Сіренко І.П., Пашко А.О., Стеля О.Б. Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Векленко Ю.А., Корзун К.І. Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ БАЛІСТИЧНИХ ФАКТОРІВ НА РОЗСІЮВАННЯ СНАРЯДІВ

У роботі проведено дослідження впливу початкових випадкових варіацій балістичних факторів, таких як маса, початкова швидкість снаряда і кут кидання, на розсіювання снарядів за висотою шляхом моделювання методом Монте-Карло. У дослідженні використовувалась комп'ютерна зовнішньо-балістична модель польоту снаряда 30-мм гармати, що базується на системі диференціальних рівнянь. Для інтерполяції закону опору повітря з 1943 року застосовується параболічний сплайн. Для кожного з вибраних балістичних показників генерувалось по 1000 нормально розподілених випадкових значень, розраховувались точки влучень, за якими обчислювалось середньоквадратичне відхилення. Проведено кілька серій обчислювальних експериментів для дослідження впливу кожного фактору окремо, попарного впливу факторів та сукупного впливу трьох факторів. Встановлено, що у випадку сукупного впливу на розсіювання всіх трьох досліджуваних факторів найбільший вплив має величина варіації початкової швидкості снаряда. Програмне забезпечення та методика дослідження можуть бути використані розробниками боєприпасів для поліпшення їхніх бойових можливостей та експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: зовнішня балістика, розсіювання, моделювання, метод Монте-Карло

Постановка проблеми. Під час стрільби з вогнепальної зброї виникає явище розсіювання, обумовлене багатоваріантністю факторів, які змінюються випадковим чином від пострілу до пострілу [1]. Характеристики розсіювання визначаються шляхом статистичної обробки даних стрільб в умовах полігону.

Актуальність дослідження. Розсіювання снарядів тісно пов'язане з ефективністю ураження цілей і тому вивченню розсіювання приділяється велика увага дослідників. Для практичного застосування, зазвичай, використовуються оцінки розсіювання, отримані за допомогою статистичного аналізу експериментально отриманих даних [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [3] представлені основні етапи експериментального та аналітичного процесу, що проводиться для вимірювання та порівняння характеристик розсіювання боєприпасів. Практичний метод спирається на порівняння довірчих інтервалів та перевірки статистичних гіпотез щодо стандартного відхилення зразків. Пропонується алгоритм порівняння дисперсій двох і більше вибірок боєприпасів. У статті [4] наведено метод визначення оптимальної кількості та об'ємів експериментальних вибірок набоїв для рушниць. Це дозволяє зекономити кошти і час при випробуванні партій набоїв.

У роботі [5] вивчалось розсіювання артилерійської зброї, на яку впливали початкова швидкість, маса та зміщення центру маси снаряда, методом покрокового регресійного аналізу. Показано, що основним фактором впливу на розсіювання за дальністю є початкова швидкість, а основним фактором, що впливає на бічне відхилення, є маса снаряда.

Для дослідження явища розсіювання також застосовуються методи математичного моделювання. У роботі [6] виділено найважливіші фактори, що спричиняють розсіювання снарядів, що стабілізовані обертанням, зокрема, проаналізовано вплив дисбалансу маси. У [7] розроблено модель польоту некерованих ракет, вивчено вплив дисбалансу маси на осьові моменти інерції, наведено результати моделювання впливу дисбалансу маси на політ ракети. У статті [8] використано 3D-моделі ракети для визначення впливу недетермінованих виробничих помилок на інерційні характеристики некерованої ракети та представлено метод,

який пов'язує виробничі відхилення у геометрії та розподілі маси з дисперсією точок влучення снаряда.

У роботах [9, 10] пропонується аналітичний метод визначення характеристик розсіювання за дальністю, висотою і напрямком як стабілізованих обертанням снарядів, так і оперених реактивних снарядів (мін). Шляхом розв'язування системи диференціальних рівнянь розраховано характеристики розсіювання снарядів (мін) для різних артилерійських систем в залежності від дальності стрільби.

У [11] досліджено динамічні процеси при стрільбі із малокаліберних автоматичних гармат, якими оснащуються бойові модулі сучасних бойових машин. Розроблено математичні та параметричні комп'ютерні моделі із тестовими параметрами. Проведено дослідження впливу різноманітних чинників на коливання гармати при стрільбі та розсіювання снарядів.

У [12] проведено імітаційне моделювання розсіювання снарядів методом статистичних випробувань Монте-Карло для розрахунку параметрів зони безпеки при стрільбі з гаубиці калібру 152 мм. У [13] методом Монте Карло вивчається вплив випадкових збурень на політ міни при фіксованих коефіцієнтах варіації двох факторів: початкової швидкості та коефіцієнта опору повітря. Розраховано кількість мін, необхідну для ураження цілей із заданою ймовірністю 0,9.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Згідно до настанов [14] виділяються три основні групи факторів, що впливають на розсіювання:

- фактори, що спричиняють варіабельність початкових швидкостей;
- фактори, що викликають варіабельність кута кидання та напрямку стрільби;
- фактори, спричинені змінами умов польоту снаряда від пострілу до пострілу та під час руху снаряда у повітрі.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблем, котрим присвячується означена стаття. При кожному пострілі у різному поєднанні діють всі три групи факторів. Це призводить до відмінностей траєкторій снарядів від пострілу до пострілу. Причому в експерименті на полігоні виділити вплив кожного фактора та, головне, оцінити його внесок у сумарне розсіювання дуже складно або й неможливо.

Мета статті дослідити вплив випадкових відхилень балістичних показників, таких як маса, початкова швидкість снаряда і кут кидання, на розсіювання снарядів за допомогою методів статистичного моделювання (метод Монте-Карло).

Розсіювання снарядів характеризують центральною точкою влучень та серединними відхиленнями по висоті $Bв$ (у випадку вертикальної мішені, що розміщується перпендикулярно до напрямку стрільби), по дальності $Bд$ (у випадку, коли влучення розглядаються на горизонтальній площині) та бічним відхиленням $Bб$ (коли розсіювання оцінюється за напрямком стрільби). Для нормально розподілених випадкових величин є підстави вважати точки влучень такими, що відомий коефіцієнт перерахунку середньоквадратичного відхилення до серединного відхилення, тобто виконуються співвідношення [15]:

$$Bв = 0,6746 \cdot Sd_y, Bд = 0,6746 \cdot Sd_x, Bб = 0,6746 \cdot Sd_z, \quad (1)$$

де Sd_y – середньоквадратичне відхилення за висотою,

Sd_x – середньоквадратичне відхилення за дальністю,

Sd_z – середньоквадратичне відхилення за напрямком (бокове).

Тому далі ми будемо говорити про середньоквадратичного відхилення точок влучень.

Викладення основного матеріалу досліджень.

Методика досліджень.

У дослідженні використовувалась комп'ютерна зовнішньо-балістична модель [16], що базується на системі диференціальних рівнянь. Для інтерполяції закону опору повітря з 1943

року застосовується параболічний сплайн [17, 18]. Система звичайних диференціальних рівнянь розв'язується чисельним методом Кутта-Мерсона 5-го порядку [19]. Перевагою цього методу над “стандартним” методом Рунге-Кутта 4-го порядку є можливість оцінювати похибку на кожному кроці розрахунку. Це дозволяє визначати необхідний крок дискретизації для серій розрахунків.

Дослідження проводились для моделі польоту снаряда 30-мм гармати. Модель було відкалібровано за таблицями стрільби [20]. Використано табличні значення маси снаряда $m = 0,389$ кг та початкової швидкості снаряда $u_0 = 960,0$ м/с, а значення кута кидання $teta_0$ вибиралося для кожної дальності відповідно.

Моделювання впливу варіабельності балістичних показників (маса снаряда m , початкова швидкість снаряда u_0 , і кут кидання $teta_0$) проводилося наданням початкових випадкових значень цим факторам. Відомо, що коли випадкова величина підпадає під дію великого числа випадкових впливів, вона підпорядковується нормальному закону розподілу [21]. Тому для кожного з вибраних балістичних показників генерувались випадкові значення у вигляді:

$$m_i^* = m(1 + d_m \cdot \xi_i), i = \overline{1, N}, \quad (8)$$

$$u_{0k}^* = u_0(1 + d_u \cdot \xi_k), k = \overline{1, N}, \quad (9)$$

$$teta_{0n}^* = teta_0(1 + d_{teta} \cdot \xi_n), n = \overline{1, N}, \quad (10)$$

де ξ_i – нормально розподілена випадкова величина з нульовим математичним сподіванням та одиничною дисперсією,

d_m, d_u, d_{teta} – коефіцієнти варіації маси, початкової швидкості снаряда та кута кидання.

Для згенерованих випадкових значень досліджуваних балістичних показників розв'язувалась система диференціальних рівнянь [3] для різної дальності стрільби L , причому в обчислювальних експериментах вибирались $L_i = 1000 + 200 \cdot i$, $i = \overline{0, 15}$. Для кожної дальності обчислювалась середня точка влучення та середньоквадратичне відхилення.

Окремо постає питання про межі варіації вибраних для дослідження балістичних показників. За заводськими допусками маса снарядів може відрізнитися від номінальної на $\pm 3\%$ [11]. Якщо припустити, що маса снарядів підпорядковується нормальному розподілу, тобто виконується правило 3σ , коефіцієнти варіації для маси снаряда має бути в межах 0,01 від середнього. На сайті одного з виробників [22] подано дані для 30 мм снарядів для гармати 2A72 для швидкості і маси снарядів наводяться максимальні допустимі відхилення близько 1,5%, тобто коефіцієнти варіації будуть близько 0,005. Тому у різних серіях обчислювальних експериментів задавалися значення коефіцієнтів варіації 0,001, 0,0025, 0,005, 0,01. Таким чином імітувалися різні партії набоїв.

Для визначення прийнятної кількості реалізацій N обчислювального експерименту було проведено кілька серій обчислювальних експериментів. На рисунку 1а наведено результати трьох серій обчислень середньоквадратичного відхилення влучень снарядів (Sd_u) за дальністю для випадкових відхилень початкової швидкості снаряда u_0 . У серіях кількість реалізацій однакова $N = 100$, а $d_u = 0,001$. Результати свідчать, що значення Sd_u від серії до серії досить відрізняються, що свідчить про недостатню кількість реалізацій. З метою визначення необхідної кількості реалізацій проведено обчислювальні експерименти, результати яких наведено на рисунку 1б. У цих серіях $d_u = 0,001$ залишився без змін, а кількість реалізацій набувала значень $N = 100, 1000, 10000$. У подальших розрахунках проводилися серії з кількістю реалізацій $N = 1000$, що є прийнятним компромісом між часом обчислень та характером відображення тенденції зміни Sd_u зі збільшенням дальності. На

рисунку 2 наведено результати моделювання для середньоквадратичного відхилення за висотою (Sd_u).

Рис.1. Зміни зі збільшенням дальності середньоквадратичного відхилення Sd_u за дальністю у різних серіях обчислювальних експериментів для випадкових відхилень початкової швидкості снаряда u_0 , $d_u = 0,001$: а) при $N = 100$; б) при $N = 100, 1000, 10000$

Рис.2. Зміни зі збільшенням дальності середньоквадратичного відхилення Sd_u за висотою у різних серіях обчислювальних експериментів для випадкових відхилень початкової швидкості снаряда u_0 , $d_u = 0.001$: а) при $N = 100$; б) при $N = 100, 1000, 10000$

В обчислювальних експериментах для кожної дальності виконується співвідношення

$$Sd_y \approx Sd_x \operatorname{tg} \alpha,$$

де Sd_y – середньоквадратичне відхилення за висотою, Sd_x – середньоквадратичне відхилення за дальністю, α – середній кут падіння для заданої дальності. Похибка співвідношення менша ніж 1%, тому від оцінок розсіювання за висотою з достатньою точністю можна

перейти до оцінок розсіювання за дальністю. Тому далі у цій роботі ми будемо розглядати розсіювання за висотою.

Обчислювальні експерименти з одним випадковим фактором.

У дослідженні представлені результати моделювання впливу початкового випадкового відхилення одного з факторів (маса снаряда m , початкова швидкість снаряда u_0 , і кут кидання θ_{00}) на розсіювання снарядів за висотою на різних дальностях. При дослідженні впливу одного фактору на розсіювання снарядів значення інших двох факторів були фіксованими. Як показали обчислювальні експерименти, розсіювання снарядів за висотою зростає зі збільшенням дальності L . Для визначення степеня цього зростання ми застосували “емпірично-чисельний” метод підбору. Для цього значення середньоквадратичного відхилення Sd для кожної дальності ділилося на значення L^p , причому p підбиралося таким чином, щоб відношення Sd_u / L^p мало залежало від дальності, де показник p був не обов'язково цілим.

Очевидно, що вплив різних факторів є різним. Для кількісного порівняння впливу різних факторів на розсіювання за висотою для різної дальності у дослідженні запропоновано і застосовано метод нормування. Для цього для кожного фактора обчислювалося відношення $Sd(L) / Sd(1000)$, де $Sd(L)$ – середньоквадратичне відхилення на дальності L , $Sd(1000)$ – середньоквадратичне відхилення на дальності 1000 м.

У різних серіях обчислювальних експериментів випадкові відхилення початкової швидкості снаряда визначалися значеннями варіації $d_u = 0,001, 0,0025, 0,005, 0,01$. Іншими словами, на нашій моделі ми імітуємо випробування чотирьох партій снарядів, які відрізняються між собою різним розмахом відхилень початкової швидкості від табличної. На рисунку 3а наведено результати обчислень залежності середньоквадратичного відхилення влучень Sd_u від дальності L .

На рисунку 3б наведено залежності відношення Sd_u / L^3 від дальності. Аналізуючи графіки робимо висновок, що середньоквадратичне відхилення влучень Sd_u має третій порядок зростання $O(L^3)$ зі зростанням дальності.

Рис.3. Залежності від дальності:

- а) середньоквадратичного відхилення Sd_u / L_i для випадкових відхилень початкової швидкості снаряда; б) відношення Sd_u / L^3 при різних значеннях варіації d_u

На рисунку 4а проілюстровано результати обчислювальних експериментів, що відображають залежності середньоквадратичного відхилення Sd_{teta} від дальності для випадкових відхилень кута кидання за різних значень $d_{teta} = 0,001, 0,0025, 0,005, 0,01$, а на рисунку 4б – залежності відношення Sd_{teta} / L^3 від дальності. Рисунок 4б демонструє, що середньоквадратичне відхилення влучень Sd_{teta} має порядок зростання $O(L^3)$.

Рис.4. Залежності: а) середньоквадратичного відхилення Sd_{teta} від дальності для випадкових відхилень кута кидання за різних значень варіації d_{teta} ;
б) відношення Sd_{teta} / L^3 від дальності

На рисунку 5а наведено результати обчислювальних експериментів, що показують залежності середньоквадратичного відхилення Sd_m від дальності для випадкових відхилень маси снаряда при різних значеннях $d_m = 0.001, 0.0025, 0.005, 0.01$, а на рисунку 5б – залежності відношення $Sd_m / L^{3.4}$ від дальності. Рисунок 5б ілюструє, що середньоквадратичне відхилення влучень Sd_m має порядок зростання $O(L^{3.4})$.

Рис.5. Залежності: а) середньоквадратичного відхилення Sd_m від дальності для випадкових відхилень маси снаряда за різних значень d_m ; б) відношення $Sd_m / L^{3.4}$ від дальності

Таким чином, розсіювання снарядів, що спричинене випадковими відхиленнями маси снаряда, має більший порядок зростання зі збільшенням дальності, ніж у разі випадкових відхилень початкової швидкості або кута кидання. На рисунку 6 наведено порівняння порядків зростання нормованих розсіювань кута кидання $Sd_{teta}(L)/Sd_{teta}(1000)$, початкової швидкості снаряда $Sd_u(L)/Sd_u(1000)$, маси снаряда $Sd_m(L)/Sd_m(1000)$, при $d_{teta} = d_u = d_m = 0,001$. Розсіювання, спричинене випадковими відхиленнями початкової швидкості снаряда та маси снаряда мають на інтервалі дальностей від 1000 м до 4000 м практично однаковий порядок зростання зі збільшенням дальності, а розсіювання, спричинене випадковими відхиленнями маси снаряда, має більший порядок.

Рис.6. Порівняння нормованих розсіювань: 1 – кута кидання $Sd_{teta}(L)/Sd_{teta}(1000)$,
2 – початкової швидкості снаряда $Sd_u(L)/Sd_u(1000)$, 3 – маси снаряда $Sd_m(L)/Sd_m(1000)$,
при $d_{teta} = d_u = d_m = 0,001$

Обчислювальні експерименти з сукупним впливом випадкових факторів.

Для дослідження впливу кількох факторів було проведено кілька серій обчислювальних експериментів. У першій серії маса снаряда та початкова швидкість набували випадкових значень у відповідності до (8), (9) незалежно одна від одної. Розраховувалися траєкторії польоту снаряда для кожної реалізації і обчислювалось середньоквадратичне відхилення $Sd_{u,m}$ від середньої точки влучення. У реальній ситуації визначити у яких співвідношеннях перебувають коефіцієнти варіації маси снаряда d_m та початкової швидкості d_u досить складно, тому у числових експериментах приймалось: $d_m = 0,001, 0,0025, 0,005, 0,01$, для кожного з цих значень перебирались значення $d_u = 0,001, 0,0025, 0,005, 0,01$.

Результати для дальностей 1000, 2000, 3000, 4000 метрів представлено на рисунку 7. З графіків видно, що сукупне середньоквадратичне розсіювання $Sd_{u,m}$ на дальності 1000 м практично лінійно залежить від коефіцієнта варіації випадкових відхилень початкової швидкості d_u і не залежить від варіації випадкових відхилень маси снаряда d_m . На більших дальностях з'являється вплив варіації випадкових відхилень маси снаряда d_m і зі збільшенням дальності він зростає.

Зауважимо, що випадок незалежних випадкових відхилень маси снаряда та початкової швидкості являє здебільшого теоретичний інтерес, а для практичних застосувань їх не можна вважати незалежними. З рівнянь внутрішньої балістики [23] витікає, що при постійних параметрах порохового заряду зі збільшенням маси снаряда дульна (для задачі зовнішньої балістики – початкова) швидкість зменшується і навпаки. Тому у другій серії числових експериментів після генерування пари значень маси снаряда та початкової швидкості $m_i^*, u_{0i}^*, i = \overline{1, N}$ у відповідності до (8), (9), значення початкової швидкості перераховувалось відповідно до [24] за формулою:

$$u_{0i}^* = \sqrt{\frac{m_i^* (u_{0i}^*)^2}{m^*}}, \quad k = \overline{1, N}. \quad (11)$$

Для кожної пари значень $m_i^*, u_{0i}^*, i = \overline{1, N}$, розраховувалась траєкторія польоту снаряда, визначалась точка влучення снаряда і обчислювалось середньоквадратичне відхилення $Sd'_{u,m}$.

Результати для дальностей 1000, 2000, 3000, 4000 метрів представлено на рисунку 8. На графіках видно, що сукупне середньоквадратичне розсіювання влучень $Sd'_{u,m}$ у цьому випадку значно залежить від коефіцієнта варіації випадкових відхилень початкової швидкості d_u . Для малих дальностей (1000 м, 2000 м) спостерігається незначний вплив варіації відхилень маси снаряда d_m і зі збільшенням дальності цей вплив зникає.

У випадку дослідження сукупного впливу у парах факторів кут кидання – маса снаряда та кут кидання – початкова швидкість снаряда немає вагомих підстав вважати ці фактори залежними.

У серії обчислювальних експериментів, у яких маса снаряда та кут кидання набували випадкових значень у відповідності до (8), (9) незалежно одна від одної, розраховувались траєкторії польоту снаряда для кожної реалізації і обчислювалось середньоквадратичне відхилення $Sd_{teta,m}$ від середньої точки влучення. Результати для дальностей 1000, 2000, 3000, 4000 метрів представлено на рисунку 9. Графіки ілюструють, що сукупне середньоквадратичне розсіювання влучень $Sd_{teta,m}$ на дальності 1000 м практично лінійно залежить від коефіцієнта варіації випадкових відхилень маси снаряда d_m , спостерігається незначний вплив варіації випадкових відхилень кута кидання d_{teta} . На більших дальностях з'являється вплив варіації відхилень кута кидання d_{teta} і зі збільшенням дальності цей вплив значно зростає.

Рис.7. Залежності середньоквадратичного розсіювання влучень $Sd_{u,m}$ у метрах від коефіцієнта варіації випадкових відхилень маси снаряда d_m та початкової швидкості снаряда d_u для різних дальностей у випадку незалежності випадкових відхилень маси снаряда та початкової швидкості

У серії обчислювальних експериментів, у яких початкова швидкість та кут кидання набували випадкових значень у відповідності до (8), (9) незалежно одна від одної, розраховувались траєкторії польоту снаряда для кожної реалізації і обчислювалось середньоквадратичне відхилення $Sd_{teta,u}$ від середньої точки влучення. Результати для дальностей 1000, 2000, 3000, 4000 метрів представлено на рисунку 10. На графіках на дальності 1000 м спостерігається переважаюча залежність сукупного середньоквадратичного розсіювання влучень $Sd_{teta,u}$ від коефіцієнта варіації випадкових відхилень початкової швидкості d_u , хоча є і залежність від варіації випадкових відхилень кута кидання d_{teta} . На більших дальностях вплив варіації випадкових відхилень початкової швидкості d_u значно зростає.

Рис.8. Залежності середньоквадратичного розсіювання влучень $Sd'_{u,m}$ від коефіцієнтів варіації випадкових відхилень маси снаряда d_m та початкової швидкості снаряда d_u для різних дальностей у випадку залежних випадкових відхилень маси снаряда та початкової швидкості

а) 1000 м

б) 2000 м

в) 3000 м

г) 4000 м

Рис.9. Залежності середньоквадратичного розсіювання влучень $Sd_{teta,m}$ від коефіцієнтів варіації випадкових відхилень маси снаряда d_m та кута кидання d_{teta} для різних дальностей

Рис.10. Залежності середньоквадратичного розсіювання влучень $Sd_{teta,u}$ для дальності 1000,2000, 3000, 4000 м від коефіцієнта варіації випадкових відхилень кута кидання d_{teta} та коефіцієнта варіації відхилень маси снаряда d_u

Аналіз залежностей представлених на рисунках 8–10 показує, що переважаючий вплив на величину сумарного розсіювання здійснює варіація початкової швидкості d_u . Для підтвердження цього було проведено серію обчислювальних експериментів, де випадкові варіації надавалися усім трьом факторам за формулами (8)–(10) відповідно. Маса та початкова швидкість вважалися залежними і кожне згенероване значення швидкості перераховувалося за формулою (11). Результати представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати моделювання впливу трьох балістичних факторів на розсіювання снарядів

d_u	d_m	d_{teta}	$Sd_{u,m,teta}$ (1000)	$Sd_{u,m,teta}$ (2000)	$Sd_{u,m,teta}$ (3000)	$Sd_{u,m,teta}$ (4000)
0,001	0,001	0,001	0,0153	0,0844	0,2974	0,7177
0,001	0,001	0,01	0,0634	0,3503	1,1180	2,7872
0,001	0,01	0,001	0,0568	0,2179	0,3539	0,8483
0,001	0,01	0,01	0,0819	0,3900	1,0774	2,9289
0,01	0,001	0,001	0,1306	0,7643	2,7336	6,5200
0,01	0,001	0,01	0,1468	0,8397	2,9856	7,1156
0,01	0,01	0,001	0,1421	0,8186	2,7245	6,6613
0,01	0,01	0,01	0,1526	0,8743	2,9797	7,0052

Для визначення величини впливу коефіцієнтів варіації d_u, d_m, d_{teta} на сумарне розсіювання $Sd_{u,m,teta}$ проведено множинний регресійний аналіз даних з таблиці 1. Тобто для кожної досліджуваної дальності було побудовано своє рівняння множинної регресії, що відображає кореляційний зв'язок результативної (залежної) змінної $Sd_{u,m,teta}$ і пояснюючих (незалежних) змінних d_u, d_m, d_{teta} . Ці рівняння будуються у вигляді:

$$Sd_{u,m,teta} = \beta_u \cdot d_u + \beta_m \cdot d_m + \beta_{teta} \cdot d_{teta} + b,$$

де коефіцієнти $\beta_u, \beta_m, \beta_{teta}$ відображають наскільки змінюється сумарне розсіювання $Sd_{u,m,teta}$ при зміні коефіцієнтів варіації d_u, d_m, d_{teta} відповідно, b дорівнює значенню $Sd_{u,m,teta}$ у випадку, коли d_u, d_m, d_{teta} всі дорівнюють 0, і інтерпретується як випадкова помилка регресії або як частина сумарного розсіювання, що не пояснюється змінами незалежних змінних d_u, d_m, d_{teta} .

Коефіцієнти регресійних залежностей для кожної дальності було обчислено за допомогою стандартної процедури множинного регресійного аналізу з пакета Statistica 6.0 [25]. Значення коефіцієнтів наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати множинного регресійного аналізу впливу трьох балістичних факторів на розсіювання снарядів

Дальність	β_u	β_m	β_{teta}	b	R^2	P_{R^2}
1000	0,9658	0,0001	0,2310	0,1599	0,9652	0,0022
2000	0,9531	0,1108	0,2406	0,0710	0,9786	0,0009
3000	0,9658	0,0001	0,2310	0,1599	0,9861	0,0004
4000	0,9658	0,0001	0,2310	0,1599	0,9861	0,0004

Відмітимо, що R^2 – квадрат множинного коефіцієнта кореляції показує, яка частина варіації $Sd_{u,m,teta}$ пояснюється знайденою регресією, P_{R^2} – рівень значущості множинного коефіцієнта кореляції для кожного рівняння. Регресійний коефіцієнт β_m має достовірність не меншу 90% для всіх дальностей, а всі інші – не меншу 95%.

Значення коефіцієнтів регресії (Таб.2) свідчать про те, що варіація початкової швидкості d_u здійснює переважаючий вплив на сумарне розсіювання снарядів. Це випливає з того, що коефіцієнти β_u значно перевищують інші коефіцієнти. Такий результат підтверджується також висновком з роботи [5], в якій наводяться результати дослідження для іншого калібру гармати.

У таблиці 3 та на рисунку 11 наведено значення розсіювання, отримані за допомогою моделювання $d_u = d_m = d_{teta} = 0,01$ (найбільші з тих, що розглядалися) та значення розсіювання з таблиць стрільби [20], де середньоквадратичні відхилення $Sd_{u,m,teta}$ перераховані до серединного відхилення за формулою (1). Зауважимо, що, з одного боку, невідомо у яких співвідношеннях знаходилися варіації балістичних показників при розробці таблиць стрільби, а, з іншого боку, дані з таблиць стрільби могли зазнати впливу додаткових факторів (крім розглянутих у даній роботі). З огляду на це, запропонована методика моделювання розсіювання під впливом початкових випадкових варіацій балістичних факторів дозволяє дослідити загальні тенденції розсіювання снарядів.

Таблиця 3

Порівняння розсіювання отриманого за допомогою моделювання з таблицями стрільби

Дальність (м)	Модель		Табличні Вв (м)
	$Sd_{u,m,teta}$	Вв (м)	
1000	0,15	0,10	0,5
2000	0,87	0,59	1
3000	2,98	2,01	2,1
4000	7,01	4,73	5,2

Рис.11. Порівняння розсіювання отриманого за допомогою моделювання з таблицями стрільби (суцільна лінія – таблиці стрільби, пунктирна – моделювання)

Висновки. У цій роботі проведено дослідження впливу початкових випадкових варіацій балістичних факторів на розсіювання снарядів за висотою шляхом моделювання методом Монте-Карло. Оскільки проведення такого дослідження експериментальним шляхом практично неможливо, то використання методів статистичного моделювання і проведення обчислювального експерименту дозволяє дослідити як вплив відхилень кожного окремого балістичного показника на розсіювання попадань, так і їх комбінацій.

Якщо розглядати вплив варіації кожного з балістичних факторів окремо, то найбільший порядок зростання $O(L^{3.4})$ зі збільшенням дальності має розсіювання для початкових варіацій маси снаряда, а для початкових варіацій початкової швидкості снаряда та кута кидання таке зростання має однаковий порядок $O(L^3)$. У зв'язку з цим, в обчислювальних експериментах з комбінованим впливом двох факторів спостерігався різний характер поведінки розсіювання на різних дальностях у залежності від співвідношення значень початкових варіацій досліджуваних факторів.

У випадку сукупного впливу на розсіювання всіх трьох досліджуваних факторів найбільший вплив має величина варіації початкової швидкості снаряда. Тому для зменшення технічного розсіювання виробникам боєприпасів необхідно в першу чергу звернути увагу на чинники, що впливають на варіацію початкової швидкості. На наш погляд, програмне забезпечення та методика дослідження можуть бути використані розробниками боєприпасів для поліпшення їхніх бойових можливостей та експлуатаційних характеристик.

Для визначення характеру та оцінки числових значень величини впливу різних параметрів боєприпасів, надалі буде проведено аналогічне дослідження за допомогою моделі внутрішньої балістики [23].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика / А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лысенко. – Москва: Машиностроение, 2005. – 607 с.
2. Метод расчета характеристик рассеивания неуправляемых вращающихся реактивных снарядов / В.И. Макеев, В.И. Грабчак, П.Е. Трофименко, Ю.И. Пушкарев // Системы обработки информации. – 2009. – Вып. № 1. – С. 71–78.
3. Rabbath C. A. Statistical method for the evaluation of projectile dispersion / C. A. Rabbath, D.A. Corriveau // Defence Technology, 2017, vol. 13. – P. 164–176.
4. Youliang Xu. The Firing Dispersion of Bullet Test Sample Analysis / Youliang Xu, Junbin Zhang, Li Ma, Yonghai Shan // International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, 2015, Vol. 3, No. 2. – DOI: 10.1016/j.dt.2017.04.008.
5. Cao N. Evaluation on Firing Dispersion of Wheeled Artillery Based on Stepwise Regression Analysis / N. Cao, X. Wang, Y. Xu, Q. Yin // Journal of Ballistics, 2012, vol. №4.
6. Janković S. Dispersion of an Artillery Projectile Due to Unbalance / Janković, S. Gallant, J., Celens, E. // Proceedings of 18th International Symposium on Ballistics, 15–19 November 1999. – San Antonio, Texas, USA, , Reinecke, W. (Ed.), A Technomic Publishing Company Book, Lancaster, PA, 1999. – P. 128–141.
7. Mingireanu F. Trajectory Modeling of GRAD Rocket With Low-Cost Terminal Guidance Upgrade Coupled to Range Increase Through Step-Like Thrust-Curves / F. Mingireanu, L. Georgescu, G. Murariu, I. Mocanu // Romanian Journal of Physics, 2014, Vol. 59, No. 3. – P. 369–381. – DOI:10.21608/asat.2013.22052.
8. Trzun Z., Andrić M., Vrdoljak M. Using a 3D Model to Asses Projectile's Impact Points Deviation Due to Manufacturing Errors / Z. Trzun, M. Andrić, M. Vrdoljak // 30TH DAAAM International Symposium On Intelligent Manufacturing And Automation. – P. 0791–0799. – DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.110.
9. Макеев В.И. Метод расчета характеристик рассеивания неуправляемых вращающихся и оперенных реактивных снарядов / В.И. Макеев, В.И. Грабчак, П.Е. Трофименко, Ю.И. Пушкарев // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Харків: ХВУ, 2009. – Вип. № 1(75). – С. 71–78.
10. Макеев В.И. Методика розрахунку характеристик розсіювання некерованих літальних апаратів. / В.И. Макеев, В.М. Петренко, В.Є. Житник, С.М. Колобилін // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Харків: ХВУ, 2011. – Вип. 4 (94). – С. 39–42.
11. Рикунів О.Н. Обеспечение точности стрельбы путем обоснования характеристик модуля вооружения модернизируемых легких бронированных машин / О.Н. Рикунів, А.Ю. Танченко, Н.А. Ткачук и др // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Машинознавство та САПР. – Харків: ХПІ, 2018. – Т. 86. – Вип. № 7(1283). – С. 86–106.
12. Королев С.А. Методика имитационного моделирования рассеивания снарядов. Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – Том 17. – Вип. № 1. – С. 57–62.
13. Pincevičius A. The Numerical Simulation in Ballistics / A. Pincevičius, R. J. Rakauskas, G. Misevičius // Nonlinear Analysis: Modelling and Control. – 2001. – V. 6, № 1. – PP. 89–104.

14. Наставления по стрелковому делу. Основы стрельбы из стрелкового оружия. – М.: Военное издательство, 1984. – 176 с.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
16. Стеля О.Б. Комп'ютерне моделювання траєкторії руху центра маси тіла, кинутого під кутом до горизонту / О.Б. Стеля, І.П. Сіренко, Л.І. Потапенко // Журн. обчисл. та прикл. матем. – 2014. – Вип. № 3(117). – С. 87-95.
17. Стеля О.Б. Використання параболічного сплайна для інтерполяції функцій опору повітря / О.Б. Стеля, І.П. Сіренко, Л.І. Потапенко // Військово-технічний збірник. – Львів: НАСВ імені гетьмана Петра Сагайдачного, 2016. – Вип. № 14. – С. 54-59.
18. Buy D. Development of computational techniques to solve problems external and internal ballistics / D. Buy, O. Stelia, I. Sirenko, L. Potapenko // Science. Business. Society, 2016.– Iss. 4. – PP. 3-6.
19. Арушанян О.Б. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений на Фортране / О.Б. Арушанян, С.Ф. Залеткин. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 336 с.
20. Правила стрельбы из стрелкового оружия и боевых машин. – М.: Военное издательство, 1992. – 208 с.
21. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов. – Изд. 9-е, стереотип. – М.: Высшая школа, 2003. – 480 с.
22. Ammunition 30mm x 165 AP-T for anti-aircraft gun 30mm 2A72. – Режим доступу: <https://yugoimport.com/en/proizvodi/ammunition-30mm-x-165-ap-t-anti-aircraft-gun-30mm-2a72>.
23. Стеля О.Б. Чисельне моделювання піродинамічних процесів на основі комп'ютерної моделі внутрішньої балістики / О.Б. Стеля, Л.І. Потапенко, І.П. Сіренко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2017. – Вип. № 1(28). – С. 53–57.
24. Litz B. Applied Ballistics for Long-Range Shooting. 2nd edition. Applied Ballistics, LLC, 2011.
25. Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных. – М.: Бином, 2010. – 512 с.

Сіренко Ігор Павлович

провідний інженер факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4666-7754>
+38-050-547-62-72

Пашко Анатолій Олексійович

доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри теоретичної кібернетики факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6944-8477>
+38-066-024-50-72

Стеля Олег Борисович

кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1453-501X>
+38-050-500-57-06

Ihor Sirenko

Senior Engineer, Faculty of Computer Science and Cybernetics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine. Research), Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4666-7754>
+38-050-547-62-72

Anatolii Pashko

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of Department of Theoretical Cybernetics, Faculty of Computer Science and Cybernetics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6944-8477>
+38-066-024-50-72

Oleg Stelia

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Faculty of Computer Science and Cybernetics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine.
<https://orcid.org/0000-0002-1453-501X>
+38-050-500-57-06

Векленко Юрій Анатолійович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту
випробувань і сертифікації озброєння та
військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1658-0102>

Корзун Костянтин Іванович

науковий співробітник Державного науково-
дослідного інституту випробувань і
сертифікації озброєння та військової
техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0726-7693>

Yuri Veklenko

Senior Researcher of State Scientific
Research Institute of Armament and Military
Equipment Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1658-0102>

Kostiantyn Korzun

Researcher of State Scientific Research
Institute of Armament and Military
Equipment Testing and Certification,
Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0726-7693>

SIMULATION OF THE INFLUENCE OF BALLISTIC FACTORS ON SHELL DISSOLUTION

I Sirenko, A Pashko, O Stella, Y Veklenko and K Korzun

The influence of initial random variations of ballistic factors, such as mass, initial projectile velocity and throwing angle, on the scattering of projectiles by the Monte Carlo method is studied. The study used a computer external ballistic model of the projectile flight of a 30-mm gun, based on a system of differential equations. A parabolic spline is used to interpolate the air drag law of 1943. For each of the selected ballistic indicators (projectile mass, initial velocity of the projectile, and throwing angle), 1000 normally distributed random values were generated, and hit points were calculated, from which the standard deviation was calculated.

Several series of computational experiments were performed to study the influence of each factor separately, the pairwise influence of factors and the combined influence of three factors. In the case of the combined effect on the scattering of all three studied factors, the greatest influence is the magnitude of the variation of the initial velocity of the projectile. Software and techniques can be used by munitions developers to improve their combat capabilities and performance ammunition. When firing a firearm, the phenomenon of scattering occurs due to the variety of factors that change randomly from shot to shot. Scattering characteristics are determined by statistical processing of firing data in the range. Projectile scattering is closely linked to the effectiveness of hitting targets, and therefore the study of scattering is given much attention by researchers.

For practical application, scattering estimates obtained by statistical analysis of experimentally obtained data are usually used.

Keywords: external ballistics, dispersion modeling, Monte Carlo method.