

УДК 535.016:531.76:681.78



О. М. Крюков



В. Г. Мудрик

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ МЕТАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА В КАНАЛІ СТВОЛА: ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТИ

У статті обґрунтовано параметри, викладено принципи побудови і склад експериментальної установки для дослідження засобу вимірювання швидкості руху метального елемента в каналі ствола. Розроблено методику проведення експерименту, наведено результати експериментальних досліджень з моделювання процесу пострілу та реєстрації і оброблення вимірюваної інформації.

К л ю ч о в і с л о в а: експериментальна установка, засіб вимірювання, швидкість руху метального елемента, лазерна доплерівська анемометрія, балістичні елементи пострілу, вогнепальна зброя, канал ствола.

Постановка проблеми. До балістичних елементів пострілу (БЕП) належать дані про зміну 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].

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]. У статті [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 у праці [5].

Згаданий експеримент підтвердив 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, що є 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.

Мета статті – 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 (див. рис. 1):

- джерело лазерного випромінювання Laser Pointer 1 (в експерименті використано джерела неперервного режиму роботи з потужністю випромінювання 100 мВт та діаметром променя 1 мм двох типів: із довжиною хвилі 532 та 650 нм);
- оптичний коліматор 2;
- оптичний відбивач 3, його розміри 15×15 мм;
- світлоділильна призма 4, її розміри 15×15 мм.

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

До механічної частини експериментальної установки (МЧЕУ) (див. рис. 2) входять елементи, робота яких імітує рух МЕ в КС вогнепальної зброї. При цьому конструктивні параметри МЧЕУ максимально наближені до характеристик реальних зразків вогнепальної зброї. Крім того, при розробленні МЧЕУ враховані вимоги до безпеки проведення експерименту.

З аналізу характеристик сучасних видів вогнепальної зброї, що знаходяться на озброєнні Національної гвардії України (пістолети, автомати, гвинтівки виробництва КП "ФОРТ"), випливають 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 до 18,5 мм.

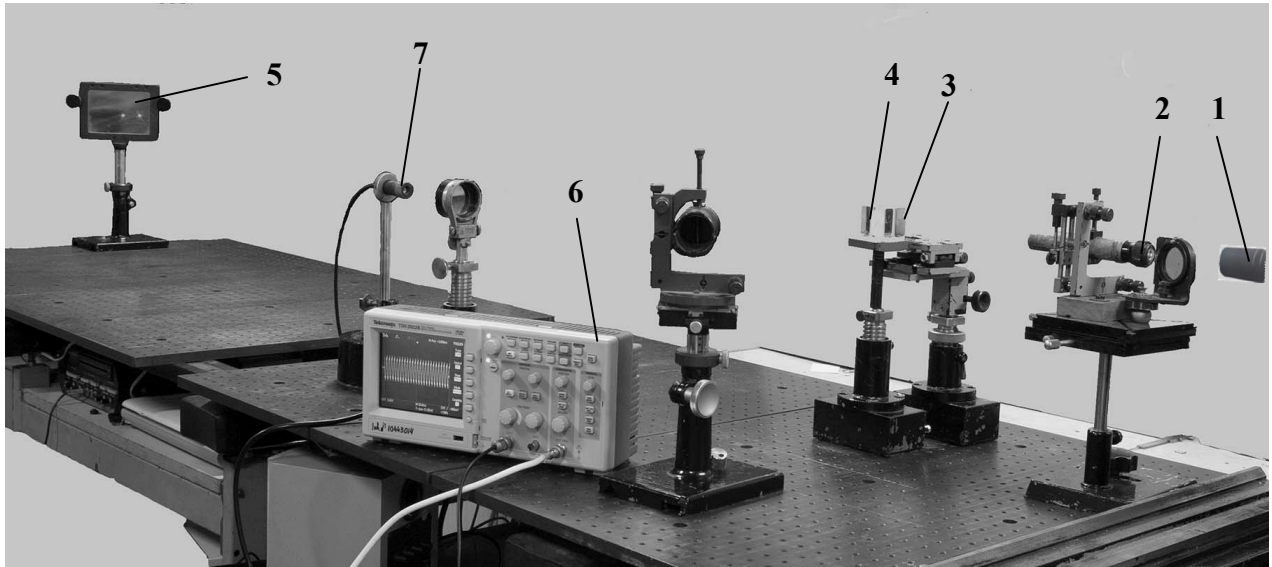


Рис. 1. Оптична частина, фотоприймач та цифровий осцилограф



Рис. 2. Механічна частина експериментальної установки

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

Для приведення МЕ в рух у 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 стискання пружини). Застосування ж стисненого повітря дозволяє змінювати середню швидкість руху МЕ шляхом зміни тиску.

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

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

Як еквівалент МЕ в МЧЕУ використано легкий (із алюмінієвого сплаву) поршень. Діаметр МЕ менше діаметра КС на 0,15 мм, що дозволяє звести до мінімуму прорив стиснутого повітря між його боковою поверхнею та стінками КС.

Для забезпечення зручності при виконанні 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 Coido 250 Psi (поз. 4, рис. 2). Компресор комплектується манометром і дає можливість створити тиск повітря до 1,5 МПа. Резервуар має систему відводів з вентилями (для сполучення з компресором, стволом та атмосферою).

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 надходження потрібної кількості стиснутого повітря до МЕ. Клапан витримує максимальний тиск на вході 1,6 МПа та характеризується високою пропускною спроможністю (270 л/хв), яка забезпечується великою площиною тарілки клапана.

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

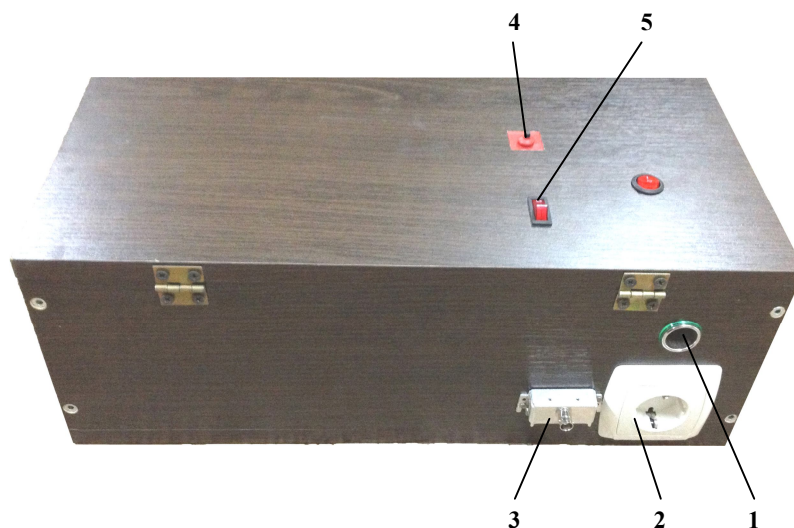


Рис. 3. Блок електроживлення та управління

Блок електроживлення та управління дозволяє дистанційно вмикати (вимикати) компресор, а також вмикати електромагнітний клапан синхронно із запуском розгортки цифрового осцилографа для початку реєстрації вимірювального сигналу. На блоці розташовані: рознімач (поз. 1, рис. 3) для живлення компресора; рознімач (поз. 2, рис. 3) для вмикання електромагнітного клапана; рознімач (поз. 3, рис. 3) для підключення входу розгортки цифрового осцилографа, а також вмикач електроспуску (поз. 4, рис. 3), який синхронно вмикає електромагнітний клапан та запускає розгортку осцилографа, 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 принципів та вимог виконано монтаж експериментальної установки, перевірено її працездатність та безпечність.

Методика проведення експериментальних досліджень включає підготовку експериментальної установки до проведення вимірювань, проведення експерименту з 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 світлоділильної 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 осцилографа відповідно до очікуваних параметрів вимірюваного сигналу;
- створення та перевірка електричних і механічних комутацій.

Проведення експерименту передбачає формування заданого закону руху МЕ в КС та реєстрацію вимірюваного сигналу.

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

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

У таблиці наведено схему варіювання змінюваних параметрів.

Варіювання вихідних даних при проведенні експерименту

Вихідні дані експериментальної установки	Номер вимірювання				
	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 частин пояснюється таким чином.

З одного боку, за різних значень 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, за незмінного значення тиску P_2 для різних значень частоти лазерного випромінювання f_1, f_2 та кутів α_1, α_2 (набори вихідних даних 2, 3, 4) змінюється реєстрований

доплерівський зсув частоти, водночас відповідних змін зазнає й коефіцієнт $\frac{2f}{c}(\cos \alpha - \cos \beta)$ [4],

який в даному випадку визначається за параметрами експериментальної установки і слугує для подальшого розрахунку миттєвих значень швидкості руху МЕ (тут c – швидкість поширення електромагнітних хвиль). Таким чином, за ступенем збігу трьох кривих швидкості, які визначаються на основі експериментальних даних для доплерівського зсуву частоти, можна говорити про адекватність математичної моделі ЗВ, отриманої у статті [4] теоретичним шляхом.

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

Експеримент проводять таким чином.

Метальний елемент (поршень) знаходиться в крайньому задньому положенні. На МЕ спрямовані лазерні промені під кутами α та β . При вмиканні електроспуска відкривається електромагнітний клапан, при цьому МЕ рухається під дією сили тиску повітря. Одночасно з відкриванням електромагнітного клапана відбувається запуск процесу реєстрації вимірювального сигналу цифровим осцилографом. Після закінчення вимірювань МЕ повертається у вихідне положення.

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

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

- імпорт даних для аналізу (відкривання файлів csv-формату, які створені цифровим осцилографом, у вибраному 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);
- вибір точки на осі часу та формування симетричного інтервалу відліків напруги в околі цієї точки;
- проведення спектрального аналізу вибраного фрагмента сигналу (виконання операції швидкого перетворення Фур’є [9]);

- визначення частоти домінуючої гармоніки фрагмента сигналу;
- приведення частот домінуючих гармонік фрагментів сигналу у відповідність до моментів часу;
- обчислення значень швидкостей руху МЕ відповідно до виразу $F(t) = \frac{2fV(t)}{c}(\cos\alpha - \cos\beta)$,

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

- візуалізація отриманої вимірної інформації (у вигляді таблиці або графічно).

Відповідно до запропонованої методики проведення експериментальних досліджень були виконані операції та отримані результати.

Вихідні дані таблиці 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 пакета 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 таблиці.

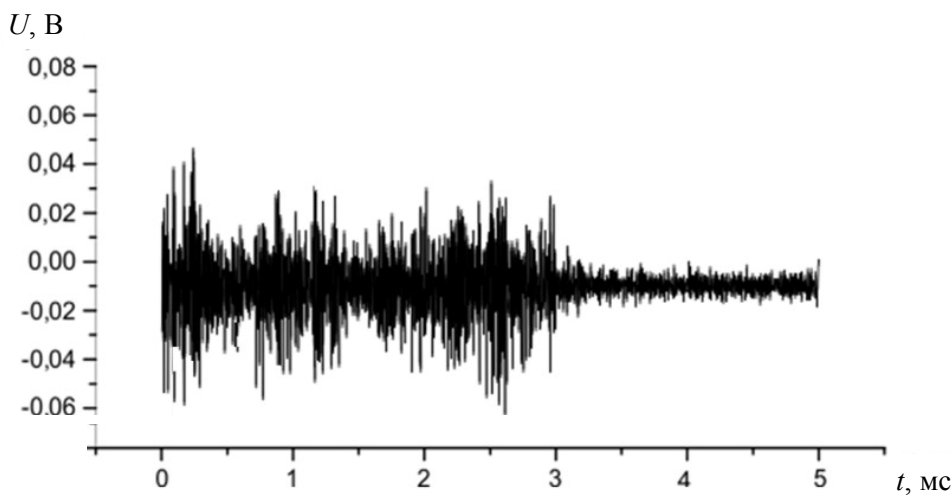


Рис. 5. Осцилограма напруги фотоструму для першого набору вихідних даних

На рис. 6 наведено приклад результату спектрального аналізу фрагмента сигналу (перший набір вихідних даних), який виконано за допомогою математичного пакета 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.

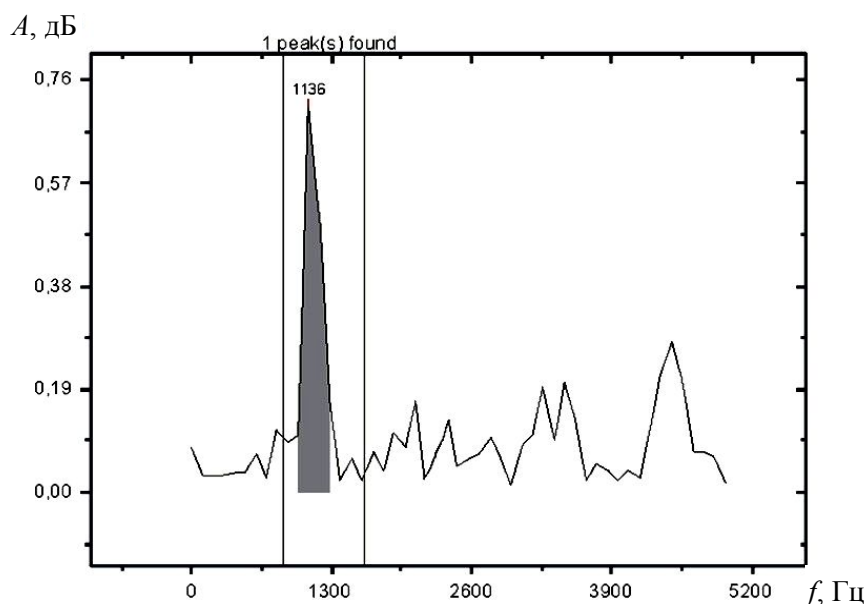


Рис. 6. Спектральна щільність фрагмента сигналу

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

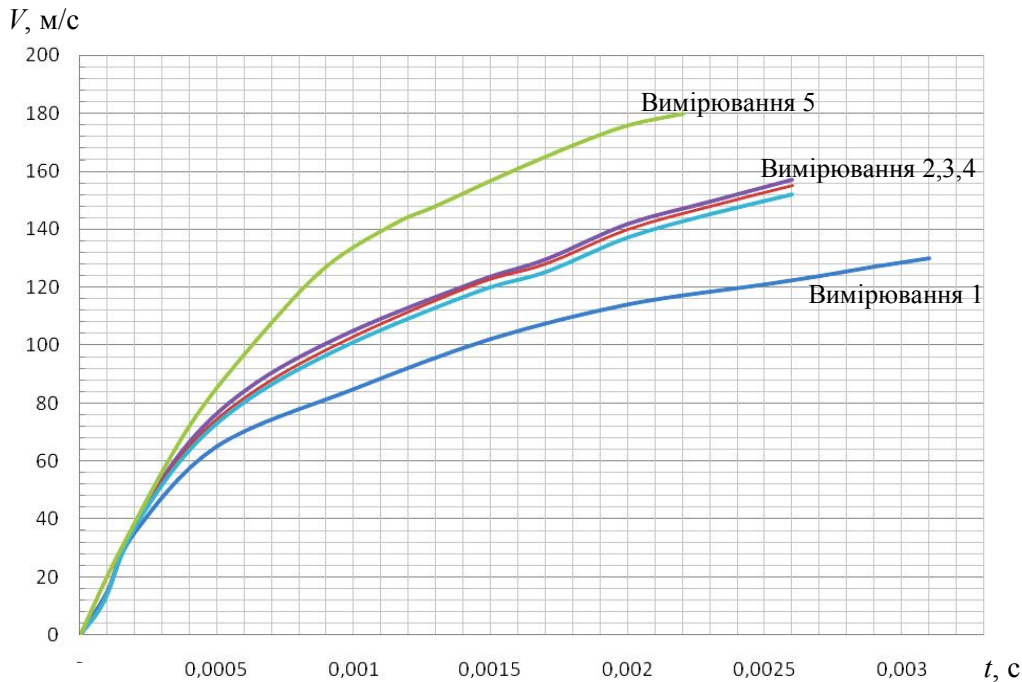


Рис. 7. Графіки залежності швидкості руху МЕ в КС від часу

Аналіз отриманих даних дозволяє дійти таких висновків:

- практично підтверджується наявність стійкого вимірюваного сигналу та можливість його реєстрації і оброблення в умовах проведення вимірювань, що є близькими до реальних;
- вигляд отриманих кривих відповідає очікуваному характеру наростання швидкості руху МЕ в КС експериментальної установки;
- наявність просторової неузгодженості лазерних променів на поверхні МЕ на окремих ділянках його руху не призводить до зменшення відношення “сигнал/завада” до рівнів, які ускладнюють ідентифікацію домінуючих гармонік доплерівського зсуву частоти;
- обсяг вимірюваної 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 у статті [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 засобу вимірювання швидкості руху металюного 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.

Результати експериментальних досліджень підтверджують стійкість вимірюваного сигналу (зокрема на ділянках руху металюного елемента, де спостерігається просторова неузгодженість лазерних променів), можливість реєстрації і оброблення вимірюваної інформації, а також адекватність математичної моделі засобу вимірювання, отриманої теоретичним шляхом.

Список використаних джерел

1. Серебряков, М. Е. Внутренняя баллистика [Текст] / М. Е. Серебряков. – М. : Оборонгиз, 1949. – 469 с.
2. Голомбовский, А. К. Теория и расчет автоматического оружия [Текст] / А. К. Голомбовский. –

Пенза : ПВАИУ, 1973. – 492 с.

3. Вимірювання швидкості руху метального елемента в каналі ствола на основі оптичного диференціального доплерівського методу [Текст] / О. М. Крюков, Г. М. Доля, О. І. Біленко, В. Г. Мудрик // Метрологія та прилади. – 2013. – Вип. 4. – С. 56–60.

4. 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.

5. Крюков, О. М. Оцінювання похибки лазерного доплерівського засобу вимірювання швидкості руху металевих елементів у каналах стволів вогнепальної зброї [Текст] / О. М. Крюков, В. Г. Мудрик, І. О. Чадаєв // Метрологія та прилади. – 2016. – Вип. 1. – С. 64–69.

6. H6780-20 Datasheet - Hamamatsu Corporation [Електрон. ресурс]. – Режим доступу : <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/62614/HAMAMATSU/H6780-20.html> (дата звернення: 08.01.2017). – Назва з екрана.

7. Основы научных исследований [Текст] : учеб. пособие для техн. вузов / В. И. Крутов, И. М. Грушко, В. В. Попов и др.; под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. – М. : Высш. шк., 1989. – 400 с.

8. Любченко, Е. А. Планирование и организация эксперимента [Текст] : учеб. пособие. Ч. 1 / Е. А. Любченко, О. А. Чуднова; под ред. Г. В. Орловской. – Владивосток : ТГЭУ, 2010. – 156 с.

9. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / И. С. Гоноровский. – М. : Высш. шк., 1977. – 608 с.

Стаття надійшла до редакції 13.02.2017 р.

УДК 535.016:531.76:681.78

А. М. Крюков, В. Г. Мудрик

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МЕТАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА В КАНАЛЕ СТВОЛА: ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТЫ

В статье обоснованы 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 экспериментального моделирования процесса выстрела, регистрации и обработки измеряемой информации.

К л ю ч е в ы е с л о в а: экспериментальная установка, средство измерения, скорость движения метаемого элемента, лазерная доплеровская анемометрия, баллистические элементы выстрела, огнестрельное оружие, канал ствола.

UDC 535.016:531.76:681.78

O. M. Kryukov, V. G. Mudrik

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE VELOCITY MEASURING INSTRUMENT OF THE THROWING ELEMENT IN THE BARREL: EQUIPMENT, METHODS, RESULTS

In this article we have grounded the parameters, set out principles and structure of the experimental unit in order to research the velocity measuring instrument of the throwing element in the barrel. The method of carrying out of experiment is developed, the results of simulation of the firing process are given, the registration and processing of measurement information is presented.

К е у w o r d s: experimental unit, measurement instrument, velocity of the throwing element, laser Doppler anemometry, ballistic firing elements, firearm, barrel.

Крюков Александр Михайлович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри озброєння та спеціальної техніки Національної академії Національної гвардії України.

Мудрик Вадим Геннадійович – кандидат технічних наук, викладач кафедри озброєння та стрільби Національної академії Національної гвардії України.