

УДК 623.522.2:531.787.916

УРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ВИМІРЮВАННЯ МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ ТИСКУ ПОРОХОВИХ ГАЗІВ У КАНАЛАХ СТВОЛІВ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ

**Accounting of the temperature effect
when measuring the instantaneous values
of the gunpowder gases pressure in the bores of firearms**

О. Крюков, доктор технічних наук, професор,
І. Лисак, курсант,
Національна академія Національної гвардії України,
м. Харків,
e-mail: kam14@ukr.net

O. Kriukov, Doctor of Technical Sciences, Professor,
I. Lysak, military student,
National academy of National guard of Ukraine,
Kharkiv,
e-mail: kam14@ukr.net

Проведено аналіз статичної характеристики тензометричного датчика миттєвих значень тиску порохових газів у каналах стволів вогнепальної зброї. Отримано вираз для оцінювання впливу температури на вихідний сигнал датчика, проведено кількісне оцінювання температурної похибки. Запропоновано способи зменшення впливу температури на результати вимірювання.

The relevance of measuring of the pressure of gunpowder gases in the barrel channels of a firearm is noted. The main requirements

for a pressure sensor for intra-ballistic measurements are considered. A review of the works in the field of strain gauges error modelling is given. The analysis of the static characteristic of the strain gauge sensor of instantaneous pressure values is carried out. For typical combinations of sensor parameters, a quantitative estimation of the temperature error is performed. To reduce the effect of temperature on the measurement results, it is suggested to take into account the correction in the measurement results, or to apply the temperature stabilization system.

Ключові слова: внутрішньобалістичний процес, тензометричний датчик, миттєве значення тиску, статична характеристика, канал ствола вогнепальної зброї, температурна похибка, вимірювальна інформація, поправка, система температурної стабілізації.

Keywords: intraballistic process, strain gage sensor, instantaneous pressure value, static characteristic, firearms barrel channel, temperature error, measurement information, correction, temperature stabilization system.

Характеристики і тактико-технічні властивості будь-якого зразка вогнепальної зброї значною мірою визначаються характером протікання внутрішньобалістичних процесів і, зокрема, законом зміни тиску $P(t)$ порохових газів у каналі ствола та їх дією на частини й елементи зброї, що використовують енергію порохових газів. Зокрема, ці залежності дають змогу визначати вплив умов заряджання на характер дії порохових газів у дульних гальмах, газовідвідних пристроях та інших механізмах [1], оцінювати технічний стан вогнепальної зброї та боєприпасів, що перебувають в експлуатації або надходять у підрозділи з тривалого зберігання, нових або модернізованих, у тому числі під час проведення держаних та приймальних випробувань [2, 3].

Одним із шляхів визначення або уточнення закону зміни $P(t)$ є реалізація вимірювання миттєвих значень тиску за допомогою спеціалізованої установки (див., наприклад, [4], рис. 1) на основі тензометричного датчика, який спроможний функціонувати за умов високих температур, має змінювану верхню межу діапазону вимірювання, є малоінерційним і при цьому може забезпечити потрібну точність вимірювання.

Тензометричний датчик, що сприймає тиск у каналі ствола стрілецької зброї, працює за складних температурних умов. Для забезпечення вимог до точності вимірювання тиску необхідно дослідити вплив температури на метрологічні характеристики датчика.



О. Крюков



І. Лисак

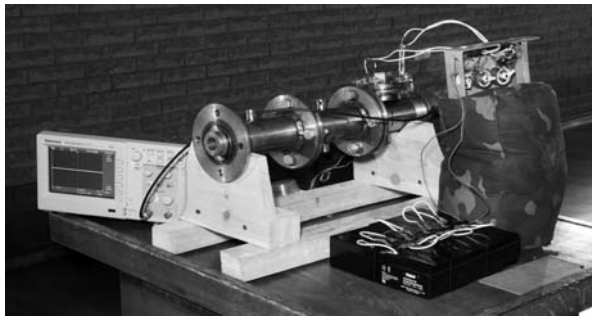


Рис. 1. Загальний вид дослідної установки
Fig. 1. General view of the experimental installation

Такі дослідження дозволяють урахувати вплив температури на вимірювальний сигнал, а також обґрунтувати шляхи зменшення впливу температурної похибки на результат вимірювання.

Авторами робіт [5], [6] пропонується звужувати діапазон робочих температур середовища, в межах якого температурним впливом можна знехтувати. У [7] запропоновано враховувати в результатах вимірювань коефіцієнт, який характеризує лінійну залежність статичних характеристик датчика від температури. Однак верхня межа робочого діапазону температур датчика миттєвих значень тиску значно вища за ту, що розглядається у [5—7], при цьому температура датчика між пострілами суттєво змінюється.

У роботі [8] розглядаються датчики тиску, які працюють за умов впливу температури порохових газів. Наведено спосіб зменшення температурного впливу, який передбачає врахування поправки, що визначається апріорно розрахунковим шляхом, і пасивне охолодження датчика тиску внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем.

Отже, результати розглянутих робіт не дозволяють розрахувати температурну похибку за реальних умов застосування тензометричного датчика в процесі вимірювання тиску в каналах стволів. Це обмежує можливості зменшення температурного впливу шляхом урахування відповідної поправки.

Мета статті — дослідження впливу температури на елементи тензометричного датчика миттєвих значень тиску та кількісне оцінювання температурної складової похибки вимірювання.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Елементи датчика тиску розміщуються в корпусі 1, який закривається кришкою 2 (рис. 2). Порожнина 3 заповнюється малостискуваною діелектричною рідиною 4, в якій розміщується тензометричний чутливий елемент 5. Через приймальний канал 6 порохові гази діють на мембрану 7, яка ізолює порожнину, сприймає

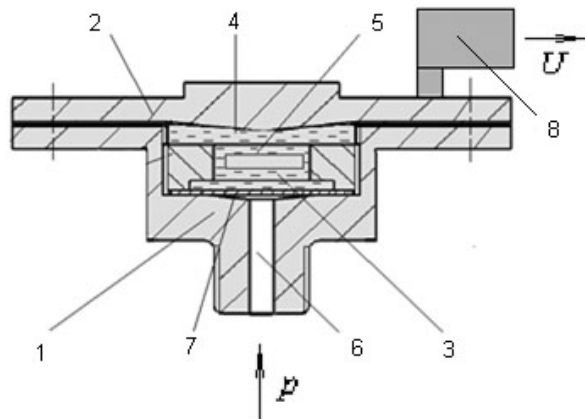


Рис. 2. Схема тензометричного датчика тиску
Fig. 2. The scheme of tensometric pressure sensor

вимірюваний тиск та передає його до рідини 4.

Внаслідок обтискання чутливого елемента рідиною змінюється його електричний опір. Чутливий елемент включено в плече мостового перетворювача (на рис. 2 не показано), вихідним сигналом якого є напруга вимірювальної діагоналі моста $U(t)$, пропорційна вимірюваному тиску $P(t)$. Мостовий перетворювач живиться напругою постійного струму U_E , при цьому статична характеристика датчика є лінійною [4].

З урахуванням конструктивних параметрів датчика тиску його передатковий коефіцієнт визначається виразом [9]:

$$k = (3/16) l_p \beta (r_m^4 (1 - \mu^2) / E h_m^3) K, \quad (1)$$

де r_m — радіус мембрани; h_m — товщина мембрани; l_p — довжина циліндричної порожнини з рідиною; β — стискуваність рідини; E — модуль пружності матеріалу мембрани; K — тензометричний коефіцієнт матеріалу чутливого елемента; μ — коефіцієнт Пуассона матеріалу мембрани.

Проведемо дослідження статичної характеристики датчика за умов змінюваної температури, враховуючи наявність температурного градієнта.

Уведемо позначення для зростання температури: ΔT_K — мембрани та корпусу, ΔT_p — рідини, ΔT_T — чутливого елемента. Тоді параметри у правій частині (1) отримають такі значення:

$$\begin{aligned} r'_m &= r_m (1 + \alpha_K \Delta T_K), \quad h'_m = h_m (1 + \alpha_K \Delta T_K), \\ l'_p &= l_p (1 + \alpha_p \Delta T_p), \quad K' = K / (1 + \alpha \Delta T_T), \quad E' = k_n (\Delta T_K) E, \quad (2) \\ \beta' &= k_\beta (\Delta T_p) \beta, \quad \mu' = k_\mu (\Delta T_K) \mu, \end{aligned}$$

де α_p — коефіцієнт об'ємного теплового розширення рідини; α_K — коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу мембрани та корпусу; $k_n (\Delta T_K)$ — коефіцієнт, що характеризує зміну початкового значення модуля пружності матеріалу мембрани під впливом температури; $k_\beta (\Delta T_p)$ — коефіцієнт, що характеризує зміну початкового значення стискуваності рідини під впливом

температури; $k_{\mu}(\Delta T_{\kappa})$ — коефіцієнт, що характеризує зміну початкового значення коефіцієнта Пуассона для матеріалу мембрани під впливом температури; α — параметр, що характеризує залежність тензометричного коефіцієнта від температури.

Зазначимо, що залежності $k_n(\Delta T_{\kappa})$, $k_p(\Delta T_p)$, $k_{\mu}(\Delta T_{\kappa})$ наведено у відомих джерелах інформації, наприклад, [10—12].

За наявності зміни температури елементів датчика умова балансу мостового перетворювача порушиться, а відносна зміна δU_T напруги на вимірвальній діагоналі моста становитиме

$$\delta U_T = (U' - U) / U'. \quad (3)$$

Підставимо до (3) вирази (1) і (2), проведемо спрощення та отримаємо:

$$\delta U_T = 1 - \frac{1 + \alpha_{\kappa} \Delta T_{\kappa}}{(1 + \alpha_p \Delta T_p)(1 + \alpha \Delta T_T)} \times \frac{1 - \mu^2 [k_{\mu}(\Delta T_{\kappa})]^2}{k_p(\Delta T_p) k_n(\Delta T_{\kappa}) (1 - \mu^2)}. \quad (4)$$

Вираз (4) визначає відносне змінювання вихідного параметра датчика тиску за наявності впливу температури і дозволяє кількісно оцінити та проаналізувати температурну похибку датчика за різних температур та за різних сукупностей його фізичних параметрів. На основі такого аналізу може бути визначено потребу в температурній стабілізації датчика тиску та обґрунтовано вимоги до системи температурної стабілізації.

Для характерних параметрів датчика тиску та параметрів заряджання зміна температури мембрани під час стрільби одиночними пострілами з інтервалом (5—10) хв не перевищує (2...5) К, рідини — (0,5...2) К, тензометричного чутливого елемента — (2...10) К, а δU_T становить (0,3...3) %.

Якщо значення δU_T перевищує межу встановленого інтервалу допустимих значень, може бути застосовано два способи зменшення впливу температури на результати вимірювань.

Перший спосіб полягає в розрахунку значення δU_T за виразом (4) на основі показань засобів вимірювання температури, сенсори яких мають бути розміщені на відповідних елементах датчика миттєвих значень тиску. Надалі результати цього розрахунку доцільно враховувати алгоритмічним шляхом в обчислювальному пристрої засобу вимірювання миттєвих значень тиску, тобто введенням поправки в процесі обчислення параметрів кривої $P(t)$.

Другий спосіб передбачає застосування системи температурної стабілізації чутливого елемента датчика тиску на основі, наприклад, елемента Пельтьє. При цьому для кожного із поєднань конструктивних параметрів датчика тиску та вимог до точності вимірювання вираз (4) дозволяє обґрунтувати вимоги до допустимих відхилень температури чутливого елемента, тобто задати вихідні вимоги до системи температурної стабілізації. Таке технічне рішення дозволить забезпечити сталість температури чутливого елемента і, отже, зменшення температурної складової похибки вимірювання.

ВИСНОВКИ

Отриманий вираз для оцінювання впливу температури на вихідний сигнал тензометричного датчика миттєвих значень тиску дозволяє обґрунтовувати вихідні вимоги до системи температурної стабілізації датчика за конкретних умов проведення вимірювань.

Для найбільш характерних умов проведення вимірювань температурна складова похибки перебуває в межах (0,3...3) %.

До можливих шляхів обмеження впливу температури на результати вимірювання миттєвих значень тиску потрібно віднести визначення та врахування відповідної поправки до результатів вимірювання, а також застосування системи температурної стабілізації чутливого елемента датчика тиску.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Біленко О. І. Підвищення стабільності дульної швидкості поразяючих елементів кінетичної зброї несмертельної дії [Текст] / О. І. Біленко, В. В. Пашенко // Збірник наукових праць Академії ВВ МВС України. — Х.: Академія ВВ МВС України (Bilenko, O., Non lethal weapons projectiles' muzzle velocity stability advancing, [Text], Scientific Works of Academy of Interior Troops of Ukraine). — 2010. — № 2 (16). — С/Р. 5—10.
2. Крюков О. М. Проблеми вимірального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // ХУПС : Збірник наукових праць ХУПС. — Х.: ХУПС (Kriukov O. M. Problems of measuring control of the parameters of intra-ballistic processes. [Text] / O. M. Kriukov, O. A. Aleksandrov // Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Forces. — Kharkiv: Kharkiv University of Air Forces). — 2009. — Вип./ Issue 1 (19). С/Р. 150 - 152.
3. Крюков О. М. Перспективи експериментального визначення балістичних елементів пострілу [Текст] / О. М. Крюков, В. Г. Мудрик // АБВ МВСУ: наукове видання — Х.: Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України (Kriukov O. M. Prospects

- for the experimental determination of ballistic elements of the shot [Text] / O. M. Kriukov, V. G. Mudrik // Collection of scientific works of the Academy of Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine. — Kharkiv: Academy of Internal Troops, — 2013. — Вип./ Issue 1(21). — С/Р. 21 — 24.
4. Крюков О. М. Дослідна установка для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї та артилерійських систем [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // Метрологія та прилади (Kriukov O. M. Experimental facility for measuring instantaneous pressure values in bores of small arms and artillery systems [Text] / O. M. Kriukov, O. A. Aleksandrov // Metrology and instruments). — 2011. — № 4 (30). — С/Р. 62—67.
 5. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник [Текст]: пер. с англ. К. Ткаченко / Фрайден Дж. — М.: Техносфера (Fraden J. Modern sensors. Handbook [Text]: / J. Fraden — М.: Tehnosfera). — 2005. — 592 с/р.
 6. Осадчий Е. П. и др. Проектирование датчика для измерения механических величин [Текст] / Е. П. Осадчий и др. — М.: Машиностроение (Osadchij, E. P. et al. Designing a sensor for mechanical values measuring [Text] / E. P. Osadchij et al. — М.: Mashinostroyenie). — 1979. — 477 с/р.
 7. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи [Текст] / Полищук Е. С. — Киев.: Вища школа (Polishchuk E. S. Measuring transducers [Text] / E.S. Polishchuk — Kiev: Vyshcha Shkola). — 1990. — 480 с/р.
 8. Марьямова И. И. Полупроводниковый датчик для измерения больших давлений [Текст] / И. И. Марьямова, Б. И. Сыдир, Ю. С. Екимов — М.: Приборы и системы управления (Marjamova I. I. Semiconductor sensor for high pressures measuring [Text] / I. I. Marjamova, B. I. Sydir, Ju. S. Jekimov. — М.: Pribory i Sistemy Upravleniya). — 1981. — 456 с/р.
 9. Крюков О. М. Математична модель датчика для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // ХУПС: Системи озброєння та військова техніка: наук. журн. — Х.: ХУПС (Kriukov O. M. Mathematical model of the sensor for measuring the instantaneous values of pressure in the bores of small arms [Text] / O. M. Kriukov, O. A. Aleksandrov // Arms and military equipment systems. — Kharkiv: Kharkiv University of Air Forces). — 2010. — № 4 (24). — С/Р. 83—89.
 10. Кухлинг Х. Справочник по физике [Текст] / Х. Кухлинг — пер. с нем. Е. М. Лейкина. — М.: Мир (Kuhling H. Handbook of Physics [Text] / H. Kuhling — М.: Mir). — 1982. — 520 с/р.
 11. Писаренко Г.С. Прочность материалов при высоких температурах [Текст] / Г. С. Писаренко — М.: Энергоатомиздат (Pisarenko G. S. Strength of materials at high temperatures [Text] / G. S. Pisarenko — М.: Energoatomizdat). — 1981. — 235 с/р.
 12. Иванов А. И. Поведение металлов при повышенных нестационарных температурах и нагрузках [Текст] / А. И. Иванов — М.: Наука (Ivanov A. I. The behavior of metals at elevated non-stationary temperatures and loads [Text] / A. I. Ivanov — М.: Nauka). — 1982. — 544 с/р. 

Отримано / received: 28.02.2018.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.В. Полярусом (Україна).
 Prof. O.V. Poliarus, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

DOI: 10.33955/2307-2180(3)2019.19-23

УДК 531.76:681.78

ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ СНАРЯДА В КАНАЛІ СТВОЛА: РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДІЮЧОГО МАКЕТА

Velocity Measuring Tool of Projectile in the Barrel: Experimental Research Results of the Valid Layout



О. Крюков, доктор технічних наук,
професор кафедри,
В. Мудрик, кандидат технічних наук,
слухач магістратури,
Національна академія Національної гвардії України, Харків
e-mail: kam14@ukr.net

O. Kriukov, doctor of technical sciences,
professor of department,
V. Mudrik, candidate of technical sciences,
master student,
National academy of National guard of Ukraine, Kharkov
e-mail: kam14@ukr.net

Розглянуто детальну методику і результати експериментальних досліджень діючого макета засобу вимірювання швидкості руху снаряда в каналі ствола. Проведено дослідження оптичної якості світлоповерхтального покриття та його впливу на балістичні характеристики снаряда. Отримано криві швидкості руху снаряда на діючому макеті засобу вимірювання та проведено їх аналіз.

The work is devoted to the consideration of the methodology of experimental research of velocity measuring tool of the projectile in the barrel. The content of individual stages of conducting research is outlined. The research of the optical quality of the reflective coating is carried out. It is shown that the use of reflective paint and envelope in the coating of the front part of the projectile provides an effect of retroreflection, sufficient for the Doppler frequency shift. The influence of the retroreflective coating on the ballistic characteristics

of the projectile has been investigated. It is defined that the relative increase of the mass and dimensions of the projectile, which caused by the planted of the retroreflective coating on its front part, does not exceed, in accordance 0,10% and 0,025% of its output mass and length, therefore, the effect of these projectile parameters is too small and unable to exert a noticeable effect on its ballistic characteristics during of movement in barrel.

The velocity projectile curves were carried by experimentally on an valid layout of the measuring tool, and their analysis was carried out. The possibility of using the double differential method of laser Doppler anemometry to measure the velocity of the projectile in barrel has been confirmed. Found that form the experimental curves velocity corresponds to the expected nature of the increase velocity of the projectile in the barrel of velocity measuring tool. The adequacy of the mathematical model of the measurement tool which obtained theoretically is confirmed.

Ключові слова: вимірювання, швидкість, снаряд, вогнепальна зброя, канал ствола, світлоповерхтальне покриття, лазерна анемометрія.

Keywords: measuring, velocity, projectile, firearm, barrel, reflective coating, laser anemometry.

Важливе значення в процесах створення, модернізації, випробування та експлуатації сучасних зразків вогнепальної зброї мають дані стосовно балістичних елементів пострілу — залежності тиску $P(t)$ порохових газів та швидкості $V(t)$ снаряда від часу t його руху в каналі ствола. Можливості застосування відомостей щодо балістичних елементів пострілу під час створення новітніх зразків зброї, поточного контролю технічного стану вогнепальної зброї та за вирішення інших завдань детально розглянуто в [1—4].

Для визначення залежності $V(t)$ може бути застосований лазерний доплерівський засіб вимірювання (ЗВ), принципи побудови та конструкція якого запропоновані в роботі [5]. У ній же викладено результати дослідження працездатності подвійної диференційної схеми лазерної доплерівської анемометрії, а також запропоновано математичну модель такого ЗВ. У спектрі змінної складової фотоструму ЗВ присутня складова з частотою $F = 2fv(\cos \alpha - \cos \beta)/c$, яка є стійкою до простої неузгодженості зондувальних променів на поверхні снаряда (тут f — частота



О. Крюков



В. Мудрик

лазерного випромінювання, v — швидкість руху снаряда, α , β — кути падіння зондувальних променів на поверхню снаряда, c — швидкість розповсюдження електромагнітних коливань у середовищі).

Аналіз джерел похибок ЗВ швидкості руху снаряда проведено в роботі [6]. Структурна схема, принципи опрацювання вимірювальної інформації та алгоритмічні основи функціонування ЗВ швидкості руху снаряда в каналі ствола розглянуто в статтях [7, 8].

Однак обґрунтовані висновки щодо принципової можливості створення та застосування сучасного лазерного доплерівського ЗВ швидкості руху снаряда в каналі ствола можна зробити лише за результатами більш ретельних експериментальних досліджень його діючого макета. Отже, постає актуальне завдання з реалізації експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення особливостей визначення швидкості руху снаряда запропонованим засобом вимірювання.

Ця стаття завершує низку публікацій [5–8], у яких відображено результати пошукового етапу створення розглянутого ЗВ.

Мета статті — розгляд методики експериментальних досліджень засобу вимірювання швидкості руху снаряда в каналі ствола та обговорення їх результатів.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

План проведення експериментальних досліджень містить такі етапи:

- дослідження оптичної якості світлоповертально-го покриття (СПП);
- дослідження впливу СПП на балістичні характеристики снаряда;
- отримання кривих швидкості руху снаряда на діючому макеті ЗВ та їх аналіз.

Діючий макет ЗВ, устрій та параметри якого детально розглянуті у [5], складається з оптичної, механічної та електронної частин.

До оптичної частини макета ЗВ входять джерело лазерного випромінювання, оптичний коліматор, оптичний відбивач та світлоподільна призма. Для спрямування лазерних променів на поверхню снаряда використано систему дзеркал.

До механічної частини макета ЗВ входять елементи, робота яких імітує рух снаряда в каналі ствола. Для приведення снаряда в рух використано енергію стисненого повітря, яке нагнітається у резервуар. Конструкція механічної частини передбачає можливість варіювання швидкості руху снаряда внаслідок керованого змінювання тиску повітря у резервуарі. За еквівалент снаряда застосовано поршень із алюмінієвого сплаву.

До електронної частини макета ЗВ входять цифровий осцилограф, фотоприймач, а також блок електроживлення та управління власного виготовлення.

Виконання умови забезпечення працездатності подвійного диференційного методу лазерної доплерівської анемометрії [9] потребує нанесення на оживальну поверхню снаряда СПП. Внаслідок застосування світловідбивальних елементів (мікросклокульок або тетраїдних мікропризм) основна потужність світла, що падає на оживальну поверхню снаряда, відбивається у напрямку, зворотному до напрямку падіння зондувальних променів. Діаграма розсіювання когерентного лазерного випромінювання на СПП у дальній зоні дифракції є хаотичною сукупністю локальних максимумів, яку можна спостерігати, наприклад, на поверхні екрана. Світлоповертальне покриття можна наносити на поверхню як фарбуванням (світлоповертальною фарбою), так і приклеюванням світлоповертальної плівки. Виходячи із цього, під час проведення експерименту було використано СПП двох типів:

- світлоповертальна фарба, яка виготовлялася непромисловим способом та складалася із світлоповертальних елементів (мікросклокульок із середнім розміром близько 200 мкм) та прозорої клейової основи зі згущувачем;
- світлоповертальна плівка промислового виготовлення із розміром мікросклокульок 50 мкм.

Дослідження оптичної якості світлоповертального покриття

На цьому етапі експерименту контролювалася якість світлоповертальної фарби, яка виготовлялася непромисловим способом та наносилася на поверхню снаряда. Для цього на снаряд 1 (рис. 1) із нанесеною на нього світлоповертальною фарбою спрямовували випромінювання від лазера (на рис. 1 не по-

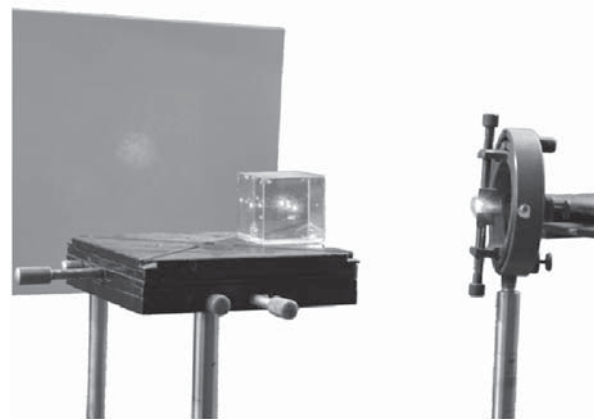


Рис. 1. Експеримент з контролю якості світлоповертальної фарби
Fig. 1. Experiment on quality control of the reciprocal paint

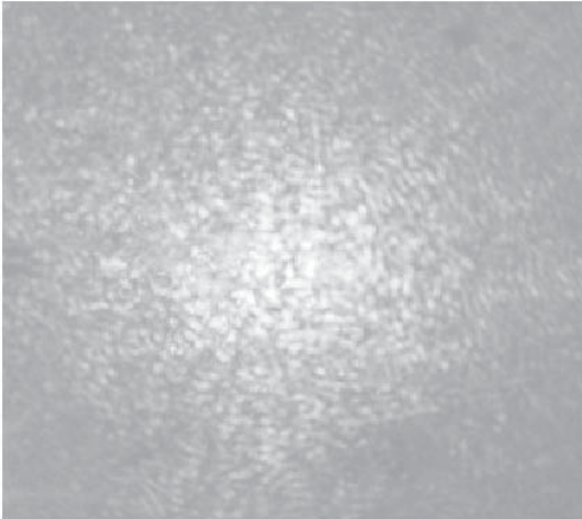


Рис. 2. Збільшене зображення випромінювання, відбитого на екран від світлоповертальної фарби
Fig. 2. A larger image of the radiation reflected on the screen from the retro-reflective paint

казаний) та отримували картину 2 розподілу випромінювання, відбитого на екран.

Збільшене зображення відбитого на екран випромінювання наведено на рис. 2.

Як свідчать результати цієї частини експерименту, світлоповертальна фарба непромислового виготовлення характеризується цілком прийнятним значенням коефіцієнта світлоповернення, оскільки сукупність локальних максимумів забезпечує яскравість поверхні екрана, яка є цілком достатньою для реєстрації сигналу.

Як зазначено вище, під час проведення цього етапу експериментальних досліджень було використано світлоповертальну фарбу обмеженої якості (тобто з порівняно великим середнім розміром світлоповертальних елементів і дещо неоднорідною їх формою). Однак за практичної реалізації ЗВ доцільно використовувати світлоповертальну фарбу промислового виробництва з більш високою якістю (тобто із меншим середнім розміром світлоповертальних елементів однорідної кулькоподібної форми). Еквівалентом такої світлоповертальної фарби є світлоповертальна плівка [10] промислового виробництва зі середнім діаметром мікросклокульок 50 мкм, яка також використовувалася за проведення експерименту. На рис. 3 наведено зображення картини відбитого від такої світлоповертальної плівки на екран лазерного випромінювання. Із рис. 3 можна побачити, що використання менших за розміром світлоповертальних елементів однорідної форми призводить до збільшеної кількості концентрованих локальних максимумів, до підвищення коефіцієнта світлоповернення і, зрештою, до зростання світлового потоку відбитого випромінювання.

Результати цього етапу досліджень свідчать, що світлоповертальна фарба, нанесена на снаряд, зберігає свої властивості світлоповернення. Для збільшення концентрації локальних максимумів на апертурі фотоприймача доцільно використовувати СПП на основі мікросклокульок малого діаметра та однорідної форми.

Дослідження впливу світлоповертального покриття на балістичні характеристики снаряда

На цьому етапі експерименту досліджено відхилення основних балістичних характеристик снаряда: його маси і розміру, — від номінального значення внаслідок нанесення світлоповертального покриття.

Для перевірки маси та товщини шару світлоповертальної фарби її було нанесено рівним шаром на папір площею 0,025 м². Встановлено, що товщина шару світлоповертальної фарби складає близько 310 мкм, маса — 0,9 г.

Отже, маса СПП за діаметра мікросклокульок 200 мкм (ураховуючи, що площа його нанесення відповідає площі оживальної частини снаряда) для поширених видів боєприпасів приблизно становитиме:

- ♦ 4,6 мг для кулі 9 мм патрона ПМ, що складає 0,075 % від номінального значення його маси;
- ♦ 4,1 мг для кулі 5,45 мм АК-74 (7Н6), що відповідає 0,10 % від номінального значення його маси;
- ♦ 9,4 мг для кулі 7,62 мм СВД (ЛПС), що складає 0,11 % від номінального значення його маси.

При цьому збільшення довжини для тих самих поширених видів боєприпасів з урахуванням

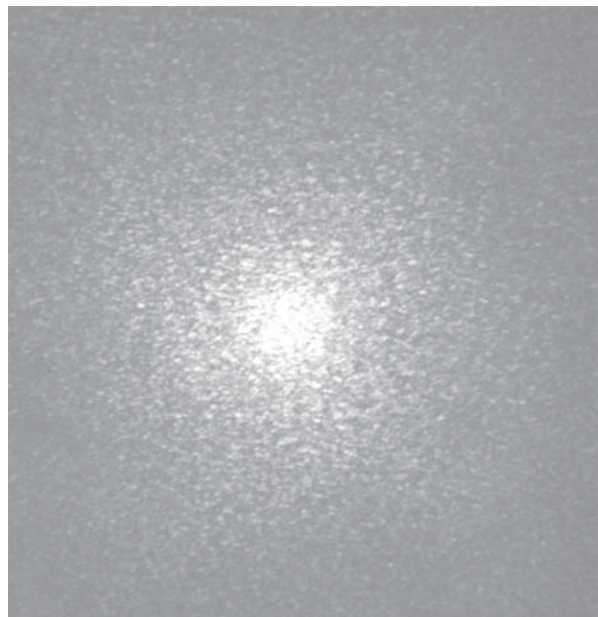


Рис. 3. Лазерне випромінювання, відбите від світлоповертальної плівки
Fig. 3. Laser radiation reflected from the retro-reflective film

товщини шару світлоповертальної фарби 310 мкм, становитиме:

* для кулі 9 мм патрона ПМ — 0,025 % від номінального значення її довжини;

* для кулі 5,45 мм АК-74 — 0,012 % від номінального значення її довжини;

* для кулі 7,62 мм СВД — 0,011 % від номінального значення її довжини.

Такі відхилення маси і довжини є значно меншими, ніж параметри звичайного технологічного розкиду маси і розмірів снарядів (куль) у процесі їх виготовлення [11]. Ці дані дають підставу стверджувати, що зміна маси та розмірів снаряда, зумовлена нанесенням на нього СПП, не чинить суттєвого впливу на його балістичні характеристики.

Отримання кривих швидкості руху снаряда на діючому макеті засобу вимірювання та їх аналіз

Методика проведення цього етапу експериментальних досліджень включає підготовку діючого макета ЗВ до проведення вимірювань, отримання вимірювальної інформації стосовно швидкості руху снаряда у каналі ствола та опрацювання експериментальних даних.

Підготовка діючого макета ЗВ до проведення вимірювань полягає у налаштуванні його оптичної й механічної частин, а саме, відтворенні бази оптичної схеми, спрямуванні лазерних променів на поверхню снаряда, визначенні кутів α і β зондування поверхні снаряда, створенні заданого тиску в резервуарі, а також у налаштуванні осцилографа та відповідних електричних і механічних з'єднань.

Проведення експерименту передбачає формування заданого закону руху снаряда у каналі ствола та реєстрацію вимірювального сигналу з виходу фотоприймача за допомогою цифрового осцилографа.

Під час проведення експерименту певні параметри елементів оптичної й механічної частин для кожного «пострілу» варіювалися. До змінюваних параметрів належать:

- ▶ частота лазерного випромінювання f ;
- ▶ кути спрямування лазерних променів α і β ;
- ▶ тиск у резервуарі P .

Відповідно до технічних можливостей експериментальної установки її параметри варіювалися у таких діапазонах: $P = (500 \dots 1500)$ кПа, $f_1 = 0,474$ ПГц, $f_2 = 0,564$ ПГц (червоний та зелений лазери); $\alpha = (0,5 \dots 1)^\circ$; $\beta = (1 \dots 1,5)^\circ$.

Варіювання параметрів елементів оптичної й механічної частин дає можливість дослідити адекватність математичної моделі ЗВ, отриманої у [5], та її застосовність у широкому діапазоні швидкостей руху снаряда. Дійсно, за варіювання тиску P формуються різні закони

збільшення швидкості руху снаряда, що може бути ідентифіковано за ходом отриманих експериментально кривих швидкості. Окрім того, за незмінного значення тиску P , але за різних значень частоти лазерного випромінювання f та кутів зондування α , β , змінюється реєстрований доплерівський зсув частот, але водночас відповідних змін набуває й коефіцієнт $F = 2fv(\cos \alpha - \cos \beta)/c$ [5], який у такому випадку визначається за параметрами експериментальної установки і слугує для подальшого розрахунку миттєвих значень швидкості руху снаряда. Отже, за ступенем збігу декількох кривих швидкості, які визначаються на основі експериментальних даних для доплерівського зсуву частот, можна судити щодо адекватності математичної моделі ЗВ, отриманої теоретичним шляхом.

Результатами цього етапу експерименту є зареєстровані вимірювальні сигнали у виді дискретних значень напруги фотоструму на виході фотоприймача. За опрацювання експериментальних даних здійснено перехід від масивів миттєвих значень напруги фотоструму безпосередньо до залежностей швидкості руху снаряда від часу за методикою, викладеною у [7, 8], тобто обчислено значення швидкості руху для відповідних моментів часу. Приклади отриманих кривих швидкості руху снаряда подано на рис. 4. На ньому криву 1 отримано для найбільш динамічного розгону снаряда, криву 5 — для найменш динамічного, а криві 2, 3, 4 зареєстровані для незмінюваної динаміки розгону снаряда, але за варіюваних значень частоти лазерного випромінювання f та кутів зондування α , β .

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити такі висновки:

▲ практично підтверджено наявність стійкого вимірювального сигналу та можливість його реєстрації й опрацювання за умов варіювання закону наростання швидкості снаряда;

▲ вид отриманих кривих відповідає очікуваному характеру наростання швидкості руху снаряда у каналі ствола для такої конструкції діючого макета ЗВ;

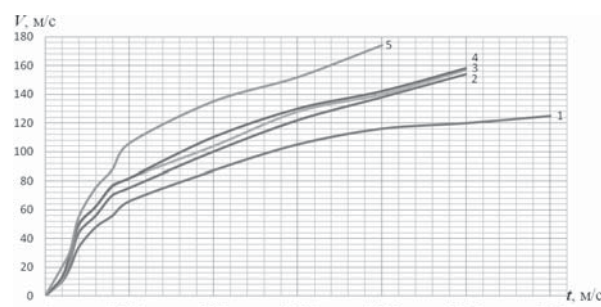


Рис. 4. Графіки залежності швидкості руху снаряда у каналі ствола від часу

Fig. 4. Charts of the dependence of the speed of the projectile in the barrel channel from time

▲ наявність просторової неузгодженості лазерних променів на поверхні снаряда на окремих ділянках його руху не призводить до падіння відношення «сигнал/завада» до рівнів, які ускладнюють реєстрацію сигналу на виході фотоприймача;

▲ обсяг вимірювальної інформації є достатнім для опрацювання сигналу та визначення залежностей швидкості руху снаряда як функції часу;

▲ збіг кривих, отриманих за незмінного значення тиску P , але за різних значень частоти лазерного випромінювання f та кутів зондування α , β , свідчить стосовно адекватності математичної моделі ЗВ [5], отриманої теоретичним шляхом. Деяка неістотна розбіжність кривих зумовлена обмеженими можливостями експериментальної установки та може бути пояснена як наявністю похибок визначення кутів α , β і відхиленням частоти f джерела лазерного випромінювання від його паспортного значення, так і неточністю задавання закону руху снаряда внаслідок дії стисненого повітря.

ВИСНОВКИ

Проведено експериментальне дослідження діючого макета засобу вимірювання, яке підтвердило можливість практичного застосування подвійної диференційної схеми лазерної доплерівської анемометрії для визначення закону збільшення швидкості руху снаряда у каналі ствола.

Встановлено, що застосування світлоповертальних фарби і плівки під час покриття оживальної частини

снаряда забезпечує ефект світлоповернення, достатній для реєстрації доплерівського зсуву частот. Для збільшення концентрації локальних максимумів на апертурі фотоприймача доцільно використовувати світлоповертальне покриття на основі мікроскопуюлок малого діаметра (до 50 мкм) та однорідної форми.

Показано, що відносне збільшення маси та розмірів снаряда, спричинені нанесенням світлоповертального покриття на його оживальну частину, залежно від типу снаряда не перевищують відповідно 0,10 % та 0,025 % від його вихідних маси і довжини. Отже, ефект від збільшення маси та розмірів снаряда є нехтовно малим і не спроможний чинити помітного впливу на його балістичні характеристики під час руху в каналі ствола.

Отримано криві швидкості руху снаряда у каналі ствола, за якими встановлено стійкість вимірювального сигналу на ділянках із просторовою неузгодженістю лазерних променів на поверхні снаряда. Установлено, що вид отриманих експериментально кривих швидкості відповідає очікуваному характеру збільшення швидкості руху снаряда в каналі ствола дослідного макета. Підтверджено адекватність математичної моделі засобу вимірювання, отриманої теоретичним шляхом.

Результати досліджень можуть бути покладені в основу подальших робіт зі створення засобу вимірювання швидкості руху снаряда у каналі ствола, який дозволить визначати балістичні елементи пострілу експериментальним шляхом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Серебряков М.Е. (1962) Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет [Текст] / М.Е. Серебряков — М.: Государственное научное издательство Оборонгиз (Serebryakov M.E. (1962) Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem i porokhovyykh raket. Moscow). — 702 c/s.
2. Carlucci D.E., Jacobson S.S. (2008) Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition — NW.: CRC Press Taylor & Francis Group., — 502 p.
3. Крюков О.М. (2013) Prospects of experimental determination of ballistic elements of firing [Текст] / О.М. Крюков, В.Г. Мудрик // АБВ МВСУ: наукове видання — Х.: Збірник наукових праць (Kriukov O.M. (2013) Prospects of experimental determination of ballistic firing elements / O.M. Kriukov, V.H. Mudrik // Zbirnyk naukovykh prats Akademiyi vnutrishnikh viysk MVS Ukrainy). — Вип./Issue 1(21). — С/Р. 21—24.
4. Крюков О.М. (2009) Проблеми вимірювального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О.М. Крюков, О.А. Александров // ХНУПС: наукове видання — Х.: Збірник наукових праць (Kriukov O.M., Aleksandrov O.A. (2009) Problemy vymirivannoho kontroliu parametriv vnutrishnobalistychnykh protsesiv // Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh syl). — Вип./Issue 1. — С/Р. 150—152.
5. Вимірювання швидкості руху металного елемента в каналі ствола на основі оптичного диференціального доплерівського методу [Текст] / О.М. Крюков, Г.М. Доля, О.І. Біленко, В.Г. Мудрик (2013) Метрологія та прилади (Kriukov O.M., Dolia H.M., Bilenko O.I., Mudrik V.H. (2013) Vymirivannia shvydkosti rukhu metalnoho elementa v kanali stvola na osnovi optychnoho dyferentsialnoho doplerivskoho metodu // Metrolohiia ta prylady). — Вип./Issue 4. — С/Р. 56—60.
6. Крюков О. М. (2016) Оцінювання похибки лазерного доплерівського засобу вимірювання швидкості руху металних елементів у каналах стволів вогнепальної зброї [Текст] / О.М. Крюков, В.Г. Мудрик, І.О. Чадаєв // Метрологія та прилади (Kriukov O.M. (2016) Otsiniuvannia pokhybky lazernoho doplerivskoho zasobu vymirivannia shvydkosti rukhu metalnykh elementiv u kanalah stvoliv vohnepalnoi zbroi // Metrolohiia ta prylady). — Вип./Issue 1 (57). — С/Р. 64—69.
7. О.М. Крюков, Г.М. Доля, В.Г. Мудрик, О.А. Надь, О.А. Коваль (2014) Лазерний доплерівський засіб вимірювання швидкості руху металного елемента в каналі ствола: будова та оброблення вимірювальної інформації [Текст] / Метрологія та прилади (Kriukov O.M., Dolia H.M., Mudrik V.H., Nad O.A. Koval O.A. (2014) Lazernyi doplerivskiy zasib vymirivannia shvydkosti rukhu metalnoho elementa v kanali stvola: budova ta obrobлення vymirivannoi informatsii // Metrolohiia ta prylady). — Вип./Issue 1(45). — С/Р. 151—154.
8. Крюков О.М. (2017) Алгоритмічні основи функціонування засобу вимірювання швидкості руху металного елемента в каналі ствола [Текст] / О.М. Крюков, В.Г. Мудрик // Метрологія та прилади (Kriukov O.M. (2017) Algorithmic bases of functioning of a means for measuring the velocity of a metal element in the trunk channel [Text] / O.M. Kriukov, V.G. Mudrik // Metrology and Instruments). — Вип./Issue 1(63). — С/Р. 67—71.
9. Крюков О.М. (2013) Дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия объектов со световозвращающей поверхностью [Текст] / А.М. Крюков, Г.Н. Доля, В.Г. Мудрик // Прикладная радиоэлектроника (Kriukov A.M., Dolya G.N., Mudrik V.G. (2013) Differential Doppler laser anemometry of objects with retroreflecting surface // Applied Radio Electronics). — Том/Vol. 12. — Вип./Issue 3. — С/Р. 436—441.
10. John Lloyd. A brief history of retroreflective sign face sheet materials. The principles of retroreflection. (Електрон. ресурс) — Режим доступу: <http://www.rema.org.uk/pdf/history-retroreflective-materials.pdf>.
11. Біленко А.І., Афанасьєв В.В. (2007) Вплив параметрів заряджання на початкову швидкість кулі // Вісник НТУ «ХПІ» (Bilenko A.I., Afanasiev V.V. (2007) Vplyv parametriv zariadzhannia na pochatkovu shvydkist kulii // Vistnyk NTU «KhPI»). — № 11. С/Р. 33—37.

Отримано / received: 09.04.2019.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.В. Полярусом (Україна).
Prof. O.V. Poliarus, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.

УДК 531.76:681.78

О.М. Крюков, В.Г. Мудрик

Національна академія Національної гвардії України, Харків

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПОХИБОК ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ МЕТАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТУ В КАНАЛІ СТВОЛА СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ

В роботі проведений аналіз джерел виникнення похибок засобу вимірювання швидкості руху метального елемента в каналі ствола. Встановлено зв'язок між характеристиками складових похибки і впливними величинами. За кожним з джерел отримано вирази для складових похибки засобу вимірювання. Запропонована узагальнена математична модель інструментальної похибки, наведено інтервальну оцінку меж її допустимих значень.

Ключові слова: відносна похибка, математична модель, стрілецька зброя, засіб вимірювання, швидкість руху.

Вступ

Постановка проблеми. Значний інтерес при проектуванні, модернізації та оцінці стану стрілецької зброї і боєприпасів представляють відомості про балістичні елементи пострілу – залежності зміни тиску $P(t)$ порохових газів та швидкості $V(t)$ метального елемента (МЕ) в функції часу його руху в каналі ствола (КС) від початку першого періоду пострілу до моменту виходу з дульного отвору [1, 2].

Одним з перспективних шляхів отримання достовірної інформації про балістичні елементи пострілу є реалізація вимірювання миттєвих значень швидкості руху МЕ в КС під час пострілу [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В основу відомого засобу вимірювання миттєвих значень швидкості руху МЕ в КС (рис. 1) [4] покладено подвійну диференційну схему лазерної доплерівської анемометрії [5].

Метод вимірювання базується на виділенні та реєстрації доплерівського зсуву частот (ДЗЧ) F між двома хвилями 10, 11 (рис. 1) когерентного лазерного випромінювання частотою f , які спрямовуються на МЕ 7 під різними кутами нахилу α та β . Для збільшення відношення "сигнал/завада" на МЕ наноситься світлоповертаюче покриття 8 на основі мікроскопулюк.

Вихідним сигналом оптичної частини засобу вимірювання є ДЗЧ [5, 6]

$$F = \frac{2fV}{c}(\cos\alpha - \cos\beta), \quad (1)$$

де c – швидкість світла

Сигнал на виході фотоприймача 5 у вигляді фотоструму перетворюється на напругу. Миттєве значення частоти цієї напруги несе інформацію про значення швидкості руху МЕ.

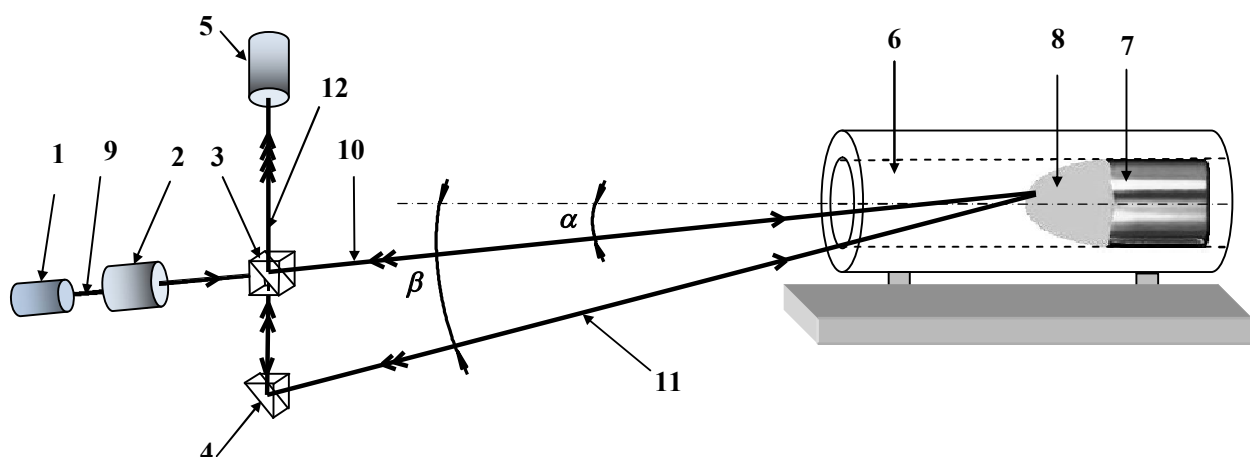


Рис. 1. Засіб вимірювання швидкості руху метального елемента в каналі ствола:
1 – лазер; 2 – коліматор; 3 – світлоподільна прямокутна призма; 4 – відбивач; 5 – фотоприймач;
6 – канал ствола; 7 – метальний елемент; 8 – світлоповертаюча поверхня, що нанесена на метальний елемент; 9 – первинний лазерний промінь; 10, 11 – зондувальні промені;
12 – випромінювання, що є результатом інтерференції чотирьох відбитих від світлоповертаючого покриття променів

При практичній реалізації засобу вимірювання доцільно перетворювати аналоговий сигнал на цифровий з подальшим застосуванням алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), який дозволяє визначати спектральний склад вимірювального сигналу. Для виконання розрахунків, пов'язаних з алгоритмом ШПФ, до складу засобу вимірювання вводиться обчислювальний компонент.

Відомі засоби вимірювання швидкості руху (ЗВШР) МЕ в КС [7] за використаними технічними рішеннями суттєво відрізняються від запропонованого ЗВ, оскільки передбачають використання електромагнітних хвиль в радіодіапазоні, врізання окремих елементів в КС, а також мають відмінності в умовах проведення вимірювань [8 – 10]. Тому у літературних джерелах відсутній аналіз похибок ЗВШР МЕ в КС, та на даний час залишається невирішеною проблема [11] кількісної оцінки впливу характеристик такого ЗВ на точність вимірювань.

Метою статті є розроблення математичних моделей складових похибки ЗВШР МЕ в КС, їх аналіз та кількісне оцінювання.

Передбачається отримати узагальнену математичну модель похибки у вигляді виразу для границь її допустимих значень.

Виклад основного матеріалу

На основі аналізу схеми ЗВШР МЕ в КС (рис. 1), методу вимірювання, особливостей явища пострілу та умов проведення вимірювань (зокрема, швидкоплинність процесу, висока швидкість руху МЕ), визначимо основні джерела складових інструментальної похибки, а також проведемо дослідження впливу вказаних джерел на похибку засобу вимірювання. Виникнення похибки ЗВШР МЕ в КС обумовлюється:

- відхиленням значень параметрів елементів оптичної схеми;
- недосконалістю алгоритму, який реалізовано в обчислювальному компоненті;
- наявністю обертового руху МЕ в КС.

За технологічних або експлуатаційних відхилень параметри елементів оптичної схеми (частота лазерного випромінювання f , кути направлення лазерних променів α та β) можуть набувати приростів Δf , $\Delta \alpha$, $\Delta \beta$, кожний з яких змінить значення ДЗЧ до відповідних значень:

$$f' = \frac{2fV}{c}(\cos \alpha - \cos \beta); \quad (2)$$

$$f'_\alpha = \frac{2fV}{c}(\cos \alpha' - \cos \beta); \quad (3)$$

$$f'_\beta = \frac{2fV}{c}(\cos \alpha - \cos \beta'), \quad (4)$$

які відрізняються від номінального значення F .

При цьому

$$f' = f + \Delta f; \quad (5)$$

$$\alpha' = \alpha + \Delta \alpha; \quad (6)$$

$$\beta' = \beta + \Delta \beta. \quad (7)$$

З урахуванням (5) – (7) вирази для абсолютних ΔF_f , ΔF_α , ΔF_β та відносних δF_f , δF_α , δF_β відхилень ДЗЧ можна подати у вигляді

$$\Delta F_f = \frac{2V}{c}(\cos \alpha - \cos \beta) \cdot \Delta f, \quad (8)$$

$$\delta F_f = \frac{\Delta f}{f}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta F_\alpha &= F'_\alpha - F = \\ &= \frac{2fV}{c}(\cos \alpha' - \cos \beta) - \frac{2fV}{c}(\cos \alpha - \cos \beta) = \\ &= \frac{2fV}{c}(\cos(\alpha + \Delta \alpha) - \cos \alpha). \end{aligned} \quad (10)$$

Використовуючи формулу для різниці косинусів, отримуємо

$$\begin{aligned} \Delta F_\alpha &= 2fV/c \times \\ &\times \left(-2 \sin \frac{\alpha + \Delta \alpha + \alpha}{2} \cdot \sin \frac{\alpha + \Delta \alpha - \alpha}{2} \right) = \\ &= \frac{2fV}{c} \left(-2 \sin \frac{2\alpha + \Delta \alpha}{2} \cdot \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Враховуючи, що відповідно до [12]

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1, \quad (12)$$

остаточний вираз для ΔF_α можна подати у вигляді

$$\Delta F_\alpha = -\frac{2fV}{c}(\sin \alpha) \cdot \Delta \alpha. \quad (13)$$

Аналогічно отримуємо й вираз для ΔF_β

$$\Delta F_\beta = \frac{2fV}{c}(\sin \beta) \cdot \Delta \beta. \quad (14)$$

Відносні відхилення подамо у вигляді

$$\delta F_\alpha = \frac{\Delta F_\alpha}{F} = -\frac{\sin \alpha \Delta \alpha}{\cos \alpha - \cos \beta}; \quad (15)$$

$$\delta F_\beta = \frac{\Delta F_\beta}{F} = \frac{\sin \beta \Delta \beta}{\cos \alpha - \cos \beta}. \quad (16)$$

Проведемо кількісну оцінку цих складових.

Для визначення f застосовують високоточні засоби вимірювання довжини хвилі лазерного випромінювання, наприклад, прилад SHR [13]. Даний ЗВ дозволяє визначати довжину хвилі як імпульсного, так і неперервного випромінювання із межею допустимої абсолютної похибки ± 3 пм. За таких умов складова δF_f не перевищуватиме 0,0006% (незалежно від типу стрілецької зброї та швидкості руху МЕ).

Кути спрямування лазерних променів α та β визначаються за допомогою гоніометрів-спектрометрів (ГС) [14]. Розповсюджені моделі гоніометрів ГС-5, ГС-2, ГС-1М, ГС-1Л, при цьому найбільш до-

цільним є використання моделі ГС-1Л, межа допустимої абсолютної похибки якого при вимірюванні кутів не перевищує $0,00028^\circ$. З аналізу схеми ЗВШР (рис. 1), виразу (1) і виразів (15, 16) слідує, що максимальне значення складові δF_α та δF_β матимуть при використанні зброї малого калібру з довгим КС, а також високою швидкістю руху МЕ (наприклад, АК-74 калібру 5,45 мм, довжиною КС 372 мм, дульною швидкістю МЕ 900 м/с). За вихідних даних, притаманних 5,45 мм АК-74 ($\alpha=0,42^\circ$; $\beta=0,61^\circ$; $f=0,564$ ПГц) отримаємо $\delta F_\alpha=0,12\%$, $\delta F_\beta=0,17\%$. Для вихідних даних, що притаманні зброї з більшим калібром та меншою довжиною КС ($\alpha=3,55^\circ$; $\beta=4,89^\circ$; $f=0,564$ ПГц), а також меншою дульною швидкістю (наприклад, 9 мм ПМ калібру 9 мм, довжина КС 93 мм, дульна швидкість МЕ 300 м/с), отримаємо $\delta F_\alpha=0,018\%$, $\delta F_\beta=0,024\%$.

Поява похибки обчислювального компоненту зумовлюється обмеженістю розрядності операндів та недосконалістю алгоритму, який реалізує спектральний аналіз сигналу на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Для моделювання похибки обчислювального компоненту ЗВШР запропоновано методику, що передбачає проведення чисельного експерименту на ПЕОМ. Така методика ґрунтується на синтезі сигналу із поліноміальною частотною модуляцією (ПЧМ) з доданими до нього завадами, реалізації ШПФ на ділянках ПЧМ сигналу, відшуванні частоти домінуючої гармоніки та її порівнянні з розрахунковими (еталонними) даними.

Частота сигналу із ПЧМ змінюється за законом поліному n -го ступеню. Нормований ПЧМ - сигнал з нульовою початковою фазою можна представити як

$$y = \sin \left[\left(\sum_{i=0}^m a_i \cdot t^i \right) \cdot t \right]. \quad (17)$$

Такий сигнал синтезується з інтервалом дискретизації Δt для заданих тривалості часу T та кінцевої частоти F_k , які залежать від характеристик конкретного зразка зброї (тривалості пострілу та дульної швидкості). Загальна кількість N дискретних відліків дорівнює $T/\Delta t$ та обирається з урахуванням значення F_k . Відомі коефіцієнти a_i поліному дозволяють визначити розрахункове (еталонне) миттєве значення частоти F_n сигналу в довільний дискретний момент часу $t_n=n\Delta t$. Оскільки реальний вимірювальний сигнал має форму, яка спотворена завадами, нестабільністю напруги електроживлення, тепловим рухом заряджених часток в фотоприймачеві і провідниках, при проведенні обчислювального експерименту до ПЧМ сигналу (17) додатково вводиться флуктуаційний шум u_ϕ , а також стаціонарна полігармонічна перешкода u_z

$$y_z = \sum_{j=1}^l K_j \sin(\omega_j t), \quad (18)$$

де K_i – рівень i -ої гармоніки; ω_i – кругова частота i -ої гармоніки.

Отже, синтезований сигнал має вигляд

$$y_{\text{заг}} = y + y_z + u_\phi, \quad (19)$$

Цей сигнал реєструється у формі двовимірної матриці (y_n, t_n) з прив'язкою до відповідних миттєвих значень часу t_n .

Методика обробки синтезованого сигналу полягає в такому:

- обирається точка n на вісі часу;
- формується симетричний інтервал із L відліків сигналу в околі цієї точки, тривалість такого інтервалу часу t_a становить TL/N ;
- для обраної множини L миттєвих значень сигналу виконується операція ШПФ та визначається осереднений на інтервалі часу t_a спектр ділянки сигналу;
- визначається частота $F_{n \text{ осн}}$ основної гармоніки, яка є домінуючою;
- визначається похибка обчислювального компоненту у відносній формі.

$$\delta F_{\text{ок}} = \frac{F_{n \text{ осн}} - F_n}{F_n}. \quad (20)$$

За запропонованою методикою для найбільш характерних (для реальних зразків стрілецької зброї) наборів вихідних даних було проведено моделювання похибки обчислювального компоненту ЗВШР в математичному пакеті OriginPro. Наприклад, синтезувалися та оброблялися сигнали з тривалістю 0,001 с та максимальною частотою 100 кГц (відповідає даним для 5,45 мм АК-74), тривалістю 0,0005 с та максимальною частотою 2 МГц (відповідає даним для 9 мм ПМ) та інші. Приклад спектрограми для певної ділянки сигналу подано на рис. 2. Результати експерименту показали, що відносна похибка $\delta F_{\text{ок}}$ перебуває в інтервалі значень $\pm 0,13 \dots 0,4 \%$.

Обертальний рух МЕ в КС спричинений наявністю нарізів в ньому. Зазвичай, нарізи мають постійний нахил по всій довжині нарізної частини КС (нарізи постійної крутизни). Однією з основних характеристик нарізів в КС є довжина їх ходу η [2], яка дорівнює шляху МЕ, протягом якого останній здійснює один повний оберт навколо позовжньої вісі.

Розглянемо характер впливу обертального руху МЕ в КС на значення ДЗЧ F .

В загальному випадку точка зондування МЕ лазерними променями не лежить в площині зондування, а може зсуватися в поперечному напрямку на певну відстань r від площини зондування. Представимо в поперечному перерізі КС (рис. 3) розташування векторів швидкості $\vec{V}$ поступального руху точки МЕ та швидкості $\vec{V}_{\text{об}}$ цієї точки, яка зумовлена обертанням МЕ.

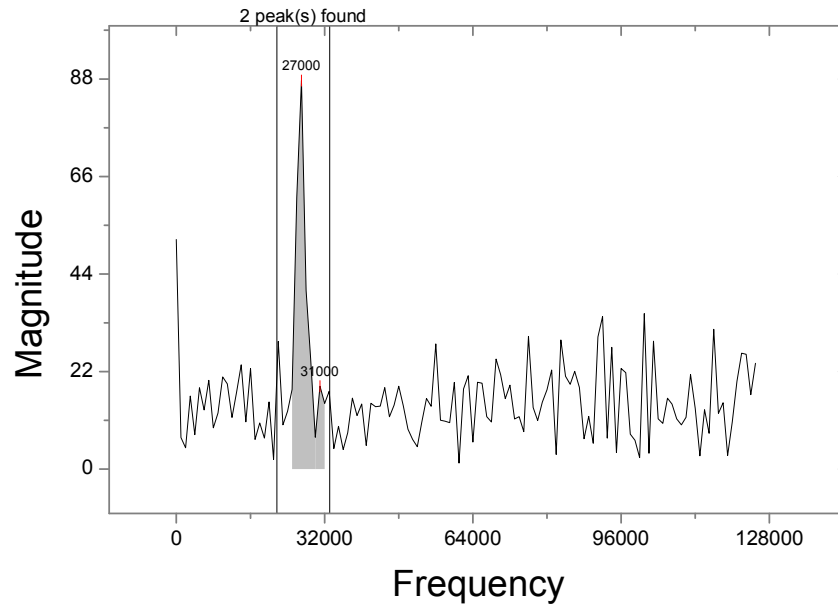
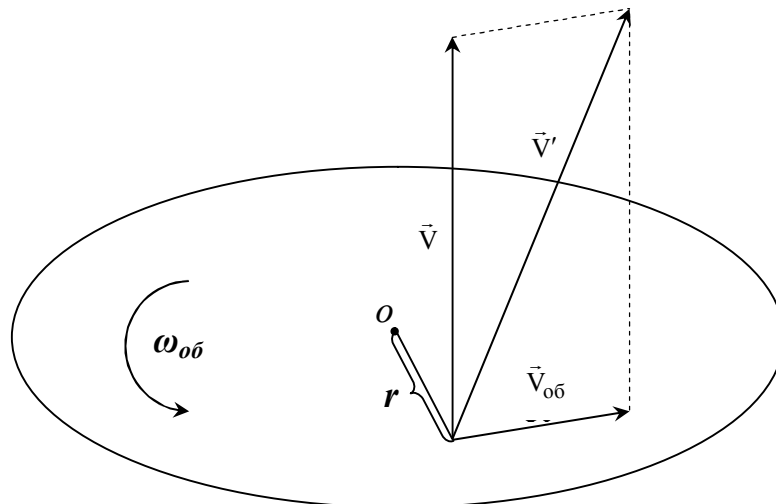
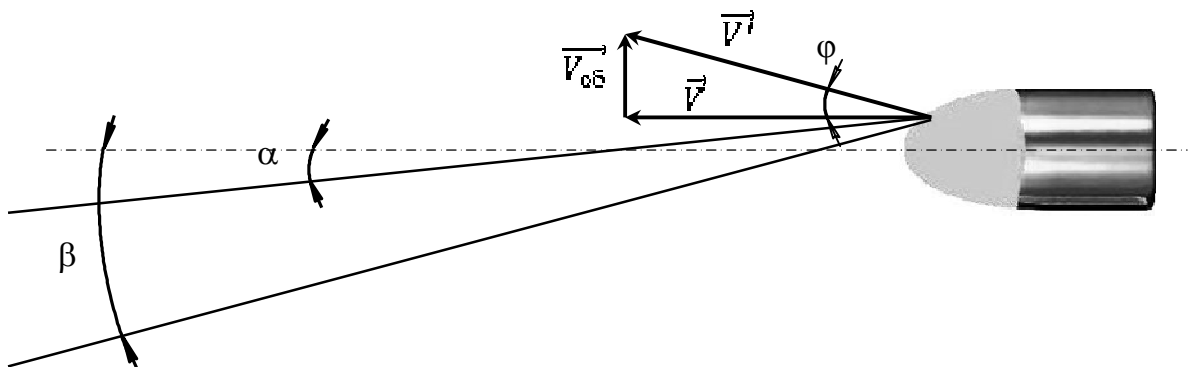


Рис. 2. Результати спектрального аналізу фрагмента сигналу з використанням програми OriginPro

Рис. 3. Розташування векторів $\vec{V}$, $\vec{V}_{об}$, $\vec{V}'$ в просторі

Оскільки вектор $\vec{V}'$ відхиляється від вектору $\vec{V}$, але залишається в площині зондування,

значення кутів спрямування лазерних променів на МЕ зміняться на кут φ (рис. 4), спотворені кути зондування α' та β' становитимуть $\alpha' = \alpha + \varphi$, $\beta' = \beta + \varphi$.

Рис. 4. Кути α , β та φ в площині зондування

Сума $\vec{V}'$ векторів швидкості $\vec{V}$ поступального руху точки МЕ та швидкості $\vec{V}_{об}$ є реальною швидкістю руху точки МЕ, в якій відбувається його зондування лазерними променями. Враховуючи, що $V_{об} = \omega_{об} \cdot r$, визначимо вираз для V' , відповідно до рис. 3:

$$V' = \sqrt{(\omega_{об} \cdot r)^2 + V^2}. \quad (21)$$

Виходячи із того, що МЕ при проходженні відстані, що дорівнює довжині ходу нарізів η , обертається на кут 2π , встановимо зв'язок між кутом повороту МЕ та пройденим шляхом:

$$\varphi = 2\pi l / \eta. \quad (22)$$

Продиференціюємо вираз (22) за часом:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{2\pi}{\eta}. \quad (23)$$

Оскільки $\frac{d\varphi}{dt}$ є кутовою швидкістю ω , а $\frac{dl}{dt}$ – лінійною швидкістю V руху МЕ, отримаємо

$$\omega_{об} = \frac{2\pi V}{\eta}. \quad (24)$$

Значення ДЗЧ F' , що піддається змінюванню за рахунок обертального руху МЕ, матиме вигляд

$$F'_{об} = \frac{2f}{c} V' (\cos \alpha'' - \cos \beta''). \quad (25)$$

Відносну похибку вимірювання ДЗЧ $\delta F_{об}$ подамо у вигляді

$$\delta F_{об} = \frac{F'_{об} - F}{F}. \quad (26)$$

Використовуючи вирази (1) та (25), подамо значення $\delta F_{об}$ у вигляді

$$\delta F_{об} = \frac{2f}{c} \times \frac{V' (\cos \alpha'' - \cos \beta'') - V (\cos \alpha - \cos \beta)}{\frac{2f}{c} V (\cos \alpha - \cos \beta)}, \quad (27)$$

після скорочень отримаємо

$$\delta F_{об} = \frac{V' (\cos \alpha'' - \cos \beta'')}{V (\cos \alpha - \cos \beta)} - 1. \quad (28)$$

Враховуючи вирази (21) та (24), а також вирази для α'' та β'' , скористаймося тригонометричними формулами приведення і отримаємо вираз для $\delta F_{об}$

$$\delta F_{об} = \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{2\pi V}{\eta} \cdot r \right)^2 + V^2 \right]}}{V \cdot (\cos \alpha - \cos \beta)} \times \frac{\left(\cos \alpha \cdot \cos \varphi - \sin \alpha \cdot \sin \varphi - \cos \beta \cdot \cos \varphi + \sin \beta \cdot \sin \varphi \right)}{V \cdot (\cos \alpha - \cos \beta)} - 1. \quad (29)$$

У цьому виразі добутками $\sin \alpha \cdot \sin \varphi$ та $\sin \beta \cdot \sin \varphi$ можна знехтувати, оскільки кути α та β малі, а φ є близьким до нуля.

Також, враховуючи що

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sqrt[2]{1 + \Delta x} = 1 + \frac{\Delta x}{2} \quad [12],$$

після відповідних перетворень отримаємо

$$\delta F_{об} = \left[2 \left(\frac{\pi \cdot r}{\eta} \right)^2 + 1 \right] \cdot \cos \varphi - 1. \quad (30)$$

Оскільки φ є близьким до нуля, можна вважати, що $\cos \varphi \approx 1$, тому

$$\delta F_{об} = 2 \left(\frac{\pi \cdot r}{\eta} \right)^2. \quad (31)$$

Із виразу (31) можна побачити, що відносна похибка вимірювання ДЗЧ $\delta F_{об}$, яка викликана обертальним рухом МЕ, залежить тільки від довжини ходу нарізів η та значення r (відстані від точки потрапляння лазерного променя на поверхню МЕ до площини зондування).

Проведемо кількісну оцінку похибки $\delta F_{об}$ для вихідних даних, що відповідають відомим зразкам стрілецької зброї, враховуючи, що значення r визначається візуально окомірним способом та не перевищує ± 1 мм. Так, для 9мм ПМ, при $\eta=280$ мм, відносна похибка вимірювання ДЗЧ $\delta F_{об} \leq 0,013\%$, а для 5,45 мм АК-74, при $\eta=200$ мм, $\delta F_{об} \leq 0,025\%$. Таким чином, для усіх можливих наборів вихідних даних граничне значення похибки $\delta F_{об}$ знаходиться в інтервалі $0,025 \dots 0,05 \%$.

Вираз для підсумкової інструментальної похибки отримаємо з урахуванням кореляційного зв'язку між складовими δF_{α} та δF_{β} , який має місце внаслідок застосування одного засобу вимірювання для обох кутів α та β :

$$\delta \Sigma = \sqrt{\delta F_f^2 + (\delta F_{\alpha} + \delta F_{\beta})^2 + \delta F_{ок}^2 + \delta F_{об}^2}. \quad (32)$$

Кількісне оцінювання за виразом (32) дозволяє стверджувати, що границі відносної похибки ЗВШР знаходиться в межах $\pm(0,14 \dots 0,5)\%$.

Із отриманих розрахункових даних можна зробити висновок, що точність визначення кутів направлення лазерних променів на МЕ α та β суттєво впливає на значення допустимої відносної похибки ЗВШР МЕ в КС.

За необхідності зменшення похибки ЗВШР МЕ в КС доцільно використовувати більш точні засоби вимірювання кутів направлення лазерних променів.

Висновки

Виникнення інструментальної похибки ЗВШР МЕ в КС обумовлюється відхиленням значень параметрів елементів оптичної схеми, недосконалістю

алгоритму, який реалізовано в обчислювальному компоненті, а також наявністю обертального руху МЕ в КС.

Встановлено зв'язок між характеристиками складових похибки і впливними величинами, отримані математичні моделі складових похибки засобу вимірювання. Проведено кількісне оцінювання складових похибки, показано, що гранична похибка засобу вимірювання може бути забезпечена на рівні $\pm(0,14...0,5)\%$.

Результати роботи можуть бути використані під час досліджень, спрямованих на уточнення даних про балістичні елементи пострілу.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на обґрунтування перспективних шляхів зменшення похибки ЗВШР МЕ в КС, зокрема, за рахунок використання високоточних методів і засобів контролю кутів падіння лазерних променів та удосконалених алгоритмів цифрового оброблення сигналів.

Список літератури

1. Серебряков, М.Е. Внутренняя баллистика [Текст] / М.Е. Серебряков – М.: Оборониздат ГИОП, 1949. – 469 с.
2. Голомбовский, А.К. Теория и расчет автоматического оружия [Текст] / А.К. Голомбовский. – Пенза: ПВАИУ, 1973. – 492 с.
3. Крюков, О.М. Перспективи експериментального визначення балістичних елементів пострілу [Текст] / О.М. Крюков, В.Г. Мудрик // Збірник наук. праць Акад. ВВ МВС України. – 2013. – Вип. 1. – С. 21–24
4. Патент: 88172 Україна, МПК G 01 S 17/02 (2006.01) Лазерний доплерівський вимірювач швидкості руху метального елемента в каналі ствола [Текст] / Крюков О.М., Доля Г.М., Мудрик В.Г. – Заявл. 10.06.2013; Опубл 11.03.2014; – 8 с.
5. Крюков, А.М. Дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия объектов со световозвращающей поверхностью [Текст] / А.М. Крюков, Г.Н. Доля, В.Г. Мудрик // Прикладная радиоэлектроника, – Х.: ХНУРЭ, 2013. – Т. 12, № 3. – С. 436–441.
6. Лазерный доплеровский засіб вимірювання швидкості руху метального елемента в каналі ствола: будова та оброблення вимірювальної інформації [Текст] / О.М. Крюков, Г.М. Доля, В.Г. Мудрик, О.А. Надь, О.А. Коваль // Метрологія та прилади. – Х.: ХНУРЭ, 2014. – Вип. 1 (45). – С. 151–154.
7. Михайлов, К.В. Экспериментальная баллистика. Приборы и методы баллистических измерений [Текст] / К.В. Михайлов – София: ВТС, 1976. – 388 с.
8. Patent 2691761 США, МКИ G 01 S 13/58. Microwave measuring of projectile speed [Text] / Smith J. N., Oak R., Tenn. – № 6088; claimed. 03.02.1948; published 12.10.1954, НКИ 342/105; 73/167. – 6 p.
9. Patent 4457206 США, МКИ G 01 S 13/58; F 42 C 17/04. Microwave – type projectile communication apparatus for guns [Text] / Toullos P. P., Hartman K. – № 06/269,489; claimed 02.06.1981; published 03.07.1984, НКИ 89/14.5. – 37 p.
10. Patent 0415906 Германия, МКИ G 01 S 13/58; G 01 P 3/66. Method and device for the determination of parameters of motion [Text] / Reinhard, B., Bernhard Z. – № 19900809; claimed 09.08.1990; published 10.02.1993, НКИ G 01 S 13/58 F; G 01 P 3/66 B. – 8 p.
11. Крюков, О.М. Проблеми вимірювального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О.М. Крюков, О.А. Александров // Честь і закон. – 2009. – № 2. – С. 79–89
12. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М.Я. Выгодский. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с.
13. Высокоточный широкодиапазонный измеритель длины волны [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://solarlaser.com/ru/products/high-resolution-wavelength-meters/high-resolution-wide-range-wavelength-meter-model-shr>.
14. Гониометр-спектрометр [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.rostest.ru/Goniometer%20spectrometer%20GS-2.php>.

Надійшла до редколегії 7.02.2015

Рецензент: д-р військ. наук, проф. Г.А. Дробаха, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Харків.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТЕЙ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МЕТАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА В КАНАЛЕ СТОЛА СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

А.М. Крюков, В.Г. Мудрик

В работе проведён анализ источников возникновения погрешностей средства измерения скорости движения метаемого элемента в канале ствола. Установлена связь между характеристиками составляющих элементов погрешности и влияющих величин. По каждому из источников получены выражения для составляющих погрешности средства измерения. Предложена обобщенная математическая модель инструментальной погрешности, приведена интервальная оценка границ её допустимых значений.

Ключевые слова: относительная погрешность, математическая модель, стрелковое оружие, средство измерения, скорость движения.

MATHEMATICAL MODELS OF ERRORS OF MEASURING TOOL SPEED OF THROWN ELEMENT IN THE BORE OF SMALL ARMS

O.M. Kryukov, V.H. Mudrik

In this paper the analysis of the sources of errors occurrence of measuring tool of the speed of the thrown element in the bore was carried out. The connection between the characteristics of the constituent elements of the error and influence quantities was established. The formulas for the components of the error of measuring tool were obtained for each of the sources. The generalized mathematical model of instrumental error was proposed, the interval estimate of the boundaries of its valid values was presented.

Keywords: relative error, mathematical model, small arms, measuring tool, speed.

УДК 623.094

В.Г. Мудрик, Д.О. Торяник, М.І. Зюбан

Національна академія Національної гвардії України, Харків

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВНУТРІШНЬО-БАЛІСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ

В роботі обґрунтовано параметри, викладено принципи побудови і склад експериментальної установки для дослідження засобу вимірювання швидкості руху метаного елемента в каналі ствола. Розроблено методику проведення експерименту, наведено результати експериментальних досліджень з моделювання процесу пострілу та реєстрації і оброблення вимірювальної інформації. Побудовано експериментальну установку, яка дозволяє моделювати функціонування засобу вимірювання швидкості руху метаного елемента в каналі ствола. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень, яка передбачає варіювання параметрів елементів оптичної і механічної частини установки під час проведення експерименту з метою перевірки адекватності математичної моделі засобу вимірювання.

Ключові слова: експериментальна установка, засіб вимірювання, швидкість руху метаного елемента, лазерна доплерівська анемометрія, балістичні елементи пострілу, вогнепальна зброя, канал ствола.

Вступ

Постановка проблеми. До балістичних елементів пострілу (БЕП) відносяться дані про зміну тиску $P(t)$ порохових газів та швидкості $V(t)$ метаного елемента (МЕ) в функції часу його руху в каналі ствола (КС) від початку першого періоду пострілу до моменту виходу з дульного отвору [1–2].

Визначення точних даних про БЕП є важливим при створенні новітніх зразків зброї, для поточного контролю технічного стану вогнепальної зброї, що знаходиться в експлуатації та ін. [1–2]. В роботі [3] викладено результати установчого експерименту з дослідження працездатності подвійної диференційної схеми лазерної доплерівської анемометрії [4], а також запропоновано математичну модель засобу вимірювання (ЗВ) швидкості руху МЕ. Аналіз джерел похибок ЗВ швидкості руху МЕ проведений в роботі [5].

Результати такого експерименту підтвердили наявність у спектрі змінної складової фотоструму стійкої гармоніки з частотою $F(t)$, що несе інформацію про швидкість $V(t)$ навіть за просторової неузгодженості променів на поверхні МЕ. Це дозволяє стверджувати про можливість використання створеної експериментальної установки для моделювання ЗВ швидкості руху. Таким чином, постає актуальне завдання з реалізації подальших експериментальних досліджень, спрямованих на детальне вивчення процесу функціонування ЗВ за високих швидкостей руху МЕ.

Метою статті є обґрунтування будови експериментальної установки для дослідження ЗВ швидкості руху МЕ в каналі ствола, а також розроблення методики експериментальних досліджень ЗВ за значень швидкостей, наближених до реальних умов пострілу.

Виклад основного матеріалу

Експериментальна установка складається з оптичної, механічної та електронної частин.

До оптичної частини експериментальної установки входять:

- джерело лазерного випромінювання *Laser Pointer* (п. 1, рис. 1). В експерименті використано джерело неперервного режиму роботи потужністю випромінювання 100 мВт і діаметром променя 1 мм двох типів: із довжиною хвилі 532 нм та 650 нм;
- оптичний коліматор (п. 2, рис. 1);
- оптичний відбивач (п. 3, рис. 1): розмір 15×15 мм;
- світлоподільна призма (п. 4, рис. 1): розмір 15×15 мм.

Для спрямування лазерних променів на поверхню МЕ використано систему дзеркал (п. 5, рис. 1).

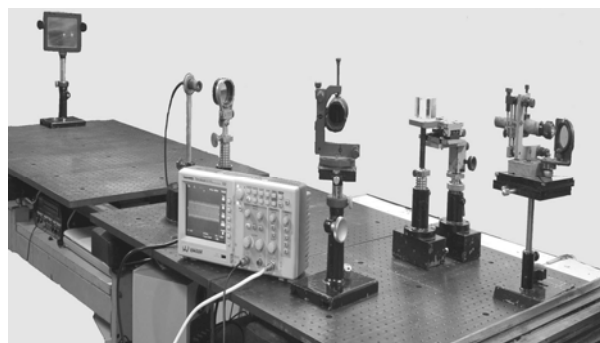


Рис. 1. Оптична частина, фотоприймач та цифровий осцилограф

До механічної частини експериментальної установки (МЧЕУ) входять елементи, робота яких імітує рух МЕ в КС вогнепальної зброї. При цьому конструктивні параметри МЧЕУ максимально наближені до характеристик реальних зразків вогнепа-

льної зброї. Крім того, при розробці МЧЕУ враховані вимоги до безпеки проведення експерименту.

З аналізу характеристик сучасних видів вогнепальної зброї, що знаходяться на озброєнні Національної гвардії України (зокрема, пістолети, автомати, гвинтівки виробництва КП «ФОРТ»), впливають такі вимоги до параметрів МЧЕУ:

- довжина КС – від 0,095 до 0,51 м;
- швидкість руху МЕ – більша за 100 м/с;
- тривалість руху МЕ в КС під час пострілу – 0,006-0,01 с;
- калібр – від 5,45 мм до 18,5 мм.

Отже, для відтворення характеру руху МЕ в КС обрано такі конструктивні параметри елементів МЧЕУ, які дають можливість забезпечити високу швидкість поздовжнього руху МЕ за короткий проміжок часу, при цьому швидкість МЕ по мірі його руху в КС поступово збільшується. Також конструкція МЧЕУ передбачає можливість варіювання середньої та максимальної швидкості руху МЕ. З метою забезпечення вимог безпеки при проведенні експерименту рух МЕ при вильоті з дульного отвору обмежується механічно.

Для приведення МЕ в рух в МЧЕУ використано енергію стисненого повітря. В ході попередніх досліджень встановлено, що використання енергії пружини з високим коефіцієнтом пружності є недоцільним, оскільки при цьому значно ускладнюються як варіювання середньої швидкості руху МЕ (потрібна заміна пружини), так і процес повернення МЧЕУ у вихідний стан (потрібен потужний механізм стиснення пружини). Застосування ж стисненого повітря дозволяє змінювати середню швидкість руху МЕ шляхом зміни тиску.

За еквівалент ствола в МЧЕУ використано металеву трубку (поз. 1, рис. 2) із полірованою внутрішньою поверхнею (для забезпечення малого коефіцієнту тертя). Виходячи із вимог, що висуваються до параметрів МЧЕУ, обрано такі параметри ствола: довжина – 400 мм, діаметр КС – 12 мм.

Ствол розташований на опорах, які призначені для його жорсткого кріплення до монолітної основи. З дульної частини ствол має накидну гайку (поз. 2, рис. 2) із наскрізним отвором (діаметр отвору 10 мм) та пружину, які призначені для збереження цілісності МЕ та запобігання його виходу з КС. З тильної (казенної) частини ствол має різьблення для приєднання до нього муфти разом з електромагнітним клапаном.

За еквівалент МЕ в МЧЕУ використано легкосплавний (із алюмінієвого сплаву) поршень. Діаметр МЕ менший за діаметр КС на 0,15 мм, що дозволяє звести до мінімуму прорив стиснутого повітря між його боковою поверхнею та стінками КС.

Для забезпечення зручності при проведенні декількох «пострілів» із різною середньою швидкістю

МЕ використано резервуар (балон) об'ємом 5 л (поз. 3, рис. 2), в якому знаходиться стиснуте повітря, що нагнітається компресором моделі “Coido 250 Psi” (поз. 4, рис. 2). Даний компресор комплектується манометром та дає можливість створити тиск повітря до 1,5 МПа. Резервуар має систему відводів з вентиллями (для сполучення з компресором, стволом та атмосферою).



Рис. 2. Механічна частина експериментальної установки

Оскільки експеримент передбачає розвинення високої швидкості руху МЕ за короткий проміжок часу, для сполучення резервуара з каналом ствола застосовано високошвидкісний нормально закритий електромагнітний клапан фірми ODE (поз. 5, рис. 2), який забезпечує проходження потрібної кількості стиснутого повітря до МЕ. Такий клапан витримує максимальний тиск на вході 1,6 МПа, а також характеризується високою пропускною спроможністю (270 л/хв.), яка забезпечується великою площиною тарілки клапана.

До електронної частини експериментальної установки входять цифровий осцилограф Tektronix TDS2022B (п.6, рис. 1), фотоприймач HAMAMATSU H6780-20 (п.7, рис. 1), характеристики якого наведені в [6], а також блок електроживлення та управління (рис. 3).

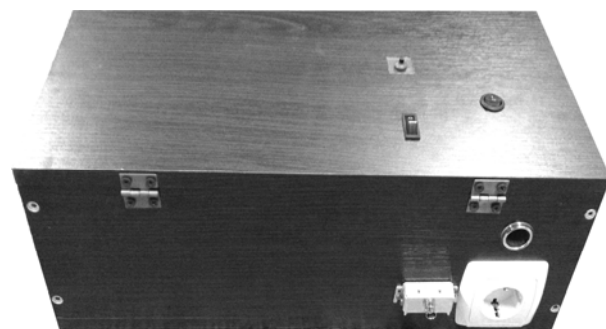


Рис. 3. Блок управління та електроживлення

Блок управління та електроживлення дозволяє дистанційно вмикати (вимикати) компресор, а також вмикати електромагнітний клапан синхронно із запуском розгортки цифрового осцилографу для початку реєстрації вимірювального сигналу. На блоці розташовані: роз'єм (поз. 1, рис. 3) для живлення

компресора; роз'єм (поз. 2, рис. 3) для вмикання електромагнітного клапану; роз'єм (поз. 3, рис. 3) для підключення входу розгортки цифрового осцилографу, а також вмикач для проведення електропуску (поз. 4, рис. 3), який синхронно вмикає елек-

тромагнітний клапан та запускає розгортку осцилографу, і вмикач запуску компресора (поз. 5, рис. 3).

Схема зв'язків між елементами експериментальної установки наведена на рис. 4.

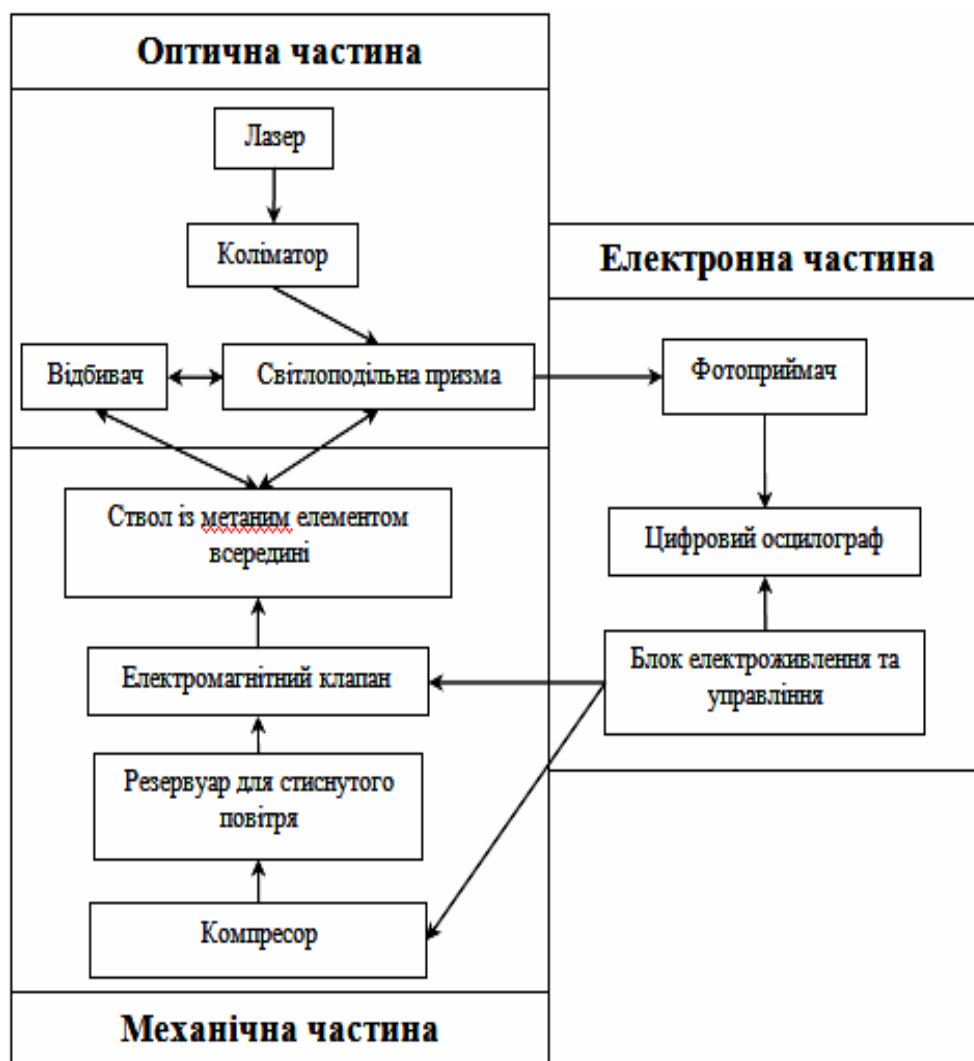


Рис. 4. Структурна схема експериментальної установки

На основі наведених вище принципів та вимог створено експериментальну установку, виконано її монтаж, а також перевірено працездатність та безпечність.

Методика проведення експериментальних досліджень включає підготовку експериментальної установки до проведення вимірювань, проведення експерименту із отриманням вимірювальної інформації та оброблення експериментальних даних.

Підготовка до проведення вимірювань включає такі етапи налаштування оптичної і механічної частини експериментальної установки:

- відтворення бази оптичної схеми (відстань від зовнішньої грані світлоподільної призми до дульного зрізу КС);

- спрямування лазерних променів на поверхню МЕ та формування заданих кутів її зондування α та β ;

- створення заданого тиску в резервуарі;
- налаштування осцилографу відповідно до очікуваних параметрів вимірювального сигналу;
- створення та перевірка електричних і механічних комутацій.

Проведення експерименту передбачає формування заданого закону руху МЕ в КС та ресетрацію вимірювального сигналу.

При проведенні експерименту певні параметри елементів оптичної і механічної частини для кожного “пострілу” мають варіюватися. До змінюваних параметрів належать:

- частота лазерного випромінювання f ;

- кут спрямування лазерного променя α ;
- тиск P повітря в резервуарі.

В табл. 1 наведено схему варіювання змінюваних параметрів.

Таблиця 1

Варіювання вихідних даних
при проведенні експерименту

№ вимірювання Вихідні дані експ. установки	1	2	3	4	5
Тиск, P	P_1	P_2			P_3
Частота лазерного випромінювання, f	f_1	f_2	f_1		f_1
Кут, α	α_1	α_1		α_2	α_1

Необхідність варіювання параметрів елементів оптичної і механічної частини пояснюється таким чином.

З одного боку, при різних значеннях тиску (P_1 , P_2 , P_3 , набори вихідних даних 1, 3, 5) формуються відмінні закони наростання швидкості руху МЕ, що може бути ідентифіковано за розбіжністю отриманих експериментально кривих швидкості.

З іншого боку, при незмінному значенні тиску P_2 , але при різних значеннях частоти лазерного випромінювання f_1 , f_2 та кутів α_1 , α_2 (набори вихідних даних 2, 3, 4) змінюється реєстрований доплерівський зсув частоти, але водночас відповідних змін набуває й коефіцієнт $\frac{2f}{c}(\cos \alpha - \cos \beta)$ [4], який в даному випадку визначається за параметрами експериментальної установки і служить для подальшого розрахунку миттєвих значень швидкості руху МЕ (тут c – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль). Таким чином, за ступенем збігу трьох кривих швидкості, які визначаються на основі експериментальних даних для доплерівського зсуву частоти, можна судити про адекватність математичної моделі ЗВ, отриманої в [4] теоретичним шляхом.

З метою обмеження впливу випадкових факторів кожне вимірювання швидкості руху МЕ в КС має виконуватись тричі для кожного набору вихідних даних [7–8]. В разі виявлення значних відхилень одного результату від двох інших проводяться повторні вимірювання за таких самих вихідних даних.

Проведення експерименту відбувається наступним чином.

Метаний елемент (поршень) знаходиться в крайньому задньому положенні. На МЕ спрямовані лазерні промені під кутами α та β . При вмиканні електроспуску відкривається електромагнітний клапан, при цьому МЕ рухається під дією сили тиску повітря. Одночасно з відкриванням електромагнітного клапану відбувається запуск процесу реєстрації вимірювального сигналу цифровим осцилографом.

Після закінчення вимірювань МЕ повертається у вихідне положення.

Результатами даного етапу експерименту є зареєстровані вимірювальні сигнали у вигляді дискретних значень напруги фотоструму на виході фотоприймача. Кожний з цих сигналів відповідає заданій сукупності вихідних даних, що варіюються згідно з табл. 1.

При обробленні експериментальних даних здійснюється перехід від масивів миттєвих значень напруги фотоструму безпосередньо до залежностей $V(t)$ швидкості руху МЕ від часу. Методика оброблення вимірювальної інформації містить такі етапи:

- імпорт даних для аналізу (відкривання файлів csv-формату, які створені цифровим осцилографом, в обраному програмному математичному пакеті);

- попередня фільтрація (виключення впливу зовнішніх завад);

- виділення для подальшого оброблення часової області зі значущими даними (виключення даних, які не містять корисної інформації, тобто відповідають часу до початку руху МЕ і часу після досягнення МЕ дульного зрізу КС);

- обрання точки на вісі часу та формування симетричного інтервалу відліків напруги в околі цієї точки;

- проведення спектрального аналізу обраного фрагменту сигналу (виконання операції швидкого перетворення Фур'є [9]);

- визначення частоти домінуючої гармоніки фрагменту сигналу;

- приведення частот домінуючих гармонік фрагментів сигналу у відповідність до моментів часу;

- обчислення значень швидкостей руху МЕ відповідно до виразу $F(t) = \frac{2f V(t)}{c}(\cos \alpha - \cos \beta)$,

отриманого в [4], з урахуванням попередньо визначених параметрів елементів експериментальної установки;

- візуалізація отриманої вимірювальної інформації (в таблиці або графічно).

Відповідно до запропонованої методики проведення експериментальних досліджень було виконано операції та отримано результати.

Вихідні дані таблиці 1 варіювалися таким чином: $P_1=600$ кПа; $P_2=1000$ кПа; $P_3=1400$ кПа; $f_1=0,564$ ПГц; $f_2=0,474$ ПГц; $\alpha_1=0,5^\circ$; $\alpha_2=1^\circ$, при цьому $\beta_1=1,5^\circ$.

Отримані експериментальні дані імпортувались до математичного пакету *OriginPro* та аналізувались відповідно до наведеного вище алгоритму.

На рис. 5 наведено приклад осцилограми напруги фотоструму після попередньої фільтрації, яка відповідає першому набору вихідних даних табл. 1.

На рис. 6 наведено приклад результату спектрального аналізу фрагменту сигналу (перший набір вихідних даних), який виконано за допомогою математичного пакету *Origin Pro*. Як видно з рис. 6, домінуюча гармоніка за рівнем значно перевищує завади та побічні гармоніки і добре ідентифікується, а її частота визначається в автоматичному режимі за допомогою вбудованої в пакет *Origin Pro* функції *Quick Peak*.

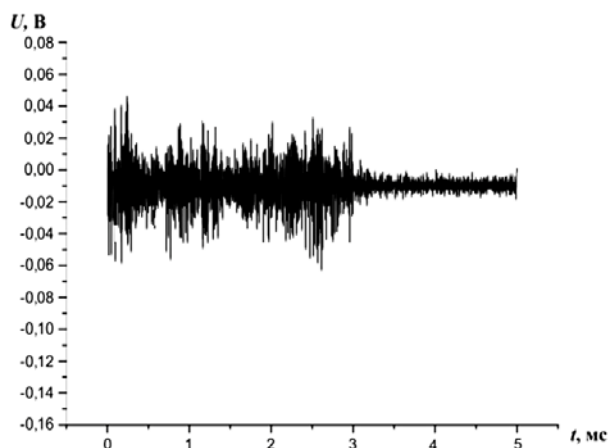


Рис. 5. Осцилограма напруги фотоструму для набору вихідних даних № 1

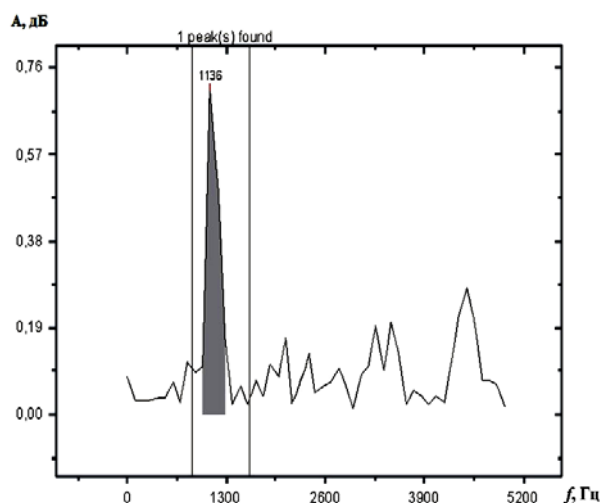


Рис. 6. Спектральна щільність фрагменту сигналу

За результатами визначення частот домінуючих гармонік фрагментів сигналів згідно з математичною моделлю, отриманою в [4], обчислено відповідні значення швидкостей руху МЕ. Отримані криві швидкості руху МЕ в функції часу для усіх наборів вихідних даних подано на рис. 7.

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити такі висновки:

– практично підтверджується наявність стійкого вимірювального сигналу та можливість його реєстрації і обробки в умовах проведення вимірювань, що є близькими до реальних;

– вигляд отриманих кривих відповідає очікуваному характеру наростання швидкості руху МЕ в КС експериментальної установки;

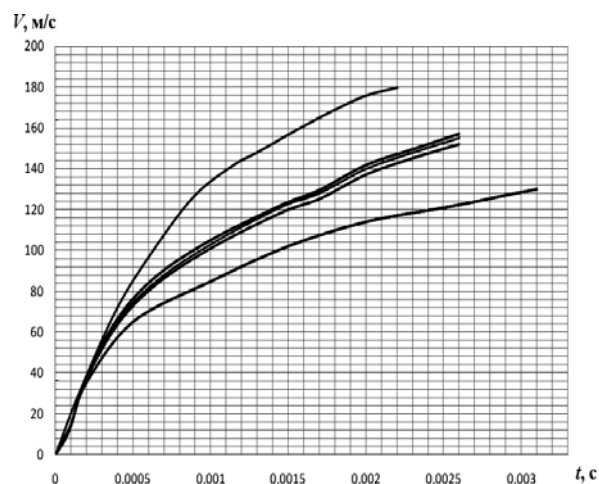


Рис. 7. Графіки залежності швидкості руху МЕ в КС від часу

– наявність просторової неузгодженості лазерних променів на поверхні МЕ на окремих ділянках його руху не призводить до падіння відношення «сигнал/завада» до рівнів, які ускладнюють ідентифікацію домінуючих гармонік доплерівського зсуву частоти;

– обсяг вимірювальної інформації є достатнім для оброблення сигналу та визначення залежностей швидкості руху МЕ в функції часу;

– збіг кривих для наборів вихідних даних 2, 3, 4, які отримані при однакових законах зміни швидкості руху МЕ, свідчить про адекватність математичної моделі, отриманої в [4] (деяка неістотна розбіжність кривих зумовлюється похибками визначення кутів α , β та відхиленням частоти f від паспортного значення).

Висновки

Побудовано експериментальну установку, яка дозволяє моделювати функціонування ЗВ швидкості руху метаного елемента в каналі ствола. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень, яка передбачає варіювання параметрів елементів оптичної і механічної частини установки під час проведення експерименту з метою перевірки адекватності математичної моделі ЗВ.

Результати експериментальних досліджень підтверджують стійкість вимірювального сигналу (зокрема, на ділянках руху МЕ, де спостерігається просторова неузгодженість лазерних променів), можливість реєстрації і оброблення вимірювальної інформації, а також адекватність математичної моделі ЗВ, отриманої теоретичним шляхом.

Список літератури

1. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика [Текст] / М.Е. Серебряков. – М.: Оборониздат ГИОП, 1949. – 469 с.
2. Голомбовский А. К. Теория и расчет автоматического оружия [Текст] / А.К. Голомбовский. – Пенза: ПВАИУ, 1973. – 492 с.
3. Крюков О.М. Перспективи експериментального визначення балістичних елементів пострілу [Текст] / О.М. Крюков, В.Г. Мудрик // Збірник наук. праць Акад. ВВ МВС України. – 2013. – Вип. 1. – С. 21-24.
4. Патент: 88172 Україна, МПК G 01 S 17/02 (2006.01) Лазерний доплерівський вимірювач швидкості руху метального елемента в каналі ствола [Текст] / О.М. Крюков, Г.М. Доля, В.Г. Мудрик. – Заявл. 10.06.2013; Опубл. 11.03.2014. – 8 с.
5. Крюков А.М. Дифференциальная лазерная доплеровская анемометрия объектов со световозвращающей поверхностью [Текст] / А.М. Крюков, Г.Н. Доля, В.Г. Мудрик // ХНУРЕ: науч.-техн. журнал. – Х.: Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – Т. 12, № 3. – С. 436-441.
6. Лазерний доплерівський засіб вимірювання швидкості руху метального елемента в каналі ствола: будова та оброблення вимірювальної інформації [Текст] / О.М. Крюков, Г.М. Доля, В.Г. Мудрик, О.А. Надь, О.А. Коваль // ХНУРЕ: наук.-виробн. ж. – Х.: Метрологія та прилади, 2014. – Вип. 1 (45). – С. 151-154.
7. Михайлов К.В. Экспериментальная баллистика. Приборы и методы баллистических измерений [Текст] / К.В. Михайлов. – София: ВТС, 1976. – 388 с.
8. Patent 2691761 США, МКИ G 01 S 13/58. Microwave measuring of projectile speed [Text] / Smith J.N., Oak R., Tenn. – № 6088; claimed. 03.02.1948; published 12.10.1954, НКІ 342/105; 73/167. – 6 p.
9. Patent 4457206 США, МКИ G 01 S 13/58; F 42 C 17/04. Microwave – type projectile communication apparatus for guns [Text] / Toullos P. P., Hartman K. – № 06/269,489; claimed 02.06.1981; published 03.07.1984, НКІ 89/14.5. – 37 p.
10. Patent 0415906 Германия, МКИ G 01 S 13/58; G 01 P 3/66. Method and device for the determination of parameters of motion [Text] / Reinhard, B., Bernhard Z. – № 19900809; claimed 09.08.1990; published 10.02.1993, НКІ G 01 S 13/58 F; G 01 P 3/66 B. – 8 p.
11. Крюков О.М. Проблеми вимірювального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О.М. Крюков, О.А. Александров // Честь і закон. – 2009. – № 2. – С. 79-89.
12. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М.Я. Выгодский. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с.
13. Высокоточный широкодиапазонный измеритель длины волны [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://solarlaser.com/ru/products/high-resolution-wavelength-meters/high-resolution-wide-range-wavelength-meter-model-shr/>
14. Гониометр-спектрометр [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.rostest.ru/Goniometer%20spectrometer%20GS-2.php>.

References

1. Serebryakov, M.E. (1949), “*Vnutrennyaya balistika*” [Internal ballistics], Oboronizdat GIOP, Moscow, 469 p.
2. Golombovskiy, A.K. (1973), “*Teoria i raschet avtomaticheskogo oruziya*” [Theory and calculation of automatic weapons], PVAEU, Penza, 492 p.
3. Kriukov, O.M. and Mudrik, V.G. (2013), “Perspektivu eksperimentalnogo vuznachennya balistichnih elementiv pos-trilu” [Prospects for the experimental determination of ballistic elements of the shot], *Akad. Of Int. Forses Ukraine*, No. 1, pp. 21-24/
4. Kriukov, O.M., Dolya, G.N. and Mudrik, V.G. (2014), Patent 88172 Ukraine, WPK G 01 S 17/02 (2006.01), “*Lazerniy dopplerivskiy vumiruvach shvudkosti ruhu metalnogo elementu v kanali stvola*” [Laser Doppler meter of the velocity of the throwing element in the trunk channel], Stated. 10.06.2013; Publish 11.03.2014, 8.
5. Kriukov, O.M., Dolya, G.N. and Mudrik, V.G. (2013), “Differenzialnaya lazernaya doplerovskaya anemometriya ob’ektov so svetovozvrashaushej poverhnostju” [Differential laser Doppler anemometry of objects with a retroreflective surface], *HNU of RE: science-techn. Journal, Prikladnaya radioelektronika*, Kharkiv, No. 12 (3), pp. 436-441.
6. Kriukov, O.M., Dolya, G.N., Mudrik, V.G., Nadj, O.A. and Koval, O.A. (2014), “Lazerniy doplerovskiy zasib vumiruvanya shvudkosti ruhu metalnogo elementu v kanali stvola: budova ta obroblennya vumiruvalnoi informacii” [Laser Doppler instrument for measuring the velocity of a metal element in the trunk channel: the structure and processing of measuring information], *HNU of RE: scienc. Journal, Metrologiya ta pruladu*, Kharkiv, No. 1 (45), pp. 151-154.
7. Mihajlov, K.V. (1976), “*Eksperimentalnaya balistica. Priboru I metodu ballisticheskikh izmerenij*” [Experimental ballistics. Instruments and methods of ballistic measurements], VTS, Sophiya, 388 p.
8. Smith, J.N., Oak, R., Tenn (1954), Patent 2691761 USA, WPK G 01 S 13/58 “*Mykrovolnovoe yzmerenye metatel'noy skorosty*” [Microwave measuring of projectile speed], № 6088; Stated. 03.02.1948; Publish. 12.10.1954, NKI 342/105; 73/167, 6.
9. Toullos, P.P. and Hartman, K. (1984), Patent 4457206 USA, WPK G 01 S 13/58; F 42 C 17/04, “*Mykrovolnoviy – pechatayut apparaturu metatel'noy kommunykatsyy dlya ohnestrel'noho oruzhyia*” [Microwave – type projectile communication apparatus for guns], № 06/269,489; Stated. 02.06.1981; Publish. 03.07.1984, NKI 89/14.5, 37.
10. Reinhard, B. and Bernhard, Z. (1993), Patent 0415906 DE, WPK G 01 S 13/58; G 01 P 3/66. “*Metod y ustroystvo dlya opredeleniya parametrov dvizheniya*” [Method and device for the determination of parameters of motion], № 19900809; Stated. 09.08.1990; Publish. 10.02.1993, NKI G 01 S 13/58 F; G 01 P 3/66 B, 8.
11. Kriukov, O.M., Alexandrov, O.O. (2009), “Problemu vumiruvalnogo kontroliu parametriv vnutrishnjobalistichnih procesiv” [Problems of measuring control of the parameters of intolarabik processes], *Chestj i zakon*, No. 2, pp. 79-89.
12. Vugodskiy, M.Ya. (2006), “*Spravochnik po vushej matematike*” [Handbook of Higher Mathematics], AST: Astrel, Moscow, 991 p.
13. “*Vusokotocznuj shirokodiapazonnuj izmeritel dlinu volnu*” [High-precision wide-rangewavelength meter], Available at: <http://solarlaser.com/ru/products/high-resolution-wavelength-meters/high-resolution-wide-range-wavelength-meter-model-shr/>
14. “*Honyometr-spektrometr*”, [Goniometr-spektrometr] Available at: <http://www.rostest.ru/Goniometer%20spectrometer%20GS-2.php>.

Поступила в редколлегию 2.08.2017

Одобрена к печати 12.09.2017

Відомості про авторів:**Мудрик Вадим Геннадійович**

кандидат технічних наук,
викладач кафедри Національної академії
Національної Гвардії України,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-0389-0407>
e-mail: Mydrik_vad@gmail.com

Торяник Дмитро Олександрович

викладач кафедри Національної академії
Національної Гвардії України,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-0634-5330>
e-mail: Toranikdo@gmail.com

Зюбан Михайло Іванович

старший викладач
Національної академії
Національної Гвардії України,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-0725-0318>
e-mail: Zyubanmi@gmail.com

Information about the authors:**Mudrik Vadym**

Candidate of Technical Science
Lecturer of Department of National Academy
of the National Guard of Ukraine,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-0389-0407>
e-mail: Mydrik_vad@gmail.com

Toryanik Dmitriy

Lecturer of Department of National Academy
of the National Guard of Ukraine,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-0634-5330>
e-mail: Toranikdo@gmail.com

Zyuban Michael

Senior Instruktor
of National Academy
of the National Guard of Ukraine,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-0725-0318>
e-mail: Zyubanmi@gmail.com

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРИ-БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОГНЕСТРЕЛЬНОГО ОРУЖИЯ**

В.Г. Мудрик, Д.А. Торяник, М.И. Зюбан

В работе обосновано параметры, изложены принципы построения и состав экспериментальной установки для исследования средства измерения скорости движения метаемого элемента в канале ствола. Разработана методика проведения эксперимента, приведены результаты экспериментальных исследований по моделированию процесса выстрела и регистрации и обработки измерительной информации. Построено экспериментальную установку, которая позволяет моделировать функционирование средства измерения скорости движения метаемого элемента в канале ствола. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, которая предусматривает варьирования параметров элементов оптической и механической части установки во время проведения эксперимента с целью проверки адекватности математической модели средства измерения.

Ключевые слова: экспериментальная установка, средство измерения, скорость движения метаемого элемента, лазерная доплеровская анемометрия, баллистические элементы выстрела, огнестрельное оружие, канал ствола.

**EQUIPMENT FOR MEASUREMENT OF INTERNAL-BULLETINAL
CHARACTERISTICS OF FIREARM**

V. Mudrik, D. Toryanik, M. Zyuban

The work substantiates the parameters, describes the principles of construction and composition of the experimental installation for studying the means of measuring the velocity of the throwing element in the trunk channel. The method of conducting the experiment is developed, the results of experimental studies on modeling of the shot and recording and processing of measuring information are presented. An experimental installation was developed that allows to model the functioning of the measuring device for measuring the velocity of the throwing element in the trunk channel. A technique for performing experimental studies has been developed, which provides for varying the parameters of the elements of the optical and mechanical parts of the installation during the experiment in order to verify the adequacy of the mathematical model of the measuring instrument. The analysis of the data obtained makes it possible to draw the following conclusions: practically confirms the presence of a stable measuring signal and the possibility of its registration and processing in the conditions of conducting measurements that are close to real ones; the appearance of the obtained curves corresponds to the expected nature of the growth of the velocity of the throwing element in the channel of the barrel of the experimental installation; the presence of spatial inconsistency of laser beams on the surface of a throwing element on separate sections of its motion does not lead to a decrease in the "signal / interference" ratio to the levels that complicate the identification of the dominant harmonics of the Doppler frequency shift; the volume of measuring information is sufficient for processing the signal and determining the dependences of the velocity of the throwing element in the function of time.

Keywords: experimental unit, measurement instrument, velocity of the throwing element, laser Doppler anemometry, ballistic firing elements, firearm, barrel.



О. М. Крюков



Р. С. Мельников



В. А. Муzychuk

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

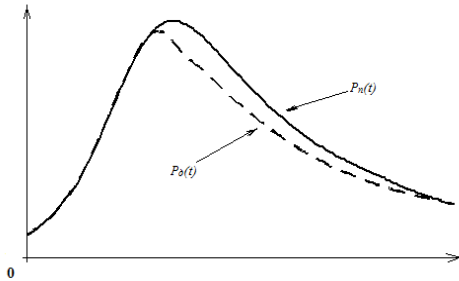


Рис. 1. Залежності $P(t)$ за наявності роздуття в казенній частині КС

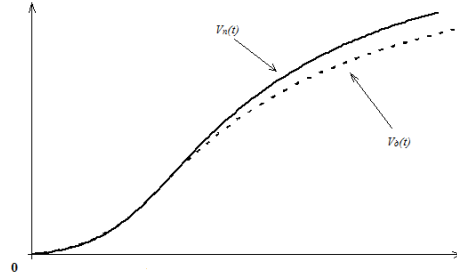


Рис. 2. Залежності $V(t)$ за наявності роздуття в казенній частині КС

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

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

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

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

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

1. Основного рівняння піродинаміки (рівняння перетворення енергії)

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

де s – площа поперечного перерізу каналу ствола (включаючи нарізи); l_ψ – зведена довжина вільного об'єму камори; f – сила пороху; ω – маса порохового заряду; θ – параметр розширення порохових газів; φ – коефіцієнт урахування другорядних робіт (коефіцієнт фіктивності маси); m – маса снаряду.

2. Рівняння, що виражають закон горіння пороху:

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

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

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

де χ , λ – геометричні характеристики порохового зерна; z – відносна товщина шару порохового зерна, що згоріло; u – швидкість горіння пороху; u_1 – швидкість горіння пороху за атмосферного тиску; e – товщина шару порохового зерна, що згоріло; e_1 – половина початкової товщини зводу пороху; σ – відносна поверхня порохового зерна.

3. Рівняння руху снаряда каналом ствола:

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

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

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

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

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

Для побудови різницевої схеми слід виконати такі операції:

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

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

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

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

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

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

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

де коефіцієнти визначаються за виразами

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

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

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

Висновки

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

Застосування такого методу дозволить:

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

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

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

Список використаних джерел

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

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

Стаття надійшла до редакції: 18.10.2018 р.

УДК 623.442:623.522

А. М. Крюков, Р. С. Мельников, В. А. Муzychuk

МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КАНАЛОВ СТОЛОВ И БОЕПРИПАСОВ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСТРЕЛА

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

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

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

UDC 623.442:623.522

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ORCID 0000-0003-4194-6081

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

ORCID 0000-0003-3517-2040

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

ORCID 0000-0001-6856-1857