

А. Я. Онофрійчук, Ю. М. Косовцов, В. І. Грабчак, М. В. Пинчук

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ВПЛИВУ ПІСЛЯДІЇ ПОРОХОВИХ ГАЗІВ НА ПАРАМЕТРИ ПОЛЬОТУ СНАРЯДА

Анотація. У роботі розглянуто метод інверсно-балістичної ідентифікації початкової швидкості польоту снаряда з урахуванням післядії порохових газів. На основі експериментальних даних, отриманих за допомогою РЛС Weibel MFTR-2100/40 під час стрільби зі 155-мм САУ “Богдана”, виконано реконструкцію початкової ділянки траєкторії та визначено умовну “балістичну” швидкість. За допомогою математичної моделі руху снаряда М107 оцінено вплив різниці початкових швидкостей на траєкторні параметри. Встановлено, що відхилення за дальністю польоту може сягати кількох сотень метрів.

Abstract. The inverse-ballistic identification method for determining a projectile's initial velocity while accounting for the aftereffect of propellant gases is considered. Based on experimental data obtained using the Weibel MFTR-2100/40 radar during firing from the 155 mm Bohdana self-propelled howitzer, the initial segment of the trajectory was reconstructed and an equivalent “ballistic” velocity was determined. A mathematical model of M107 projectile motion was used to assess the effect of the difference between the initial velocities on trajectory parameters. The results show that the deviation in projectile range can reach several hundred meters.

Ключові слова: інверсно-балістична ідентифікація; початкова швидкість; порохові гази; математична модель; артилерійський снаряд.

Keywords: inverse-ballistic identification; initial velocity; propellant gases; mathematical model; artillery projectile.

Дослідження явищ та процесів, що відбуваються при вильоті снаряда зі ствола гармати, є критично важливим для підвищення точності стрільби артилерійських систем, оскільки приріст початкової швидкості снаряда в період післядії порохових газів суттєво впливає на траєкторію його польоту [1-3]. Після вильоту з каналу ствола снаряд потрапляє під інтенсивний енергетичний тиск порохових газів, які обганяють його на відстані кількох десятків метрів зі швидкістю 1200-2000 м/с. Прискорення поступального руху на цьому етапі триває до моменту виходу снаряда зі струменя газів і безпосередньо визначається параметрами системи “гармата-снаряд”. Ефективність цього розгону зростає за умови зменшення власної швидкості снаряда, збільшення секундної витрати та швидкості витікання газів, а також оптимізації геометричного відношення площ перерізу снаряда та газового струменя [4-6].

Внаслідок цих обмежень єдиним надійним підходом та “золотим стандартом” дослідження післядії порохових газів залишається метод натурних стрільб, який дозволяє отримати верифіковані експериментальні дані для аналізу та точного розрахунку початкової швидкості польоту снаряда. Сучасним напрямом, що динамічно вдосконалюється у сфері дослідження впливу порохових газів на снаряд, є розробка та застосування інверсно-балістичного методу, який ґрунтується на інверсній балістичній ідентифікації. Замість математичного моделювання складних газодинамічних процесів у пороховому шлейфі, цей підхід передбачає вимірювання параметрів польоту снаряда з подальшою ретроспективною екстраполяцією їх назад у момент вильоту. Таке рішення дозволяє автономно, без залучення дороговартісного обладнання, виокремити чисту величину газодинамічного приросту швидкості та забезпечити прецизійну точність визначення початкової швидкості польоту снаряда.

Для оцінки ефективності методу інверсно-балістичної ідентифікації важливим завданням є проведення комплексного порівняльного аналізу динаміки руху снаряда на всій траєкторії польоту за допомогою його програмно-математичної моделі. Зокрема, порівняння характеру зміни просторових координат у часі та дослідження профілю модуля повної швидкості для двох випадків: з урахуванням реальної швидкості на зрізі ствола та умовної “балістичної” швидкості, сформованої післядією порохових газів. Розрахунок і аналіз абсолютного та відносного розходження між модулями швидкостей дозволить кількісно оцінити інтегральні відхилення

траєкторій, спричинені цим початковим енергетичним зсувом на кожному етапі балістичного циклу.

Отже, метою роботи є розробка математичного апарату та оцінки ефективності методу інверсно-балістичної ідентифікації початкової швидкості польоту снаряда з урахуванням динаміки післядії порохових газів.

Інверсно-балістична ідентифікація початкової швидкості снаряда з урахуванням дії порохових газів. Основою методу інверсно-балістичної ідентифікації є балістичні стрільби із 155-мм самохідної артилерійської установки (САУ) 2С22 “Богдана” з безперервною радіолокаційною реєстрацією параметрів руху снаряда, апостеріорне поліноміальне згладжування первинних даних та аналітичне відновлення моменту вильоту для усунення “мертвої зони” локатора, а також ідентифікація характерних точок функції швидкості в зоні післядії порохових газів, що дозволяє реконструювати умовну “балістичну” початкову швидкість снаряда; при цьому сам метод можна поділити на декілька послідовних етапів.

На першому етапі дослідження організовано та практично реалізовано балістичні стрільби із 155-мм САУ 2С22 “Богдана” за умов виконання заходів повної підготовки стрільби і управління вогнем артилерії.

На другому етапі для вирішення проблеми “мертвої зони” антени локатора розроблено процедуру часової синхронізації траєкторних даних, яка базується на побудові апроксимаційних поліномів дробового ступеня для просторових координат снаряда з їхнім подальшим чисельним розв'язанням відносно нульових граничних умов на дульному зрізі.

На третьому етапі проведена ідентифікація характерних точок на початковій ділянці функції модуля швидкості польоту снаряда – точки максимуму швидкості (де сила тиску газів урівноважує лобовий опір) та точки її перегину (де дія газів повністю припиняється), що дозволило чітко розмежувати ділянку інтенсивного розгону і зону чистого балістичного польоту для подальшої реконструкції умовної “балістичної” початкової швидкості шляхом екстраполяції даних назад до моменту вильоту.

Натурний експеримент із САУ 2С22 “Богдана” та РЛС Weibel MFTR-2100/40 забезпечує отримання високоточних масивів траєкторних даних для точного кількісного оцінювання прискорення снаряда в зоні післядії порохових газів. Аналітичне відновлення моменту вильоту снаряда та ідентифікація характерних точок функції швидкості дозволяють компенсувати “мертву зону” локатора й розмежувати фази газодинамічного розгону та вільного польоту. Наступні етапи дослідження, що включають ретроспективну реконструкцію початкової швидкості та комп'ютерне моделювання руху снаряда М107, інтегрують ці експериментальні дані для фінальної кількісної оцінки впливу післядії порохових газів на точність стрільби артилерійських систем.

Для оцінки ефективності методики інверсно-балістичної ідентифікації початкової швидкості снаряда з урахуванням дії порохових газів, запропонована система взаємопов'язаних диференціальних рівнянь МММТ просторового руху 155-мм ОФ снаряда М107, яка доповнена інерційно-ваговими характеристиками, аналітичними функціями аеродинамічних коефіцієнтів сил (моментів) снаряда та параметрів атмосфери.

На основі програмної реалізації просторового руху 155-мм ОФ снаряда М107 проведене порівняльне дослідження впливу початкової швидкості на динамічні параметри руху польоту снаряда на всій траєкторії його польоту, визначені абсолютні й відносні інтегральні відхилення траєкторій, що викликані різницею між реальною та “балістичною” початковими швидкостями на кожному етапі польоту снаряда. Так, максимальне відхилення за дальністю фіксується у кінцевій точці траєкторії (в момент зустрічі снаряда з поверхнею), де сумарна величина абсолютної похибки досягає декілька сотень метрів, що є критичним показником для точності ведення артилерійського вогню.

Список використаних джерел:

1. Carlucci D., Frydman A. M. and Cordes J. A. Mathematical Description of Projectile Shot Exit Dynamics (Set-Forward), J. Appl. Mech., 2013, 80.
2. Захаренков В.Ф. Внутренняя баллистика и автоматизация проектирования артиллерийских орудий: учебник. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2010. 276 с.

3. Бурлов В. В. Баллистика ствольных систем / В. В. Бурлов, В. В. Грабин, А. Ю. Козлов; под ред. Л. Н. Лысенко, А. М. Липанова. М. : Машиностр., 2006. 461 с.
4. Чурбанов Е.В. Внутренняя баллистика периода форсирования: уч. посо бие. 2-е изд., доп. / Е. В. Чурбанов. СПб. : БГТУ, 1997. 192 с.
5. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет / М. Е. Серебряков. М. : Оборонгиз, 1962. 962 с.
6. Carlucci D. E., Jacobson S. S. Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2018. 656 p.

Онофрійчук Андрій Ярославович – ад’юнкт штатний науково-організаційного відділу, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, вул. Героїв Майдану, буд. 32, інд. 79026, e-mail: andre12122504@gmail.com, ORCID <http://orcid.org/0000-0001-6490-6221>

Косовцов Юрій Миколайович – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, Провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу ракетних військ і артилерії науково-дослідного управління застосування та підготовки військ (сил) наукового центру Сухопутних військ, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, вул. Героїв Майдану, буд. 32, інд. 79026, e-mail: andriv0708@ukr.net, ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8047-1424>

Грабчак Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, Заступник начальника академії з наукової роботи, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, вул. Героїв Майдану, буд. 32, інд. 79026, e-mail: grabthak@gmail.com, ORCID <http://orcid.org/0000-0003-3569-0681>

Пинчук Микола Васильович – ад’юнкт штатний науково-організаційного відділу Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, вул. Героїв Майдану, буд. 32, інд. 79026, e-mail: mpynchuk@gmail.com, ORCID <http://orcid.org/0000-0001-8206-7310>

Onofriichuk Andrii Yaroslavovych – full-time postgraduate student of the Scientific and Organizational Department, Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, 32 Heroiv Maidanu Street, Lviv, 79026, Ukraine, e-mail: andre12122504@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6490-6221>.

Kosovtsov Yurii Mykolaiovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Lead Research Fellow of the Research Department of Rocket Forces and Artillery, Research Directorate for Troop (Force) Employment and Training, Ground Forces Research Center, Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, 32 Heroiv Maidanu Street, Lviv, 79026, Ukraine, e-mail: andriv0708@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8047-1424>.

Hrabchak Volodymyr Ivanovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Academy for Research, Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, 32 Heroiv Maidanu Street, Lviv, 79026, Ukraine, e-mail: grabthak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3569-0681>.

Pynchuk Mykola Vasylovych – full-time postgraduate student of the Scientific and Organizational Department, Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, 32 Heroiv Maidanu Street, Lviv, 79026, Ukraine, e-mail: mpynchuk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8206-7310>.