



О. М. Крюков



Р. С. Мельніков

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОСТРІЛУ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СТИРАННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ КАНАЛУ СТВОЛА ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЕРЖАВНОЇ БЕЗПЕКИ

Розглянуто перспективний метод експлуатаційного діагностування технічного стану каналів стволів вогнепальної зброї, показано значущість його реалізації під час виконання завдань силами безпеки. Отримано математичний опис профілю каналу ствола за наявності його часткового стирання. Запропоновано вдосконалену математичну модель пострілу, в якій враховується втрата частки енергії порохівих газів за наявності стирання каналу ствола. Виконано чисельне моделювання процесу пострілу, отримано криві тиску порохівих газів та швидкості руху снаряда для різних зразків вогнепальної зброї за наявності стирання каналу ствола. Доведено, що місце розташування ділянки стирання каналу ствола та ступінь прояву цього дефекту можуть бути встановлені за характером кривих тиску та швидкості.

Ключові слова: службово-бойове завдання, канал ствола, казенна частина, дульна частина, стирання, технічний стан, балістичний елемент пострілу, процес пострілу, моделювання.

Постановка проблеми. Проблемні питання, що виникають перед силами безпеки, зокрема Національною гвардією України, під час виконання завдань забезпечення державної безпеки, а також у процесі виробництва і технічного обслуговування вогнепальної зброї, привертають увагу фахівців до методів контролю та діагностування каналів стволів (КС) і боеприпасів [1, 2, 3]. Специфіка завдань сил безпеки, способів та умов їх виконання висуває особливі вимоги до зброї. Особливо важливими ці питання стають за необхідності проведення такого контролю у польових умовах або безпосередньо на бойових позиціях [4]. Крім того, певний інтерес становить можливість отримання уточнених даних про динаміку зміни технічного стану вогнепальної зброї під час її експлуатації. Це відкриває шляхи до прогнозування технічного стану конкретних зразків зброї на основі дослідження зміни їх параметрів (характеристик) у часі та за напрацюванням.

Як свідчить аналіз праць [5–8], певні перспективи на шляху підвищення достовірності та точності експлуатаційного контролю відкриває метод діагностування технічного стану КС та боеприпасів 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. 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, стирання КС супроводжується проривом частки порохівих газів і втратою частини їх енергії, що призводить до відповідного падіння тиску порохівих газів (“провал” кривої $p(t)$ на ділянці, що відповідає місцю розташування такого дефекту).

Отже, за характером та ступенем відхилень кривих $p(t)$, $v(t)$ від їх номінальної форми можна встановити факт стирання КС, ступінь та місце розташування такого дефекту. Однак дослідження процесу пострілу з вогнепальної зброї з урахуванням стирання потребує оцінювання втрат порохівих газів унаслідок їх прориву між стінками КС та снарядом. Наразі відомі методи розв’язання рівнянь внутрішньої балістики [10, 11, 12] передбачають отримання їх рішень з урахуванням втрати частини порохівих газів через коефіцієнт фіктивності ϕ . Методи врахування втрати

частини порохових газів на змінних за поперечним перетином ділянках КС на сьогодні не дістали належного розвитку. Вирішення такого завдання стане можливим лише на основі відповідного вдосконалення моделі пострілу, яка базується на чисельному розв'язанні рівнянь внутрішньої балістики. Це, в свою чергу, потребує провести математичне моделювання профілю поперечного перетину КС у випадку його стирання, а також розробити методичні основи імплементації моделі стирання КС у математичну модель пострілу.

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У відомих працях [13, 14] розглянуто поширеність та причини появи стирання КС як наслідок дії на метал таких чинників: теплового впливу порохових газів, хімічної дії порохових газів, ерозійної дії порохових газів, механічної дії провідних частин снаряда на внутрішню поверхню КС. У класичних публікаціях стосовно внутрішньої балістики [15, 16] моделювання процесу пострілу відбувається без урахування можливих наявних дефектів КС, тобто за ідеальних умов. У працях [17, 18] дефекти КС фактично подані лише в якісних описах та схематичних графічних зображеннях профілів пошкоджених ділянок, наприклад, як наведено на рис. 1.

Інформація стосовно математичного опису профілів КС зі стиранням у літературних джерелах відсутня. З цього можна зробити висновок, що, незважаючи на поширення явища стирання КС, математичний опис цього дефекту не дістав належного розвитку і не враховується під час моделювання процесу пострілу.

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

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

Розглянемо приклад застосування запропонованих вище методичних основ до конкретного зразка КС. Досліджено матеріальний зразок КС калібром 7,62 мм зі стиранням, який був попередньо розрізаний у поздовжньому напрямі. На рисунках 2 і 3 наведено фотографії ствола з наявним стиранням.

За допомогою вимірювальних приладів (штангенциркуля з цифровим відліком і ціною одиниці молодшого розряду 0,01 мм, лінійки металевої) проведено визначення дійсних розмірів КС на різних його ділянках. Для зразка, що розглядається, довжина КС дорівнює 734 мм. Вимірювання діаметра КС проводилося з кроком 1 мм на ділянці 0–170 мм, з кроком 10 мм на ділянці 170–670 мм та з кроком 1 мм на ділянці 670–734 мм. Результати були табульовані, і за цими даними побудовано графіки залежностей збільшення h радіуса КС від поздовжньої координати його поперекового перерізу l для казенної (див. рис. 4) та дульної частин КС (див. рис. 5).

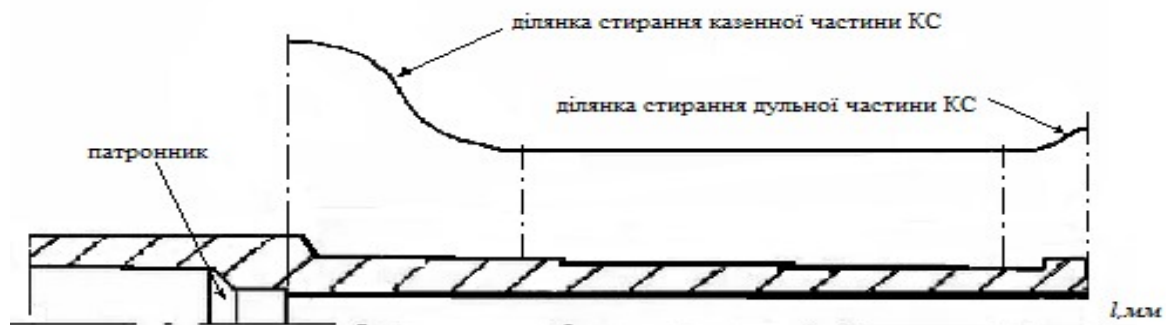


Рисунок 1 – Приклад загального вигляду профілю каналу ствола зі стиранням у поздовжньому перерізі

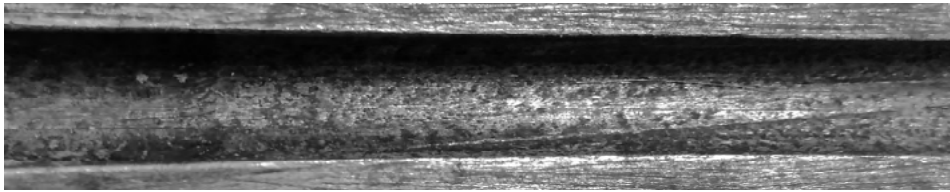


Рисунок 2 – Ділянка казенної частини каналу ствола калібром 7,62 мм, яка пошкоджена внаслідок стирання

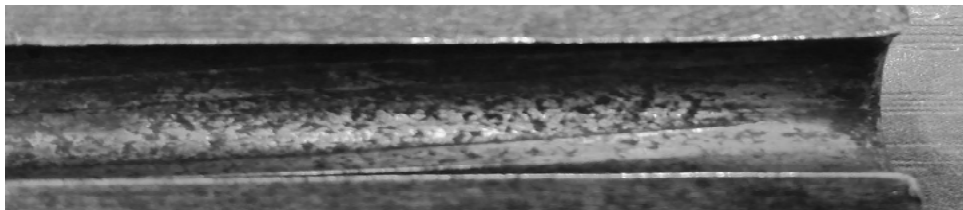


Рисунок 3 – Ділянка дульної частини каналу ствола калібром 7,62 мм, яка пошкоджена внаслідок стирання

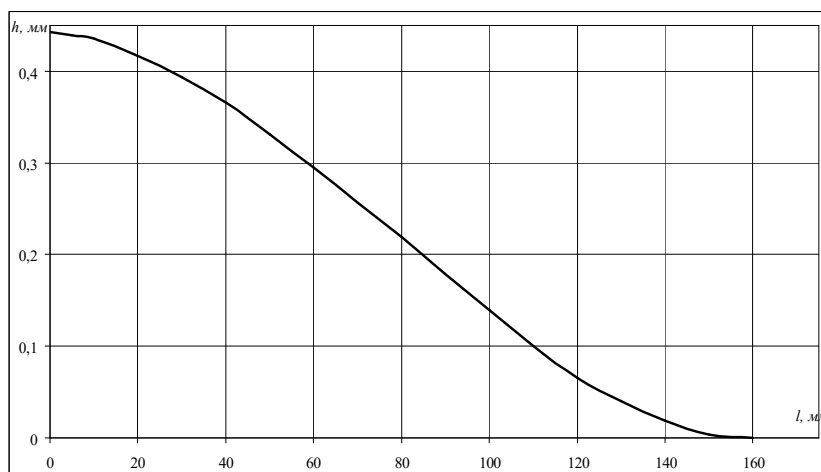


Рисунок 4 – Залежність збільшення h радіуса каналу ствола від поздовжньої координати його поперекового перерізу l у казенній частині

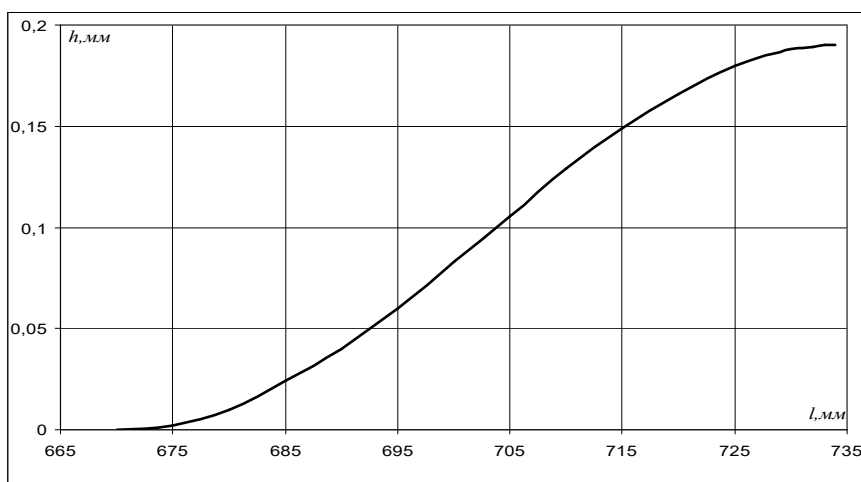


Рисунок 5 – Залежність збільшення h радіуса каналу ствола від поздовжньої координати його поперекового перерізу l у дульній частині

Значимо, що стирання КС у середній його частині якщо і проявляється, то має рівномірний характер по всій довжині і є досить незначним (фактично порівняним із похибкою вимірювання). Ураховувати стирання на цій ділянці можливо шляхом зміни коефіцієнта фіктивності. Можна припустити, що істотне стирання у середній частині КС настане тоді, коли стирання у казенній та дульній його частинах набуде розмірів, які будуть взагалі неприйнятними для подальшого використання зразка зброї. Тому графік стирання КС у середній його частині далі не розглядається. З урахуванням цього розгляду підлягатимуть залежності для випадків стирання КС у казенній та дульній його частинах.

За виглядом кривої (див. рис. 4) шукатимемо апроксимуючі функції у класах тригонометричних та поліноміальних функцій. Зауважимо, що шукані криві мають змінні кути нахилу та похідні, що відмінні від нуля. Проте в початковій та кінцевій точках (l_{\min} , l_{\max}) похідна дорівнює нулю, оскільки пошкоджена ділянка плавно “примикає” до непошкодженої частини КС.

Таким чином, для апроксимації стирання казенної частини 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 відображають відповідно зміщення синусоїди за віссю ординат, амплітуду, частоту та зміщення за віссю абсцис.

Шукані параметри синусоїди знаходимо за виразами

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

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

де $l_{\max} = l_{\min} + \Delta l$;

$$h_m = R(l_{\min}) - R_0;$$

$$\Delta l = l_{\max} - l_{\min}.$$

За даними, що встановлені за результатами вимірювань (h_m , l_{\min} , Δl), отримуємо шукані коефіцієнти: $a = 0,2215$; $b = 0,2215$; $c = 0,019625$; $d = -1,57$.

Таким чином, для цього приклада ділянка стирання апроксимується тригонометричною функцією (1):

$$h = 0,2215 + 0,2215 \cdot \sin(0,019625 \cdot l + 1,57). \quad (3)$$

Для апроксимації стирання КС у казенній частині поліноміальною функцією доцільно застосувати криву третього порядку:

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

Оскільки, як зазначено вище, форма профілю стирання КС у казенній частині дає нульове значення похідної в точках l_{\min} та l_{\max} , для точок з абсцисами l_{\min} та l_{\max} складаємо рівняння, які визначають зв'язок відповідних абсцис зі значеннями функції та похідної від неї. Отримаємо таку систему рівнянь для шуканих коефіцієнтів полінома:

$$\begin{cases} a_3 l_{\text{поч}}^3 + a_2 l_{\text{поч}}^2 + a_1 l_{\text{поч}} + a_0 = 0,443; \\ a_3 l_{\text{кін}}^3 + a_2 l_{\text{кін}}^2 + a_1 l_{\text{кін}} + a_0 = 0; \\ 3a_3 l_{\text{поч}}^2 + 2a_2 l_{\text{поч}} + a_1 = 0; \\ 3a_3 l_{\text{кін}}^2 + 2a_2 l_{\text{кін}} + a_1 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

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

$$a_3 = 2,163 \cdot 10^{-7}; \quad a_2 = -5,2 \cdot 10^{-5}; \quad a_1 = 0; \quad a_0 = 0,443.$$

Підставимо ці коефіцієнти до виразу (4) та отримаємо аналітичний опис ділянки стирання поліноміальною функцією:

$$h = 2,163 \cdot 10^{-7} \cdot l^3 - 5,2 \cdot 10^{-5} \cdot l^2 + 0 \cdot l + 0,443. \quad (6)$$

На рисунку 6 наведено суміщені графіки функцій (3), (6) та крива, отримана за результатами вимірювань.

Як видно з рис. 6, профілі стирання КС у межах казенної частини, апроксимовані поліномом третього порядку та тригонометричною функцією, є рівною мірою близькими до вихідної кривої. Із цього випливає, що під час моделювання процесу пострілу для аналітичного опису стирання КС можливе використання будь-якої із цих функцій, і перевагу можна віддати тій формі опису, яка дасть змогу спростити подальші математичні перетворення (наприклад інтегрування).

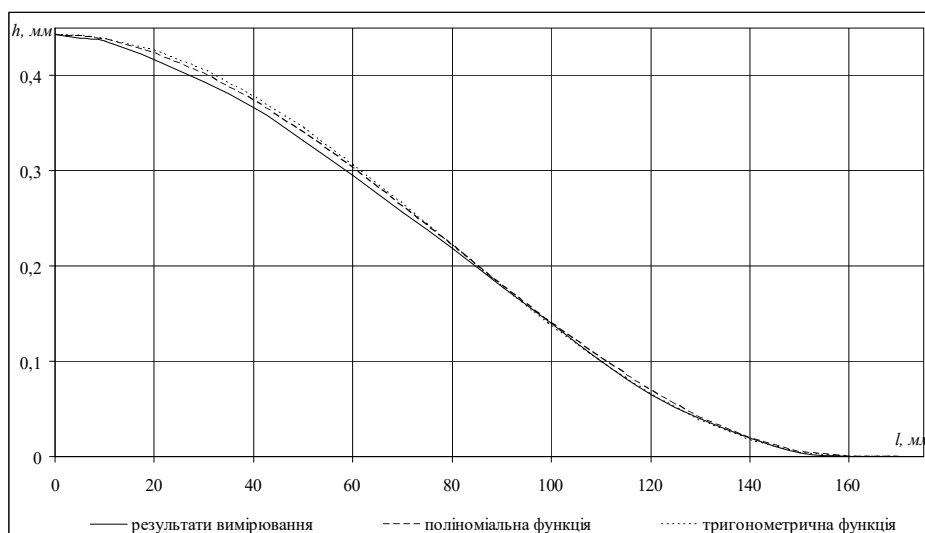


Рисунок 6 – Результати апроксимації казенної ділянки каналу ствола зі стиранням

Для апроксимації стирання у дульній частині КС, виходячи з вигляду кривої (див. рис. 5), шукатимемо апроксимуючі функції у класах тригонометричних та поліноміальних функцій. Зазначимо, що, як і у випадку стирання у казенній частині КС, для шуканих кривих похідні дорівнюють нулю у початковій точці l_{\max} та в точці l_{\min} , яка відповідає дульному зрізу.

Таким чином, для апроксимації стирання у дульній частині КС тригонометричною функцією доцільно подавати пошкоджену частину ділянкою синусоїди:

$$h = a + b \cdot \sin(c \cdot l - d), \quad (7)$$

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

Шукані параметри знаходимо за виразами

$$\begin{aligned} a &= \frac{h_m}{2}, \quad b = a = \frac{h_m}{2}, \\ c &= \frac{2\pi}{2 \cdot (l_{\max} - l_{\min})} = \frac{\pi}{l_{\max} - l_{\min}}, \\ d &= \frac{\pi}{(l_{\max} - l_{\min})} \cdot \left(l_{\min} + \frac{l_{\max} - l_{\min}}{2} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

де $h_m = R(l_{\max}) - R_0$; $\Delta l = l_{\max} - l_{\min}$.

За даними, що встановлені за результатами вимірювань (h_m , l_{\min} , Δl), отримуємо шукані коефіцієнти: $a = 0,095$; $b = 0,095$; $c = 0,049$; $d = 47,613612$.

Таким чином, для цього приклада ділянка стирання апроксимується функцією (7):

$$h = 0,095 + 0,095 \cdot \sin(0,049 \cdot l - 34,47). \quad (9)$$

Для апроксимації стирання КС у дульній частині поліноміальною функцією, виходячи з тих самих міркувань, що й для казенної частини КС, також доцільно застосувати криву третього порядку:

$$h = a_3 \cdot l^3 + a_2 \cdot l^2 + a_1 \cdot l + a_0. \quad (10)$$

Складаємо систему рівнянь для шуканих коефіцієнтів полінома:

$$\begin{cases} a_3 l_{\text{поч}}^3 + a_2 l_{\text{поч}}^2 + a_1 l_{\text{поч}} + a_0 = 0; \\ a_3 l_{\text{кін}}^3 + a_2 l_{\text{кін}}^2 + a_1 l_{\text{кін}} + a_0 = 0,19; \\ 3a_3 l_{\text{поч}}^2 + 2a_2 l_{\text{поч}} + a_1 = 0; \\ 3a_3 l_{\text{кін}}^2 + 2a_2 l_{\text{кін}} + a_1 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

За даними, що встановлені за результатами вимірювань, отримуємо рішення системи (11): $a_3 = -1,45 \cdot 10^{-6}$; $a_2 = 3,05 \cdot 10^{-3}$; $a_1 = -2,14$; $a_0 = 498,45$.

Підставимо ці коефіцієнти у вираз (10) і отримаємо аналітичний опис ділянки стирання:

$$h = -1,45 \cdot 10^{-6} \cdot l^3 + 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot l^2 - 2,14 \cdot l + 498,45. \quad (12)$$

На рисунку 7 наведено суміщені графіки функцій (9), (12) та крива, отримана за результатами вимірювань.

Як видно з рис. 7, профілі стирання КС у дульній частині, апроксимовані поліномом третього порядку та тригонометричною функцією, є рівною мірою близькими до вихідної кривої. Із цього випливає, що під час моделювання процесу пострілу для аналітичного опису стирання КС можливе використання будь-якої із цих функцій, і перевагу можна віддати тій формі опису, яка дасть змогу спростити подальші математичні перетворення (наприклад, інтегрування).

Збільшення діаметра КС під час стирання супроводжується збільшенням площі його поперечного перерізу, внаслідок 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, та тиск у заснарядному (закульному) просторі зменшується.

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

$$\psi^* = k_u \psi, \quad (13)$$

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

При цьому слід урахувати такі чинники:

- коефіцієнт втрати маси порохових газів дорівнює 1 за відсутності їх прориву (тобто значення ψ фактично не коригується) і приймає додатні значення, менші за 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 за рахунок 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 цій 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 цій 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 стирання КС, отриману вище.

За наявності стирання коефіцієнт втрати порохових газів матиме такий вигляд:

$$k_u = 1 - \alpha p \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \Delta S(l) dl, \quad (14)$$

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

p – миттєве значення тиску порохових газів;

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

КС унаслідок стирання.

Позначимо номінальне значення радіуса КС як R_0 . Тоді радіус $R(l)$ КС на ділянці, де є наявним стирання (див. рис. 8), визначатиметься виразом

$$R(l) = R_0 + h(l). \quad (15)$$

Збільшення площі поперечного перерізу КС унаслідок стирання визначатимемо згідно з виразом

$$\Delta S = S(l) - S_0, \quad (16)$$

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

S_0 – номінальна площа КС.

Виконаємо підстановку виразу (14) у вираз (15) і отримаємо вираз для ΔS :

$$\begin{aligned} \Delta S &= \pi R^2(l) - \pi R_0^2 = \pi R_0^2 + \\ &+ 2\pi R_0 h(l) + \pi h^2(l) - \pi R_0^2 = \\ &= \pi (2R_0 h(l) + h^2(l)). \end{aligned} \quad (17)$$

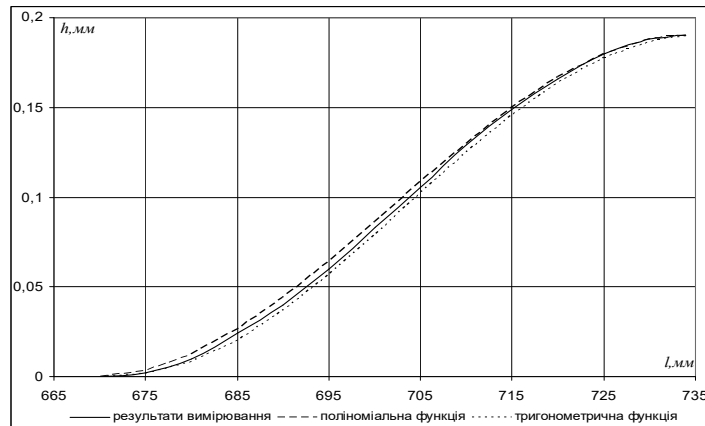


Рисунок 7 – Результати апроксимації дульної ділянки каналу ствола зі стиранням

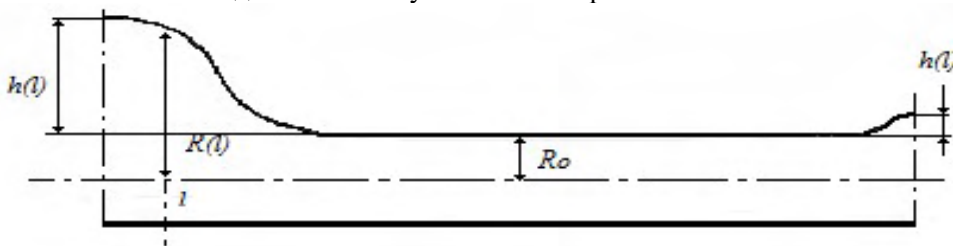


Рисунок 8 – Ділянка каналу ствола зі стиранням

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

$$\Delta S = 2\pi R_0 h(l). \quad (18)$$

Підставивши вираз (11) у вираз (12), подамо вираз для k_u у вигляді

$$k_u = 1 - r p \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} h(l) dl, \quad (19)$$

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

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

$$\psi^* = \psi \left(1 - r p \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} h(l) dl \right). \quad (20)$$

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

1. Зі зразка вогнепальної зброї зі стиранням виконують постріл та шляхом вимірювання визначають дульну швидкість $v_{d,e}$.

2. Визначають параметри h_m , l_{\min} , Δl профілю КС на ділянці стирання, отримують апроксимуючу криву за виразами (1), (4) або (7), (10).

3. Згідно з виразом (20) здійснюють підстановку скоригованого значення ψ^* відносної частини порошу, що згорів, у модель пострілу за довільно обраного значення $r = r_1$.

4. Проводять чисельне розв'язання рівнянь внутрішньої балістики, тобто моделювання пострілу з урахуванням наявності стирання 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 $v_e < v_p$, 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 – допустима 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 певного зразка зброї.

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

$$f_{zp} = \frac{r_n}{h_m}. \quad (21)$$

8. За необхідності провести моделювання пострілу із такого самого зразка зброї, але за інших характеристик профілю стирання КС (h'_m , l'_{\min} , $\Delta l'$), потрібно попередньо визначити коефіцієнт r' для підстановки його у вираз (20):

$$r' = f_{zp} h'_m. \quad (22)$$

Значимо, що під час практичного застосування у моделі пострілу виразу (19) і пов'язаному з цим інтегруванням $h(l)$ не виникає ускладнень, оскільки під час моделювання та апроксимації профілю дефектної ділянки КС застосовують тригонометричну (синусоїдну) поліноміальну функцію доволі невисокого порядку.

Таким чином, удосконалена математична модель пострілу являє собою сукупність результатів моделювання профілю поверхні КС

на ділянках стирання та виразів (1)–(22), згідно з якими модель стирання імплементується у рівняння внутрішньої балістики, які подані у кінцево-різницевої формі.

На основі застосування удосконаленої моделі пострілу проведено моделювання процесу пострілу для різних зразків зброї за наявності стирання КС. Приклади результатів такого моделювання наведено нижче на рис. 9, 10, 11 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 стирання КС. Зауважимо, що умовний ступінь дефекту для певного зразка озброєння визначається максимальним розміром збільшення радіуса КС та протяжністю пошкодженої ділянки.

У праці проведено моделювання процесу пострілу для різних зразків зброї та для різних ступенів стирання КС.

Наведемо приклади графіків $p(t)$ і $v(t)$ для деяких зразків зброї та випадків відсутності стирання КС (“номінальні” криві) й наявності стирання двох ступенів: значного та незначного.

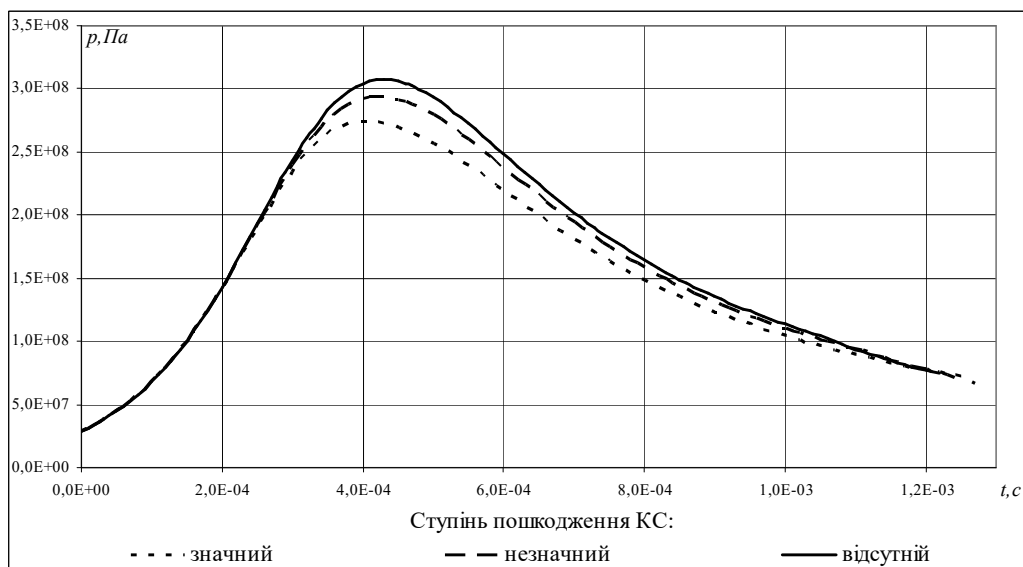


Рисунок 9 – Залежності $p(t)$ для випадку стирання каналу ствола 7,62 мм снайперської гвинтівки Драгунова СВД

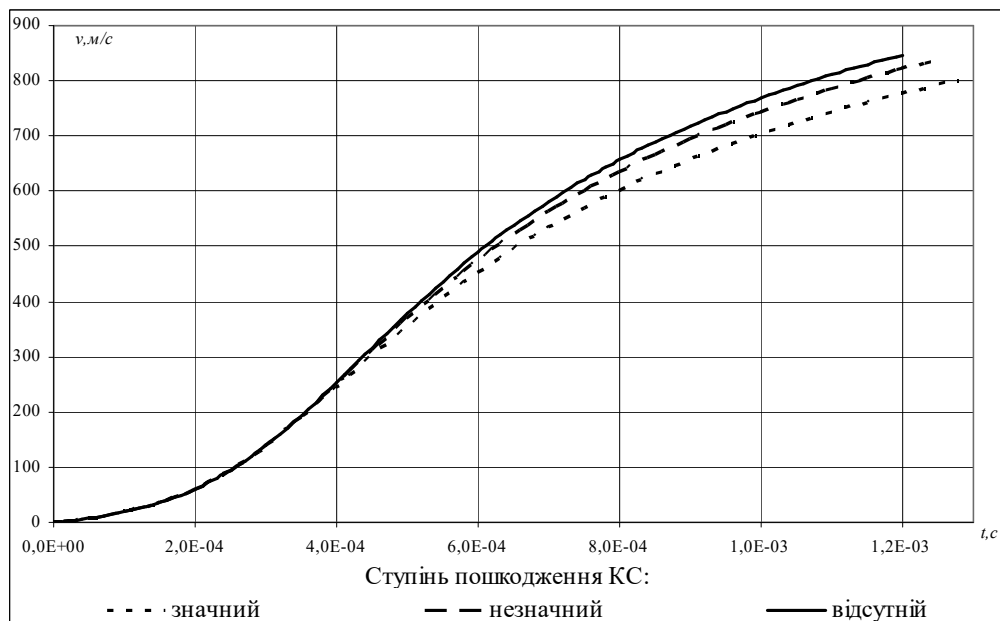


Рисунок 10 – Залежності $v(t)$ для випадку стирання каналу ствола 7,62 мм снайперської гвинтівки Драгунова СВД

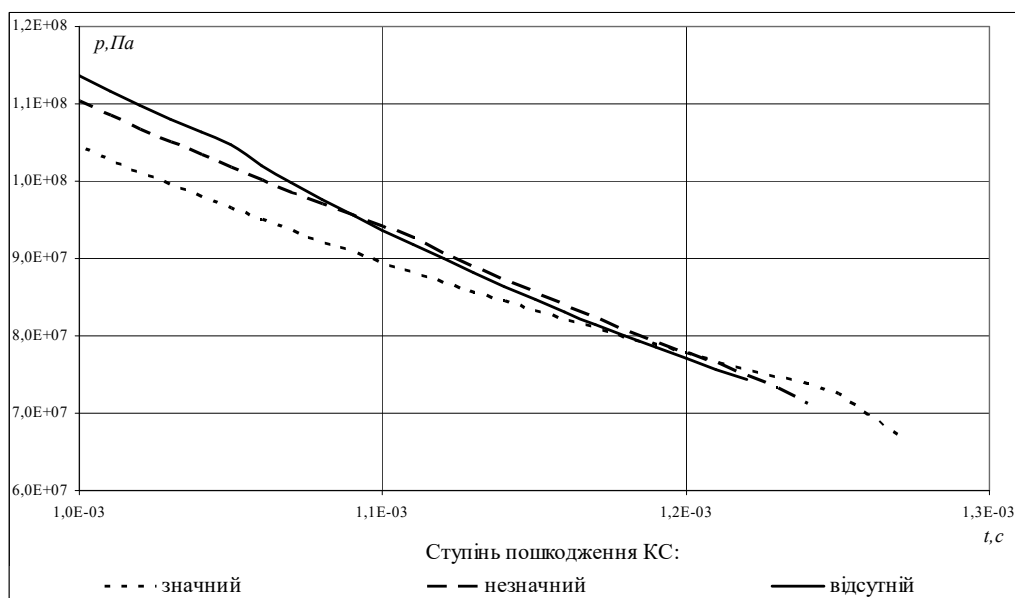


Рисунок 11 – Збільшені ділянки залежностей $p(t)$ для випадку стирання каналу ствола 7,62 мм снайперської гвинтівки Драгунова СВД

На рисунку 11 для зручності аналізу у збільшеному масштабі зображені кінцеві частини графіків $p(t)$.

Як свідчить аналіз графіків, стирання у межах казенної частини КС приводить до зменшення максимального значення тиску та зниження спадної гілки кривої $p(t)$. Водночас унаслідок незначного уповільнення горіння порошу (за рахунок падіння тиску під час прориву порохових газів) тривалість першого періоду пострілу дещо збільшується. За

характером кривої $p(t)$ стирання КС у межах казенної частини добре ідентифікується.

Графіки залежності $v(t)$ також дають змогу ідентифікувати стирання КС у межах казенної частини, але є менш наочними та інформативними, ніж графіки $p(t)$. Тому аналіз кривих $v(t)$ дозволяє лише констатувати наявність певного дефекту в казенній частині КС, але достовірно встановити його тип (роздуття або стирання) не є можливим.

Стирання КС поблизу його дульної частини впливає на перебіг внутрішньобалістичних процесів несуттєво ("спадання" тиску є незначним, площа під кривою $p(t)$ практично не зменшується). За характером кривої $p(t)$ стирання КС поблизу дульної частини ідентифікується лише за значного його ступеня.

Ідентифікація стирання КС у межах дульної частини КС за виглядом залежностей $v(t)$ унаслідок незначного впливу цього явища на перебіг внутрішньобалістичних процесів практично неможлива.

За незначного стирання у межах казенної частини КС падіння дульної швидкості не перевищує 1,5...2 % від номінального значення. За значного стирання падіння дульної швидкості становить 5...6 % від номінального значення.

Висновки

Застосування методу діагностування технічного стану КС на основі ідентифікації характеристик балістичних елементів пострілу відкриває шляхи для підвищення достовірності експлуатаційного контролю технічного стану КС. Однак практична реалізація цього методу потребує удосконалення моделі пострілу з вогнепальної зброї з метою урахування, зокрема, такого типового дефекту КС, як стирання.

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

Запропоновано для урахування ефекту від прориву порохових газів унаслідок стирання під час чисельного моделювання процесу пострілу коригувати значення відносної частини пороху, що згорів, шляхом уведення у різницеву модель пострілу коефіцієнта втрати маси порохових газів. Отримано вираз для визначення скоригованого значення відносної частини пороху, що згорів.

Одержано вдосконалену математичну модель пострілу, яка являє собою сукупність результатів моделювання профілю поверхні КС на ділянках стирання та виразів, згідно з якими модель стирання імплементується у рівняння внутрішньої балістики, які подані у кінцево-різницевої формі.

На основі застосування удосконаленої математичної моделі пострілу проведено

чисельне моделювання процесу пострілу для різних зразків зброї за наявності стирання КС на різних його ділянках. Встановлено, що наявність стирання поблизу казенної частини ствола добре ідентифікується за виглядом графіків тиску та швидкості для різних ступенів цього дефекту.

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

Подальші дослідження у межах даного наукового напрямку доцільно зосередити на моделюванні впливу на балістичні елементи пострілу дефектів каналів стволів в комплексі із деградацією металних зарядів.

Перелік джерел посилання

1. Пушкарев А. М., Вершинин А. А., Вольф И. Г. Оценка износа артиллерийских стволов. Тула : Известия ТулГУ. Технические науки, 2015. Вып. 12. Ч. 1.
2. Анипко О. Б., Гончаренко П. Д., Хайков В. Л. Живучесть стволов корабельных установок и геронтологические изменения свойств взрывчатых веществ артбоеприпасов. *Збірник наукових праць*. 2011. Вип. 3(7).
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 р.).
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 : НА НГУ, 2018. Вип. 2. С. 5–12.

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

11. Modeling of the process of the shot based on the numerical solution of the equations of internal ballistics / O. M. Kriukov et al. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5 (97). P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155357> (дата звернення: 28.12.2020).

12. Крюков О. М., Мельников Р. С. Математичне моделювання процесу пострілу з урахуванням роздуття каналу ствола вогнепальної зброї як засіб впливу на ефективність виконання службово-бойових завдань силами безпеки. *Честь і закон*. 2020. № 2. С. 61–73.

13. Орлов Б. В., Ларман Э. К., Маликов В. Г.

Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. Москва : Машиностроение, 1976. 433 с.

14. Муханов В. И. Живучесть стволов артиллерийских установок. Ленинград, 1961. 19 с.

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

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

17. Корнер Дж. Внутренняя баллистика орудий. Москва, 1953. 453 с.

18. Хайков В. Л. Развитие методов инструментального контроля и визуализации состояния каналов стволов артиллерийских орудий. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 3/7.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2021 р.

УДК 623.442:623.522

А. М. Крюков, Р. С. Мельников

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСТРЕЛА ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СТИРАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КАНАЛА СТВОЛА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Рассмотрен перспективный метод эксплуатационного диагностирования технического состояния каналов стволов огнестрельного оружия, показано значимость его реализации при выполнении задач силами безопасности. Получено математическое описание профиля канала ствола при наличии его частичного стирания. Предложена усовершенствованная математическая модель выстрела, в которой учтены потери энергии пороховых газов при наличии стирания канала ствола. Выполнено численное моделирование процесса выстрела, получены кривые давления пороховых газов и скорости движения снаряда для различных образцов огнестрельного оружия при наличии стирания канала ствола. Доказано, что местоположение участка стирания канала ствола и степень проявления этого дефекта могут быть установлены по характеру кривых давления и скорости.

Ключевые слова: служебно-боевая задача, канал ствола, казенная часть, дульная часть, стирание, техническое состояние, баллистический элемент выстрела, процесс выстрела, моделирование.

UDC 623.442:623.522

O. Kriukov, R. Melnikov

MATHEMATICAL MODELING OF THE SHOT PROCESS FOR OPERATIONAL DIAGNOSIS OF THE ERASURE OF THE INNER SURFACE BARREL DURING PERFORMING NATIONAL SECURITY MISSIONS

A promising method for diagnosing defects in the channels of firearms barrels, in particular, their erasure, providing for the use of measurement information about the ballistic elements of the shot, is considered. The application of this method should be based on the use of a data Bank on the ballistic

elements of the shot, corresponding to the serviceable state of the barrel channel and different degrees of manifestation of its erasure.

The purpose of the article is to obtain a mathematical description of the bore profile in the presence of areas of abrasion and to develop a mathematical model of the shot taking into account this defect.

A mathematical description of the trunk channel profile in the presence of its partial removal based on trigonometric and polynomial functions is proposed. A mathematical model of the shot is developed, which takes into account the loss of part of the energy of the powder gases due to their break between the walls of the barrel and the projectile in the presence of areas of erasure of the barrel.

An improved mathematical model of the shot was tested by simulating the shot process taking into account attrition using a numerical method. Based on the results of modeling, curves for the ballistic elements of the shot for different firearms samples were obtained in the presence of erasure of the barrel channel in various parts of it, and their analysis was carried out.

It is shown that the location of the erasure area of the barrel bore and the degree of manifestation of this defect can be identified by the nature of the curves for the ballistic elements of the shot.

Keywords: *barrel bore, breech of the weapon, muzzle of the weapon, abrasion, technical condition, ballistic element of the shot, the process of shooting, 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>

Мельников Роман Сергійович – ад'юнкт Національної академії Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0003-3517-2040>