. M., Melnikov R. S., Bilenko O. I., Zozulia A. V. Modeling of the process of the shot based on the numerical solution of the equations of internal ballistics. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5 (97).P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/17294061.2019.155357>.

12. Потапов А. А. Искусство снайпера. Москва : Фаир-Пресс, 2005. 404 с.

13. Прочность и живучесть стволов. URL: https://studref.com/656516/pravo/prochnost_zhivuchest_stvolov (дата звернення: 04.05.2020).

14. Горохов М. С. Внутренняя баллистика ствольных систем. Москва : Изд-во ЦНИИ, 1985. 160 с.

15. Основы устройства и эксплуатации стрелкового оружия и гранатометов. URL: <http://www.nastavleniya.ru/OO/oos.html> (дата обращения: 04.05.2020).

16. Основы внутренней и внешней баллистики. Явление внутренней и внешней баллистики и механизм образования следов на преграде. URL: <https://otzivserdce.ru/home-and-work/osnovy-vnutrennei-i-vneshnei-ballistiki-yavlenie-vnutrennei-i/> (дата обращения: 04.05.2020).

17. Орлов Б. В., Ларман Э. К., Маликов В. Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. Москва : Машиностроение, 1976. 433 с.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2020 р.

УДК 623.442:623.522

А. М. Крюков, Р. С. Мельников

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСТРЕЛА С УЧЕТОМ РАЗДУТИЯ КАНАЛА СТВОЛА ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ КАК СРЕДСТВО ВЛИЯНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ СЛУЖЕБНО-БОЕВЫХ ЗАДАЧ СИЛАМИ БЕЗОПАСНОСТИ

Показаны ограниченные возможности известных методов и средств диагностирования технического состояния каналов стволов огнестрельного оружия и боеприпасов к нему. Предложены математическое описание раздутия канала ствола и принципы его имплементации в уравнение внутренней баллистики. Получена усовершенствованная математическая модель выстрела, в которой учтены потери энергии пороховых газов при наличии раздутия канала ствола. По результатам практического моделирования получены кривые давления пороховых газов и скорости движения снаряда для различных образцов огнестрельного оружия при наличии раздутия. Показано, что по характеру кривых давления и скорости можно установить местоположение раздутия канала ствола и степень проявления этого дефекта.

Ключевые слова: служебно-боевая задача, канал ствола, раздутие, техническое состояние, баллистический элемент выстрела, процесс выстрела, моделирование.

UDC 623.442:623.522

O. Kriukov, R. Melnikov

MATHEMATICAL MODELING OF THE SHOT PROCESS TAKING INTO ACCOUNT THE BARREL BULGE OF A FIREARM AS A MEANS OF INFLUENCING THE EFFICIENCY OF PERFORMANCE OF SERVICE AND COMBAT MISSIONS OF SECURITY FORCES

The role and place of operational control of armament parameters in ensuring the given efficiency of performance of service and combat tasks by security forces are noted.

The barrel bulge diagnosing method based on the analysis of experimentally received ballistic elements of a shot is considered. To implement this method, you need to have reference curves for ballistic elements of shot – the pressure of the powder gases and the velocity of the projectile – which correspond to different degrees of manifestation of the barrel bulge. Reference curves can be obtained by simulating the firing process numerically.

Simulation of the firing process by numerical method, taking into account the bulge, requires considering the loss of powder gases due to their breakthrough between the walls of the barrel and the projectile. Methods for accounting the loss of some of the powder gases in variable cross-section of the barrel were not developed at this time. Thus, improving the shot model taking into account the loss of powder gases due to bulge is an urgent task.

The purpose of this work is to develop the mathematical description of the barrel bulge and obtain the mathematical basis for its accounting in the shot model.

The mathematical description of the bulge by means of polynomial and trigonometric functions is given. The fundamentals of the bulge accounting in the shot model are considered. In particular, when modeling the firing process, the effect of the breakthrough of powder gases should be taken into account by introducing into the difference model of the shot a special factor – the coefficient of loss of mass of powder gases.

The curves for the pressure of powder gases and the velocity of the projectile for various samples of firearms are obtained by numerical modeling. The presence of the bulge can be well identified by the appearance of graphs of pressure and velocity for different degrees of this defect.

The results of the work prove the possibility of barrel bulge detection by the curve analysis; moreover the location and the degree of manifestation of this defect can be determined.

Keywords: *service and combat mission, barrel channel, inflation, technical condition, ballistic element of the shot, the process of the shot, modeling.*

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

<https://orcid.org/0000-0003-4194-6081>

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

<https://orcid.org/0000-0003-3517-2040>