НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

ГУЛЬЦОВ ПАВЛО СЕМЕНОВИЧ

УДК 681.516.77

ДИСЕРТАЦІЯ

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ СТАНАМИ ОБ'ЄКТІВ, ЩО РУХАЮТЬСЯ ВІЛЬНОЮ ТРАЄКТОРІЄЮ ПІД ЧАС ДИНАМІЧНИХ ЗБУРЕНЬ

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ П. С. Гульцов

Науковий керівник Максимов М.В. доктор технічних наук, професор

Одеса – 2024

АНОТАЦІЯ

Гульцов П. С. Автоматизоване керування станами об’єктів, що рухаються вільною траєкторією під час динамічних збурень. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології. – Національний університет «Одеська політехніка» МОН України, Одеса, 2024.

Дисертаційна робота присвячена визначенню оптимального часу бойового застосування артилерійської гармати під час тривалих динамічних збурень способом удосконалення імітаційних моделей та методів автоматизованого керування станами для забезпечення мінімальних втрат артилерійських снарядів і збереження боєздатності гармати. Цей процес уможливлюється при автоматизованому керуванні станами гармати під час практичної стрільби для виявлення межового показника дальності польоту снаряда. Пошук найбільш ефективного часу для бойового застосування гармати здійснено методом Марківського моделювання й комп’ютерної системи автоматизації структурною верифікацією пострілу артилерійським снарядом засобом оптимізації генетичним алгоритмом.

У першому розділі «Способи визначення станів артилерійської гармати під час динамічних збурень» одержано такі результати.

– Мінімізація часу на прийняття рішень і подальша їх реалізація системою керування є основним критерієм бойового застосування артилерії. Для цього під час дослідження варто здійснити удосконалення імітаційної моделі розподіленого утворення порохових газів по довжині ствола гармати в процесі пострілу на основі одновимірної задачі керування температурою та методу її визначення по рівноважній моделі для виявлення станів як додаткової діагностичної ознаки для апроксимаційної моделі дальності польоту снаряду. Найдоцільнішим способом отримання необхідних оперативних даних для

формування поточного пострілу під час автоматизованого керування є аналіз інформації про попередній постріл артилерійським снарядом.

Результати дослідження станів гармати та її пострілів продемонстрували, що у польових умовах удосконалення роботи зброї уможливлюється лише шляхом урахування збурень, що впливають на наявні фізичні поля. Відповідні дані можна отримати як непрямими вимірами акустичних полів, так і на основі проявів керування температурою порохових газів під час пострілу.

– Показано, що для подальшого успіху виконання бойового завдання необхідно провести удосконалення методу і моделі ефективного автоматизованого керування бойовою роботою артилерійським підрозділом під час ураження цілі за умови зміни вогневої позиції для забезпечення найменшої втрати боєздатності та мінімального часу руху артилерійського снаряда вільною траєкторією на максимальну дальність. Обґрунтовано важливість розробки методу і моделі параболічної апроксимації визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею на основі реєстрації балістичної хвилі, утвореної артилерійським снарядом, що летить траєкторією, розподіленою у просторовому відношенні системою акустичних сенсорів, способом упровадження комп’ютерної системи автоматизації.

– Обґрунтовано структуру дослідження і поставлено завдання, яке полягає у визначенні оптимального часу виконання бойової задачі артилерійською гарматою під час тривалих динамічних збурень засобом удосконалення імітаційних моделей та методів керування станами гармати для забезпечення мінімальної втрати її боєздатності.

У другому розділі «Моделювання утворення дульного викиду як діагностичної ознаки стану пострілу» одержано такі результати:

– Визначено причину неможливості опису явища утворення сажі у використанні наявних моделей процесів внутрішньої балістики. В основі її лежить відсутність можливості керувати температурою порохових або димових газів по довжині ствола та її зміна в процесі пострілу. На прикладі запропонованої моделі у вигляді одновимірної задачі розрахунку параметрів

методом кінцево-різницевих елементів розроблено алгоритм вирішення задачі внутрішньої балістики з можливістю визначення температури порохових газів по довжині ствола в різні моменти часу на базі рівноважної моделі та при різному положенні артилерійського снаряда у стволі.

– На основі аналізу умов, за яких відбувається розширення порохових газів під час артилерійського пострілу, проведено моделювання розподілу температури порохових газів у порожнині ствола між зарядною коморою і рухомим снарядом засобом одновимірної задачі із застосуванням методу кінцево-різницевих елементів. Показано можливість зміни протяжності зони утворення сажі залежно від вихідних даних при автоматизованому керуванні. Імітаційна модель дозволила отримати результати використання свіжого порохового заряду та деградуючого, для повного та зменшеного заряду.

– Розроблено імітаційну модель одновимірної задачі розподіленого утворення порохових газів, зокрема сажі, під час їх розширення в стані пострілу артилерійської гармати, що дало можливість розробити метод визначення зміни їх температури по довжині ствола з встановленням межової кількості сажі методом кінцево-різницевих елементів. Таким чином для реалізації завдання автоматизованого керування додалися діагностичні ознаки, необхідні для визначення ефективності пострілу й контролю станів гармати.

У третьому розділі «Удосконалення методу й моделі керування бойовим застосуванням артилерійської установки» для автоматизованого керування станами гармат під час динамічних збурень виконано таке:

– Удосконалено узагальнений кількісний критерій оцінки ефективності стрільби артилерійського підрозділу під час автоматизованого керування за наявності випадкових збурень пострілів, що діють на систему контролю. Критерій структурований на основі різносторонньої згортки частинних факторів методом ідеальної точки.

– Розроблено стохастичну модель ефективності послідовної стрільби артилерійського підрозділу на базі Марківського моделювання. Модель дозволяє врахувати випадкові збурення, наявність яких можлива у кожному

пострілі окремих гармат. Збурення, фіксація яких надходить в комп'ютерну систему автоматизації, зумовлені невиявленими раніше зношеністю зарядної камори гармати, зношеністю ствола гармати та неповними даними в інформаційній моделі про стан використаного під час пострілу заряду.

– Розроблено модель керування бойового застосування артилерійської установки, що реалізує завдання знищення цілі заданою кількістю снарядів за умови зміни вогневої позиції для зменшення ймовірності її вогневого ураження артилерійською установкою ворожої сторони. Динаміка системи взаємодії «артилерійська установка атакуючої сторони − ціль − артилерійська установка протидіючої сторони» розглядається в процесах дій. Імітаційна модель визначає зменшення боєздатності в часі за рахунок раптових відмов, а також відмов через зношеність під час проведення бойової роботи та відмов з причини ураження протиборчою стороною. Модель враховує, що всі постріли ефективні, тобто ймовірність влучання кожного більше ніж 50%. У модель уведено припущення, що кількість вогневих позицій дорівнює кількості пострілів, необхідних для ураження цілі, а мінімальна кількість пострілів з вогневої позиції дорівнює одиниці для формування розв'язання методом генетичного алгоритму. Модель зміни позиції не передбачає повернення на попередні. Оптимізація переміщення з однієї позиції на іншу відбувається послідовно по одній з доріг певної якості та різної ймовірності ураження протиборчою стороною.

– Розроблено метод пошуку рішення про стан виконання бойового застосування артилерійською установкою атакуючої сторони по запропонованій моделі. Введено поняття поточної структури виконання бойового завдання, що являє собою послідовність кількості пострілів на кожній із вогневих позицій та номерів доріг, якими відбувається зміна позицій. Метод пошуку рішення про стан виконання бойового завдання артилерійською установкою можна віднести до розв'язання Парето−орієнтованих задач, або задач динамічного програмування. Але кількість вхідних параметрів і змінних аргументів дозволили отримати всі можливі розв'язування прямим перебором.

У четвертому розділі «Метод параболічної апроксимації визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею» досягнута мета дисертаційного дослідження, а саме:

– Розроблено та досліджено модель та метод верифікації артилерійського пострілу з випадковими збуреннями. Метод заснований на реєстрації балістичної хвилі, утвореної снарядом, що летить траєкторією, розподіленою у просторовому відношенні системою акустичних сенсорів. Розроблений метод дає можливість провести верифікацію пострілу ще до приземлення снаряда та його розриву. В основу методу покладено моделі стандарту НАТО.

– Проведено обчислювальний імітаційний експеримент, який продемонстрував, що розроблений метод дозволяє суттєво обмежити час вогневої реалізації артилерійської системи та зменшити витрати снарядів у компенсації динамічних збурень порівняно з традиційним пристрілом. Натурна польова перевірка і використання методів стандарту НАТО підтвердили правильність основних наукових та технічних концепцій, покладених в основу дослідженого методу верифікації.

– Вперше запропоновано метод відстеження артилерійського снаряду під час дії на нього динамічних збурень на основі реєстрації балістичної та дульної хвиль на відстані, що утворюються за дальністю польоту снаряда. Це дозволило здійснити верифікацію стану пострілу артилерійської гармати і визначити точку зіткнення снаряда з поверхнею на основі параболічної апроксимаційної моделі його характеристик. Метод верифікації засобом отриманої апроксимаційної моделі відповідає стандарту НАТО.

Ключові слова: артилерійський снаряд, одновимірна задача, автоматизоване керування, бойове застосування, стандарт НАТО, дальність польоту снаряда, імітаційна модель, комп’ютерна система автоматизації, Марківське моделювання, оптимізація генетичним алгоритмом, система керування, метод кінцево-різницевих елементів, апроксимаційна модель, рівноважна модель, керування температурою.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot, Brunetkin O. Maksymov M. Brunetkin V. Maksymov O. Dobrynin Y. Kuzmenko V. Gultsov P.. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4/1 (112). P. 41–53. Indexed in SCOPUS, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239150

2. Boltenkov V, Brunetkin O, Maksymova O, Kuzmenko V, Gultsov P, Demydenko V., Soloviova O. Devising a method for improving the efficiency of artillery shooting based on the Markov model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol 6. № 3 (114). P. 6-7. Indexed in SCOPUS, doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245854.

3. Maksymov M.V., Boltenkov V. O., Gultsov P. S., Maksymov O. M. Verification of artillery fire under the influence of random disturbances for the computer game ARMA 3. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol.6. No.4: p. 362–375. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.24. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

4. Maksymova O.B., Boltenkov V.O., Maksymov M. V., Gultsov P.S. Maksymov O.M. Development and Optimization of Simulation Models and Methods for Controlling Virtual Artillery Units in Game Scenarios. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023. Vol.6. No.4. p. 320–337. DOI: https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.21. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

5. Maksymova O., Boltyonkov V., Gultsov P., Maksymov O. Improvement of the model and method of artillery installation target damage control with minimal combat capability loss. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. Issue 2(68). Dec. 2023. P. 98–115. DOI: https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.1.

6. Спосіб визначення координати зустрічі артилерійського снаряда з поверхнею: патент України на винахід. № 127193; заявл. 28.04.21 ; опубл. 31.05.2023. Бюл. №22.

7. Спосіб визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати: пат. України на винахід. № 155822., заявл. 05.04.21 ; опубл. 24.04.24. Бюл. № 17.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Удосконалення моделі керування бойовою здатністю артилерійської гармати. *Topical aspects of modern scientific research*: Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2024. P. 256-261. URL: https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-topical-aspects-of-modern-scientific-research-25-27-01-2024-tokio-yaponiya-arhiv/.

9. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Удосконалення методу керування бойовою здатністтю артилерійської гармати. *European congress of scientific achievements*: Proceedings of the 1st International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2024. P. 120-125. URL: https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv/.

10. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Моделювання утворення дульного викиду як діагностичної ознаки про стан пострілу. *Science and society: modern trends in a changing world*. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Vienna, Austria. 2024. P. 184-190. URL: URL: https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-society-modern-trends-in-a-changing-world-22-24-01-2024-viden-avstriya-arhiv/.

11. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Метод параболічної апроксімації визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею. *Modern problems of science, education and society:* Proceedings of the

12th International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2024. P. 324-330. URL: https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-problems-of-science-education-and-society-5-7-02-2024-kiyiv-ukrayina-arhiv/.

ABSTRACT

Gultsov P. S. Automated state control of objects moving along a free trajectory during dynamic disturbances. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 – automation and computer-integrated technologies. - National University "Odesa Polytechnic" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2024 .

The dissertation is devoted to determining the optimal time of combat use of an artillery gun during long-term dynamic disturbances by improving simulation models and methods of automated control of states to ensure minimal losses of artillery shells and preserve the combat effectiveness of the gun. This process is made possible by the automated control of the gun's states during practical shooting to detect the limit indicator of the projectile's flight range. The search for the most effective time for the combat use of the cannon was carried out by the Markov modeling method and the computer automation system by the structural verification of the artillery projectile shot by means of genetic algorithm optimization.

The following results were obtained in the first chapter "Methods of determining the states of an artillery gun during dynamic disturbances".

– Minimizing the time for decision-making and their subsequent implementation by the control system is the main criterion for the combat use of artillery. For this purpose, during the research, it is necessary to improve the simulation model of the distributed formation of powder gases along the length of the gun barrel during the firing process based on the one-dimensional problem of temperature control and the method of its determination based on the equilibrium model for identifying states as an additional diagnostic feature for the approximation

model of the projectile flight range . The most expedient way to obtain the necessary operational data for the formation of the current shot during automated control is the analysis of information about the previous shot by an artillery projectile.

– The results of the study of the conditions of the gun and its shots demonstrated that in field conditions, the improvement of the weapon's operation is possible only by taking into account disturbances affecting the existing physical fields. Corresponding data can be obtained both by indirect measurements of acoustic fields and based on the manifestations of controlling the temperature of powder gases during a shot.

– It is shown that for the further success of the combat task, it is necessary to improve the method and model of effective automated control of the combat work of the artillery unit during the engagement of the target under the condition of changing the firing position to ensure the least loss of combat capability and the minimum time of movement of the artillery projectile along a free trajectory to the maximum range. The importance of developing a method and model of parabolic approximation for determining the coordinates of the collision of an artillery projectile with a surface based on the registration of a ballistic wave formed by an artillery projectile flying along a trajectory spatially distributed by a system of acoustic sensors, as a method of implementing a computer automation system, is substantiated.

– The structure of the research is substantiated and the task is set, which consists in determining the optimal time for the execution of a combat task by an artillery gun during long-term dynamic disturbances by means of improving simulation models and methods of controlling the states of the gun to ensure minimal loss of its combat capability.

The following results were obtained in the second chapter, "Modelling of the formation of muzzle discharge as a diagnostic sign of the state of the shot":

– The reason for the impossibility of describing the phenomenon of soot formation using existing models of internal ballistics processes was determined. It is based on the lack of ability to control the temperature of powder or smoke gases along the length of the barrel and its change during the firing process. On the example of

the proposed model in the form of a one-dimensional problem of parameter calculation by the method of finite-difference elements, an algorithm for solving the problem of internal ballistics was developed with the possibility of determining the temperature of powder gases along the length of the barrel at different moments of time based on the equilibrium model and at different positions of the artillery projectile in the barrel.

– Based on the analysis of the conditions under which powder gases expand during artillery fire, the temperature distribution of powder gases in the barrel cavity between the charging chamber and the moving projectile was modeled by means of a one-dimensional problem using the method of finite -difference elements. The possibility of changing the length of the soot formation zone depending on the output data during automated control is shown. The simulation model made it possible to obtain the results of using a fresh powder charge and a degrading, full and reduced charge.

– A simulation model of the one-dimensional problem of the distributed formation of powder gases, in particular soot, during their expansion in the state of an artillery gun shot was developed, which made it possible to develop a method for determining the change in their temperature along the length of the barrel with the establishment of the limit amount of soot by the method of finite -difference elements. Thus, for the implementation of the task of automated control, diagnostic signs were added, which are necessary for determining the effectiveness of the shot and monitoring the conditions of the gun.

In the third chapter "Improving the method and model of controlling the combat mission of an artillery installation" for the automated control of the states of guns during dynamic disturbances, the following is performed:

– The generalized quantitative criterion for evaluating the firing efficiency of an artillery unit during automated control in the presence of random disturbances of shots acting on the control system has been improved. The criterion is structured on the basis of a versatile convolution of partial factors by the ideal point method.

– A stochastic model of the effectiveness of sequential firing of an artillery unit based on Markov modeling was developed. The model allows you to take into account random disturbances, the presence of which is possible in each shot of individual guns. Disturbances, the recording of which enters the computer automation system, are caused by previously undetected wear of the gun charging chamber, wear of the gun barrel, and incomplete data in the information model about the state of the charge used during the shot.

– A control model for the combat use of an artillery installation has been developed, which implements the task of destroying a target with a given number of shells, subject to a change in firing position to reduce the probability of its fire damage by an enemy artillery installation. The dynamics of the system of interaction "artillery installation of the attacking party - target - artillery installation of the opposing party" is considered in the processes of actions. The simulation model determines the reduction of combat capability over time due to sudden failures, as well as failures due to wear and tear during combat work and failures due to damage by the opposing side. The model takes into account that all shots are effective, that is, the probability of hitting each one is greater than 50%. The model assumes that the number of firing positions is equal to the number of shots needed to hit the target, and the minimum number of shots from the firing position is equal to one to form a solution using the genetic algorithm . The model of change of position does not involve a return to the previous ones. Optimization of the movement from one position to another takes place sequentially along one of the roads of a certain quality and different probability of damage by the opposing side.

– A method of finding a decision on the state of execution of combat use by the attacking side's artillery installation based on the proposed model has been developed. The concept of the current structure of the combat task is introduced, which is the sequence of the number of shots at each of the firing positions and the numbers of the roads by which the positions are changed. The method of finding a decision on the state of execution of a combat mission by an artillery installation can be attributed to the solution of Pareto-oriented problems, or dynamic programming problems. But the

number of input parameters and variable arguments made it possible to obtain all possible solutions by direct enumeration.

In the fourth chapter " The method of parabolic approximation for determining the coordinates of the collision of an artillery projectile with the surface " the goal of the dissertation research was achieved, namely:

– A model and method for the verification of an artillery shot with random disturbances was developed and investigated. The method is based on the registration of a ballistic wave generated by a projectile flying along a trajectory distributed spatially by a system of acoustic sensors. The developed method makes it possible to verify the shot even before the projectile lands and breaks. The method is based on NATO standard models.

– A computational simulation experiment was conducted, which demonstrated that the developed method allows to significantly limit the time of fire implementation of the artillery system and reduce the cost of projectiles in compensation for dynamic disturbances compared to traditional firing. Real-time field verification and the use of NATO standard methods confirmed the correctness of the main scientific and technical concepts, which are the basis of the researched verification method.

– For the first time, a method of tracking an artillery projectile during the action of dynamic disturbances on it was proposed based on the registration of ballistic and muzzle waves at a distance formed by the flight range of the projectile. This made it possible to verify the firing state of the artillery gun and determine the point of contact of the projectile with the surface based on the parabolic approximation model of its characteristics. The method of verification using the obtained approximation model corresponds to the NATO standard.

Key words: artillery projectile, one-dimensional task, automated control, combat application, NATO standard, projectile flight range, simulation model, computer automation system, Markov modeling, genetic algorithm optimization, control system, finite -difference element method , approximation model, equilibrium model, temperature control.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published

1. Brunetkin O. Maksymov M. Brunetkin V. Maksymov O. Dobrynin Y. Kuzmenko V. Gultsov P. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4/1 (112). . P. 41–53. Indexed in SCOPUS, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239150

2. Boltenkov V, Brunetkin O, Maksymova O, Kuzmenko V, Gultsov P, Demydenko V., Soloviova O. Devising a method for improving the efficiency of artillery shooting based on the Markov model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol 6. № 3 (114). P. 6-7. Indexed in SCOPUS, doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245854.

3. Maksymov M.V., Boltenkov V. O., Gultsov P. S., Maksymov O. M., Verification of artillery fire under the influence of random disturbances for the computer game ARMA 3. *Applied Aspects of Information Technology.* 2023. Vol.6. No.4: p. 362–375, DOI: https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.24. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

4. Maksymova, O.B., Boltenkov, V.O., Maksymov M. V., Gultsov, P.S. Maksymov, O.M., Development and Optimization of Simulation Models and Methods for Controlling Virtual Artillery Units in Game Scenarios. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023. Vol.6. No.4. p. 320–337.DOI: https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.21. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

5. O. Maksymova, V. Boltyonkov, P. Gultsov, O. Maksymov. Improvement of the model and method of artillery installation target damage control with minimal combat capability loss. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. Issue 2(68), Dec. 2023. P. 98–115. DOI: https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.1.

6. The method of determining the coordinates of the meeting of the artillery projectile with the surface: patent of Ukraine for the invention. No. 127193; statement 28.04.21; published 31.05.2023. Bul. No. 22.

7. The method of determining the energy efficiency of an artillery gun: pat. of Ukraine for invention. No. 155822., application 04/05/21; published 24.04.24. Bul. No. 17.

Published works of approbation nature:

8. Tarakhtiy O. S., Gultsov P. S., Maksymov O. M. Improvement of the model for controlling the combat capability of an artillery gun. *Topical aspects of modern scientific research*. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2024. P. 256-261. URL: https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-topical-aspects-of-modern-scientific-research-25-27-01-2024-tokio-yaponiya-arhiv/ .

9. Tarakhtiy O. S., Gultsov P. S., Maksymov O. M. Improvement of the method of controlling the combat capability of an artillery gun. *European congress of scientific achievements*. Proceedings of the 1st International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2024. P. 120-125. URL: https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv/.

10. Tarakhtiy O. S., Gultsov P. S., Maksymov O. M. Modeling of the formation of muzzle discharge as a diagnostic sign of the state of the shot. *Science and society: modern trends in a changing world*. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Vienna, Austria. 2024. P. 184-190. URL: https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-society-modern-trends-in-a-changing-world-22-24-01- 2024-viden-austriya-arhiv/.

11. Tarakhtiy O. S., Gultsov P. S., Maksymov O. M. Parabolic approximation method for determining the coordinates of the collision of an artillery projectile with the surface. *Modern problems of science, education and society*. Proceedings of the

12th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Kyiv, Ukraine. 2024. P. 324-330. URL: https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-problems-of-science-education-and-society-5-7-02-2024-kiyiv-ukrayina- archive/.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 19
ВСТУП 20
РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНІВ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ ГАРМАТИ ПІД ЧАС ДИНАМІЧНИХ ЗБУРЕНЬ 26
1.1 Способи збереження боєздатності артилерійської гармати. 26
1.2 Аналіз моделей та методів визначення станів артилерійської гармати 29
1.3 Акустичні хвилі для ідентифікації артилерійських гармат. 33
1.4 Візуальне поле порохових газів дульного викиду. 37
1.5 Методи випробувань артилерійських стволів 42
1.5.1 Загальні відомості про систему полігонних випробувань 42
1.5.2 Технологічні аспекти підвищення стійкості артилерійських стволів 43
1.5.3 Експериментальні дослідження зношення стволів 46
1.6 Методи розрахунку стійкості стволів артилерійських систем 50
1.6.1. Методи й моделі розрахунку стійкості за характеристиками ствола 50
1.6.2 Методи й моделі розрахунку стійкості через характеристику системи «ствол - заряд - снаряд». 54
1.7 Інформаційне моделювання експлуатації артилерійських стволів. 58
1.7.1 Автоматизація моделювання експлуатації артилерійських стволів 58
1.7.2 Автоматизація розрахунків внутрішньобалістичними моделями стану стійкості стволів 62
1.8. Постановка завдання дослідження 66
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ ДУЛЬНОГО ВИКИДУ ЯК ДІАГНОСТИЧНОЇ ОЗНАКИ ПРО СТАН ПОСТРІЛУ 70
2.1 Загальні положення про інформаційне поле пострілу гармати. 70
2.2 Аналіз причин утворення сажі в каналі ствола під час пострілу 74
2.3. Модель утворення сажі на основі реакції Будуара – Белла 76

2.4. Метод визначення температури ПГ за довжиною ствола в процесі пострілу. 82

2.5. Результати моделювання розподілу температури. 89

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ Й МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ БОЙОВИМ ЗАСТОСУВАННЯМ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ УСТАНОВКИ 95

3.1 Загальні положення про ефективний постріл. 96

3.2 Моделювання бойової роботи артилерійських установок 98

3.3 Стохастична модель стрільби артилерійського підрозділу 101

3.4 Модель бойового застосування артилерійської установки. 107

3.5. Метод пошуку рішення виконання бойової задачі атакуючої сторони 110

3.6 Результати дослідження імітаційного експерименту. 116

РОЗДІЛ 4. МЕТОД ПАРАБОЛІЧНОЇ АПРОКСІМАЦІЇ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТИ ЗІТКНЕННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО СНАРЯДА З ПОВЕРХНЕЮ. 125

4.1 Загальні положення. 125

4.2 Загальні положення завдань акустичної розвідки. 126

4.3 Метод реєстрації координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею. 130

4.4 Акустичні поля пострілу – основа методу реєстрації координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею 137

4.5 Метод верифікації пострілу 139

4.6 Імітаційне моделювання методу верифікації пострілу 144

4.7 Порівняльний аналіз методів 147

ВИСНОВКИ 153

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 157

ДОДАТОК А 177

ДОДАТОК Б 180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ – автоматизована система управління

АП – артилерійський підрозділ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

БПЛА – безпілотний літальний апарат

БХ – балістична хвиля

ВП – ведучий поясок

ДХ – дульна хвиля

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

ЗКГ – зарядна комора гармати

ІО – інформативні ознаки

ІТ – інформаційні технології

КВА – комплект вимірювальної апаратури

КА – кумулянтний аналіз

ЛТО – лазерна термічна обробка

МВДР – метод визначення диференціального рівняння

МДЕ – модель дульної енергії

ММ – математичні моделі

МО ЗСУ – Міністерство оборони Збройних Сил України

НДР – науково-дослідна робота

НЦ – нітроцелюлоза

ПГ – порохові гази

РЛС – радіо-локаційна станція

САУ – самохідна артилерійська установка

ТД – технічне діагностування

ТЗ – технічне завдання

УЕК – умовний еквівалентний калібр

ВСТУП

Сучасне військове мистецтво, яке враховує моделі перебігу бойових застосувань ворогуючих сторін та інтенсивне застосування військової сили і, як результат, різні результати бойового спротиву, пропонує використовувати вогневі засоби безмежної потужності з системами автоматизованого управління [1] привели до виникнення інформаційних бар'єрів двох видів [2]. Фундаментом військового мистецтва є вміння розв'язувати задачі тактичного рівня. Головною складовою для розв'язку є інформаційне середовище яке утворюється спеціалізованими підрозділами. Базовою складовою розв'язання тактичних задач будь-якої бойової дії є її імітаційне моделювання. Існує запит військової практики який потребує представляти результати будь яких видів моделювання в разі принципової відсутності різних видів бойових спроможностей, або озброєнь [3,4].

Поточний аналіз останніх воєнних світових конфліктів, терористичних військових дій і розвиток подій російсько-української війни довів можливість використання артилерії як головної ударної компоненти розв'язання тактичних задач і як результат 80% обсягу виконаних завдань по вогневому ураженню ворога було залучено артилерію. Аналіз світових військових конфліктів, зокрема в Іраку [5], Афганістані [6], Сирії та російсько-українській війні [7], виявив, що артилерійський вогонь визначає основну силову складову бойових дій.

В артилерійському пострілі завжди є випадкові збурення. Ці збурення не можна усунути в процесі підготовки стрільби. Насправді вони компенсуються шляхом послідовної пристрілки. Сучасна тактика контрбатарейної боротьби потребує максимального скорочення часу вогневої активності артилерійського підрозділу. Тільки така тактика дозволяє зберегти боєздатність і саме існування артилерійського підрозділу. Для такої тактики актуальні методи верифікації кожного артилерійського пострілу. Під верифікацією розуміється

підтвердження ефективності пострілу одразу після його здійснення. Верифікація як оцінка помилки координат розриву снаряда може здійснюватися із застосуванням засобів оптичного чи радіолокаційного спостереження або систем звукової розвідки. Однак застосування додаткових засобів не завжди можливе та ефективне. В такому сенсі є перспективними методи верифікації, засновані на аналізі акустичних полів, що виникають при пострілі.

Поточні бойові дії показали, що можливості контрбатарейної боротьби якісно покращилися. Автори [8] роблять обґрунтоване припущення, що атакуюча сторона буде виявлена після першого пострілу, і артилерійський підрозділ може наразитися на відповідь протиборчої сторони. Аналіз [8] зосереджений на тому, наскільки результативним повинен бути вогневий вплив протиборчої сторони на атакуючу і наскільки вартісна ціль для атакуючих, щоб атакуюча сторона почала зменшувати боєздатності свого артилерійського підрозділу, перш ніж рухатися далі. Модель [8] також враховує вирішальний фактор, відсутній в інших моделях, тобто, сторона, що атакує, виграє від ведення вогню з одного і того ж місця за рахунок підвищення швидкості і точності стрільби.

Метод і модель розв’язання задачі про найкращий або оптимальний стан виконання бойової задачі артилерійською установкою можна віднести до розв’язання Парето−орієнтованих задач, або задач динамічного програмування. Тому сучасна оборонна артилерійська тактика короткочасний митевий вогонь зі швидким ураженням ворога для наступу можна назвати сховався і вистрілив.

Тому дослідження які удосконалюють моделі керування ураження цілі артилерійським підрозділом при втраті боєготовності є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, які виконано в Національному університеті «Одеська політехніка» і є складовою частиною держбюджетної НДР за темою «Підвищення ефективності

АСК спеціального призначення за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів» НДР № 224-47 (№ ДР 0122U200907).

Мета дослідження.

Метою дисертаційного дослідження можна вважати визначення найкращого часу виконання бойової задачі артилерійською гарматою при тривалих динамічних збуреннях за рахунок удосконалення імітаційних моделей та методів керування станами для забезпечення мінімальної втрати її боєздатності.

Досягнення мети було розв’язано через наступні завдання наукового дослідження:

– здійснити аналіз взаємодії керуючих впливів на артилерійські гармати протидіючих сторін для пошуку показників, які характеризують втрату їх боєздатності для створення автоматизованої системи пошуку станів;

– удосконалити імітаційну модель розподіленого утворення порохових газів по довжині ствола гармати в процесі пострілу та методу визначення їх температури для виявлення станів як додаткової діагностичної ознаки ефективного пострілу;

– удосконалити метод і модель ефективного керуванням бойовою роботою артилерійським підрозділом при ураженні цілі за умовою зміни огневої позиції для забезпечення мінімальної втрати боєздатності та найкращого часу;

– розробити та дослідити метод відстеження артилерійського пострілу з випадковими збуреннями на основі реєстрації балістичної та дульної хвиль, утворених снарядом.

Об’єкт дослідження – процеси пошуку станів найкращого виконання бойової задачі артилерійською гарматою при забезпеченні мінімальної втрати її боєздатності.

Предмет дослідження – імітаційні моделі і методи керування для визначенні найкращого часу виконання бойової задачі артилерійською гарматою при невизначеності і тривалих динамічних збуреннях.

Методи дослідження. Для проведення дисертаційного дослідження були використані: співвідношення енергетичного балансу для побудови одновимірної моделі пострілу зі артилерійської гармати; методи теорії ймовірностей і математичної статистики під час комп'ютерного моделювання та оцінки характеристик системи, Марківське моделювання для розробки автоматизованого методу керування стрільбою; методи регресивного аналізу та кінцево-різнецевих елементів, обчислювальні методи лінійної алгебри для розробки методу діагностики параметрів стану артилерийської системи.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено імітаційну модель розподіленого утворення порохових газів, у тому числі сажі, при їх розширенні в стані пострілу артилерійської гармати, що дало можливість розробити метод визначення зміни їх температури по довжині стволу з встановленням граничної кількості сажі, як додаткової діагностичної ознаки, необхідної для визначення ефективного пострілу.

2. Знайшли подальшого розвитку імітаційна модель та метод керування станами артилерійської гармати при стрільбі за наявності у ефективних пострілах випадкових динамічних зовнішніх і внутрішніх збурень, що дало можливість визначити найкращий час виконання бойової задачі при мінімальній втраті боєздатності з врахуванням частоти зміни вогневої позиції для виконані бойової задачі.

3. Вперше запропоновано метод відслідковування артилерійського пострілу при дії на нього випадкових збурень на основі реєстрації балістичної та дульної хвиль, утворених пострілом і снарядом, що дозволило здійснити верифікацію стану пострілу артилерійської гармати і визначити точку зустрічі снаряда з поверхнею на основі параболічної апроксимації його характеристик.

Практичне значення одержаних результатів. Моделі, методи і способи дали можливість сформувати принципи виконання бойового застосування при одному максимум при двох пострілах з кожної вогневої позиції. Як що, задача витрати пострілів по знищенню цілі в кількості 10 орієнтована на оборонні дії, то тактика по знищенню цілі в кількості 4 пострілів відповідає бойовому застосуванню при наступі.

Основні положення дисертаційного дослідження впроваджено:

– на національному конкурсі МО ЗСУ «Кращий винахід 2023 року» у Сухопутних і Десантно-штурмових військах патент України на винахід № 127193. Спосіб визначення координати зустрічі артилерійського снаряда з поверхнею. Максимов М. В., Болтьонков В. О, Добринін Є. В., Максимов О. М., Петрушенко М. М., Демиденко В. Е., Плешко Е. А., Гульцов П. С.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, викладені в дисертації, одержані автором самостійно. Автору належать основні ідеї в удосконаленні імітаційних моделей та методів керування станами для забезпечення мінімальної втрати боєздатності артилерійської гармати для визначення найкращого часу виконання бойової задачі при тривалих динамічних збуреннях.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

в [9,10] – імітаційна модель розподіленого утворення порохових газів при їх адіабатному розширенні при виконанні роботи в стані пострілу артилерійської установки, для визначення зміни їх температури по довжині стволу, встановлено граничну кількість сажі, як діагностичної ознаки, необхідної для визначення ефективного пострілу;

в [11, 12, 13, 14, 15] – імітаційна модель та метод керування станами артилерійської гармати при стрільбі за наявності випадкових динамічних зовнішніх і внутрішніх збурень для визначення найкращого часу виконання бойової задачі при мінімальній втраті боєздатності;

в [16, 17, 18, 19] – метод відслідковування артилерійського пострілу на основі реєстрації балістичної та дульної хвиль, утворених пострілом і снарядом для верифікації стану пострілу артилерійської гармати і визначити точку зустрічі снаряда з поверхнею.

Апробація результатів роботи.

Результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися і отримали схвалення на: 5th International scientific and practical conference "Topical aspects of modern scientific research" (January 25-27, 2024) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2024. 1st International scientific and practical conference "European congress of scientific achievements" (January 29-31, 2024) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2024, 2nd International scientific and practical conference "Science and society: modern trends in a changing world" (January 22-24, 2024) MDPC Publishing, Vienna, Austria. 2024, 12th International scientific and practical conference "Modern problems of science, education and society" (February 5-7, 2024) SPC, Kyiv, Ukraine. 2024

Публікації. Результати наукових досягнень викладені в 11 друкованих працях, з них з 5 – у спеціалізованих наукових виданнях (2 публікації – індексуються у міжнародній науково-метричній базі SCOPUS, 2 патенти України на винахід), 4 – доповіді і тези доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел з 139 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 183 сторінки (з них 139 – основного тексту), 18 рисунків, 21 таблиця та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНІВ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ ГАРМАТИ ПІД ЧАС ДИНАМІЧНИХ ЗБУРЕНЬ

1.1 Способи збереження боєздатності артилерійської гармати.

Тактичні інструкції з організації та керування бойовою роботою артилерійських підрозділів збройних сил будь-яких армій світу виділяють важливість переміщення артилерійських установок у процесі бою, і цьому приділяється значна увага в таких установочних рекомендаціях. Основний акцент у посібниках зроблено на описові вибору вогневих позицій і маршрутів переміщення (Армія США, 1996). Слід зазначити, що в посібниках дається дуже мало інформації про те, коли і внаслідок чого командиру артилерійського підрозділу слід першочергово змінити вогневу позицію.

Польові статути артилерійських підрозділів ЗСУ визначають, що командир підрозділу приймає рішення про зміну вогневої позиції, посилаючись на фактор часу. Рішення про переїзд враховує часовий інтервал перебування на поточній вогневій позиції, кількість пострілів і ступінь загрози з боку ворога (Армія США, 2001; USMC, 2002). Слід зазначити, що командиру артилерійського підрозділу варто зважати на додаткові фактори, що враховують метеодані, стан навколишнього ландшафту, логістичні канали постачання, змога проводити розвідувальні дії ворогом, і лише тоді ухвалити рішення про шлях переміщення на нову вогневу позицію. У нові моделі необхідно включати якомога більше факторів, що впливають на ефективність і боєздатність і, відповідно, забезпечення тактики «вистрілив і втік».

Далі при викладі матеріалу розумітимемо, що артилерійський підрозділ складається з артилерійських установок. Сторона, яка здійснює перший постріл, є атакуючою, а сторона, на яку спрямований вогневий вплив атакуючої сторони, – протиборча. Атакуюча сторона своїми артилерійськими установками веде вогневу дію по цілях протиборчої сторони. Протиборча сторона своїми

артилерійськими установками веде вогневу дію по артилерійських підрозділах атакуючої сторони.

Цілями для ураження протиборчої сторони є мости, логістичні центри постачання військ, радіолокаційні системи, зенітні засоби, обладнані інженерні елементи оборонної системи. У протиборчої сторони є свої артилерійські підрозділи, завдання яких – виявлення артилерійських установок атакуючої сторони та їх знищення вогнем у відповідь. Артилерійські підрозділи протиборчої сторони розташовані окремо від цілей. Артилерійські підрозділи протиборчої сторони ведуть вогонь по артилерійських установках атакуючої сторони, але артилерійські установки атакуючої сторони ведуть вогонь тільки по цілях для ураження протиборчої сторони, по артилерії протиборчої сторони вогонь не ведеться. Моделювання тактики «вистрілив і втік» для аналізу приймає як обмежувальні певні причини, за яких артилерійські підрозділи атакуючої сторони не ведуть вогонь по артилерійських установках протиборчої. Це такі: артилерійські установки протиборчої сторони знаходиться за межами досяжності артилерійських установок сторони атаки, атакуюча сторона не може виявити місце розташування артилерійських установок протиборчої, тому що, наприклад, контрбатарейні системи були знищені. Більше того, можливе організаційне керування артилерійськими установками, коли командир атакуючого підрозділу наказує зосередити весь вогонь по цілях протиборчої сторони, але для забезпечення раціональної ефективності командир атакуючої сторони може часто змінювати одну вогневу позицію на іншу, щоб уникнути зустрічного вогню протиборчої сторони.

Атакуюча сторона має початкову інформацію про координати цілей протиборчої сторони, проводить повну підготовку для цього і першої відкриває вогонь. Протиборча сторона вже після першого атакуючого пострілу визначить приблизне місце розташування артилерійських установок, що ведуть вогонь, в міру збільшення кількості пострілів визначить координати установок останніх

і зрештою з достатньою точністю відкриє вогонь у відповідь. У якийсь момент часу, після низки пострілів атакуюча сторона може перемістити артилерійські установки на нову вогневу позицію, щоб уникнути вогню у відповідь. Перемістившись на нову вогневу позицію, артилерійський підрозділ, що атакує, здійснює один залп по цілях протиборчої сторони без втрати ефективності, тому що нова вогнева позиція протиборчій стороні не відома, такий стан невиявленості закінчується після першого залпу з нової вогневої позиції.

Із зазначеного матеріалу виходить, що атакуючий артилерійський підрозділ має перевагу при першому залпі з нової вогневої позиції, тому що протиборча сторона не може почати вогонь у відповідь до тих пір, поки атакуюча сторона не виявить свою позицію першим залпом. Після першого залпу атакуючий артилерійський підрозділ і протиборча сторона мають уявлення про їхнє місце розташування і продовжують вести вогонь одне в одного залежно від своїх коригуючих можливостей і характеристик установок. Імовірність влучання одне в одного і в ціль може бути низькою для двох сторін після чергової зміни місця вогневої позиції. Поки артилерійські установки атакуючої сторони залишаються на поточній вогневій позиції, точність стрільби двох сторін від пострілу до пострілу покращується, оскільки обидві сторони можуть коригувати вогонь по обраних цілях. Командир атакуючого артилерійського підрозділу вносить корективи на основі інформації, отриманої від засобів спостереження про результати ведення вогню з попередньої вогневої позиції по цілях, а якщо час дозволяє, то й за інформацією від засобів спостереження з поточної вогневої позиції. Протиборча сторона також може отримувати інформацію про координати атакуючих артилерійських установок з коригування власного вогню, але також на основі звітів свого контрбатарейного радара про вогонь атакуючої сторони по цілях. Слід зазначити, що атакуюча сторона не отримує жодної додаткової інформації про цілі, спостерігаючи за вогнем артилерійських установок протиборчої сторони,

оскільки їх артилерійські підрозділи та цілі не розташовані поруч. Зрештою при тривалому боєзіткненні атакуючі артилерійські підрозділи переміщаються на нове місце, і процес повторюється. Сильною стороною атакуючих є постійна обізнаність в розташуванні цілей протиборчої сторони від однієї вогневої позиції до іншої. Однак після кожної зміни позиції ефективність зменшується через можливі помилки визначення координат поточної вогневої позиції, умов навколишнього середовища та зменшення надійних характеристик артилерійської установки під час руху.

1.2 Аналіз моделей та методів визначення станів артилерійської гармати

Властивість мобільності артилерії є визначальною для забезпечення заданого рівня боєздатності підрозділу, оскільки протиборча сторона визначає місце розташування артилерійських установок, засобами контрбатарейної боротьби і завдають удару у відповідь [20].

У літературі відомі моделі, що визначають умови для зміни позиції ведення вогню артилерійськими підрозділами. Переваги однієї зі сторін ведення артилерійського вогню з постійного місця полягають у підвищенні точності, оскільки відбувається коригування вогню під час ураження цілі на підставі результатів попередніх пострілів.

Але чим довше артилерійський підрозділ залишається на позиції, тим імовірніше, що інша сторона відкриє зустрічний вогонь на ураження. Такий випадок зумовлює підвищення маневреності артилерійських установок, щоб уникнути зустрічного вогню, оскільки випереджаючими темпами зростає можливість протиборчої сторони.

Такі дії створили умови появи тактики «вистрілив і втік», коли артилерійські установки змінюють вогневу позицію зразу після пострілу по цілі [21]. Аналіз літературних джерел показав, що тактика «вистрілив і втік»

використовувалася силами підтримки операцій як засобу стривоженості [22] і основними силами в оборонних заходах для мінімізації втрат особового складу та артилерійських установок.

Артилерійські установки останнього покоління мають підвищену швидкострільність і мобільність та можуть вести вогонь з однієї позиції, а потім переміщатися в нову позицію і стріляти знову протягом декількох хвилин [23]. Такі можливості призвели до появи нової тактики, орієнтованої на наступальні дії під час використання оборонного типу тактики «вистрілив і втік». У такому випадку артилерійські установки сторони, що атакують, можуть виконувати безліч циклів стрільби і зміни вогневої позиції. Нова відпрацьована тактика наступу, заснована на принципі «вистрілив і втік», отримала назву тактики «хованок» [24].

У низці літературних джерел моделі враховують швидкострільність артилерійських установок і те, як із часом покращується їхня вражаюча здатність у бою. В [25] пропонуються моделі схем залпу, процедур прицілювання, помилок, що виникають при бойовій роботі і ймовірність того, що снаряд влучить в задану ціль. Пропонуються моделі, що визначають методи переміщення з однієї вогневої позиції на іншу, при цьому підрозділ, що стріляє, враховує зворотний зв'язок від попередніх пострілів для підвищення точності стрільби [26,27]. Розроблено методи та моделі, що дозволяють визначати, коли кожна артилерійська установка має вести вогонь на ураження конкретних цілей [28, 29].

Слід виділити роботи, які враховують рух артилерійських установок [30,31]. Ці роботи пропонують методи вибору вогневих позицій та маршрутів руху між ними з урахуванням топології місцевості. Запропоновано Марківську модель артилерійського бою з метою оцінки організації бойової роботи [32]. Модель виключає зниження ефективності, форсоване зношення матеріальної частини та втрату часу на виконання бойового завдання через переміщення, але

зношеність не враховує зниження боєздатності через влучання протиборчою стороною, коли артилерійський підрозділ знаходиться на марші. Запропоновано Марківську модель для аналізу, коли артилерійському підрозділу слід змінити вогневу позицію для зменшення боєздатності внаслідок зустрічного вогню [33]. В модель закладено алгоритм, що атакуюча сторона починає ураження цілі з невідомої вогневої позиції протиборчої сторони. Та, у свою чергу, виявляє вогневу позицію через кілька пострілів атакуючої. Слід зазначити, що модель [33] заснована на тому, що атакуюча сторона для збереження боєздатності артилерійських установок підрозділу намагається уникнути зустрічного вогню протиборчої сторони, здійснюючи зміну позиції за тактикою «вистрілив і втік». Автори [8] доходять висновку, що така тактика на збереження боєздатності відповідає другорядним вогневим завданням, і резюмують, що основні вогневі завдання можуть вимагати від артилерійського підрозділу атакуючої сторони піддатися впливу вогню для продовження бою.

Моделювання тактики [33] досліджує стаціонарні властивості системи, а в [8] складено модель для аналізу за умови мінімізації часу для знищення цілі в протиборчої сторони, по якій сторона атаки веде вогонь. Крім того, в [8] проведено моделювання часового вікна, відстежується поточний час і втрата боєздатності артилерійського підрозділу атакуючої сторони.

Поточні бойові дії показали, що можливості контрбатарейної боротьби якісно покращилися. Автори [8] роблять обґрунтоване припущення, що атакуюча сторона буде виявлена після першого пострілу, і артилерійський підрозділ може наразитися на відповідь протиборчої сторони. Аналіз [8] зосереджений на тому, наскільки результативним повинен бути вогневий вплив протиборчої сторони на атакуючу і наскільки вартісна ціль для атакуючих, щоб атакуюча сторона почала зменшувати боєздатності свого артилерійського підрозділу, перш ніж рухатися далі. Модель [8] також враховує вирішальний фактор, відсутній в інших моделях, тобто, сторона, що атакує, виграє від

ведення вогню з одного і того ж місця за рахунок підвищення швидкості і точності стрільби.

Для подальшого викладення матеріалу додаткова потрібно зробити наступні пояснення рис. 1.1. Як відомо, носієм інформаційних ознак про постріл з артилерійської установки є балістична і дульна хвилі які утворюють акустичне поле яке можливо реєструвати для будь яких технічних або технологічних потреб і визначати її стан. Крім того додатковим носієм інформації є візуальний прояв пострілу який можна фіксувати у інфрачервоному та видимому світловому спектрі.

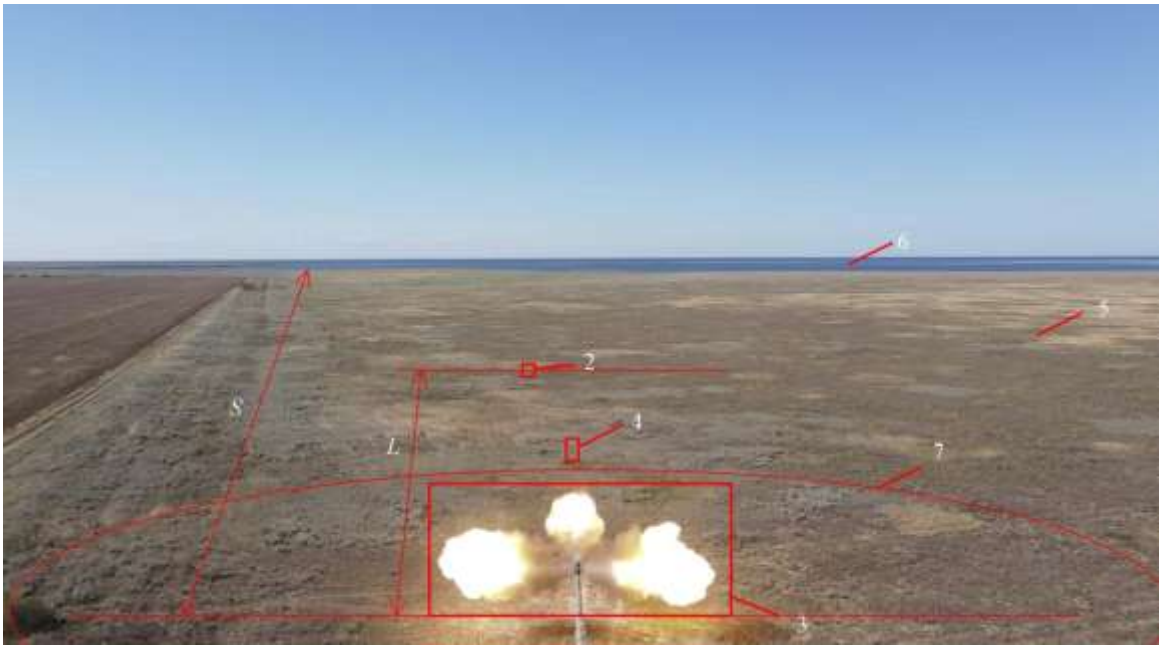


Рис. 1.1 Ситуаційне розміщення артилерійської установки: 1 – гармата, 2 – вимірювальна система, 3 – порохові гази які утворюють ударно-акустичну хвилю, 4 – снаряд на балістичній траєкторії руху, 5 – материкова поверхня полігону, 6 – морська поверхня полігону, 7– границя переходу ударної дульної хвилі в акустичну дульну; S – відстань від вогневої позиції до цілі, L – відстань від вогневої позиції до місця розміщення вимірювальної системи [17]

Виходячи з представленого матеріалу для моделювання тактики «вистрілив і втік» необхідно провести аналіз інформаційного поля, яке дозволяє визначити стан ефективності та працездатності артилерійської установки та її місцезнаходження. У першу чергу до полів, що дозволяють визначати координати установки, відносяться акустичні поля при пострілі артилерійської установки і при розриві снаряда зробленого пострілу. По-друге, візуальні поля, що супроводжують постріл артилерійської установки. Не менш важливим для визначення працездатності є зношування гарматних стволів у процесі стрільби, ходової частини при зміні вогневої позиції та втрата працездатності артилерійської системи при вогневому впливі на неї вогневими засобами супротивника. Тому далі доцільно розглянути ці аспекти.

В подальшому потрібно розглянути фізичні особливості виникнення і існування акустичного і візуального полів.

1.3 Акустичні хвилі для ідентифікації артилерійських гармат.

Проаналізовані фізичні моделі і наявні експериментальні дані, що дозволяють встановити властивості акустичного поля, що утворено дульною і балістичною хвилями, як результат бойового застосування артилерії для виявлення місця розташування артилерійської гармати.

Постріл із артилерійської установки супроводжується утворенням балістичної і дульної хвилі [34]. У разі польоту снаряда заданою траєкторією генерується балістична хвиля з фронтом у вигляді конуса Маха, центр якої переміщується разом із рухомим снарядом. Кут розчину конуса розраховується за виразом

$$Q_M = arcsin\,1\,/M, M > 1{,}0 < Q_M < \pi/2, \qquad (1.1)$$

де M – число Маха, рівне $M = V/c$; V – початкова швидкість снаряда; с – швидкість звуку в повітрі.

Акустичний сигнал балістичної хвилі має фронти наростання і спаду тривалістю близько 1мкс на початку і в кінці. Оцифрований сигнал балістичної хвилі широкосмуговий, загальна тривалість його для артилерійських пострілів становить 3–8 мс. Ширина смуги частот сигналу балістичної хвилі від 1 кГц до 10 кГц. Сигнал балістичної хвилі визначається моделлю Вайтмана [35]:

$$A = \frac{0{,}53P_0(M^2-1)^{\frac{1}{8}}\varphi}{d_{sM}^{3/4}l^{3/4}}, \tag{1.2}$$

$$T_N = \frac{1{,}82Mld^{1/4}\varphi}{c(M^2-1)^{3/8}l^{1/4}} \approx \frac{1{,}82\varphi}{c}\left(\frac{Md}{l}\right)^{1/4}, \tag{1.3}$$

а тривалість фронту наростання (спаду) $t_r = \frac{\lambda}{c}\frac{P_0}{A}$.

Де А – амплітуда балістичної хвилі, Па; T_N – тривалість основної частини імпульсу; P_0– атмосферний тиск; φ– калібр; l – довжина снаряда, d_{sM}– найкоротша відстань від точки реєстрації до конуса Маха; $t_r \approx t_d$ – тривалість фронтів наростання та спадання імпульсу балістичної хвилі відповідно; λ ≈ 6,8·10–8 – середня довжина вільного пробігу молекули в повітрі.

Балістична хвиля реєструється мікрофоном тільки якщо точка спостереження лежить всередині конуса Маха. В деякій точці траєкторії швидкість снаряда стає меншою за швидкість звуку, і хвиля зникне, тому її необхідно реєструвати на невеликих відстанях від точки пострілу. У зв'язку з коротким фронтом наростання БХ її необхідно реєструвати з високою частотою дискретизації.

Дульна хвиля створюється розширенням газів високого тиску після вильоту снаряда зі стволу. Акустичний сигнал дульної хвилі поширюється зі швидкістю звуку в навколишнє середовище. Рівень звукового тиску дульної

хвилі становить близько 150 дБ і є імпульсним сигналом з тривалістю 30–50 мс, який має частотний спектр у діапазоні від 8–10 Гц до 100 Гц [36]. Сигнал дульної хвилі широкосмуговий, однак ширина смуги частот його спектральної області на порядок менша, ніж у балістичної хвилі. Форма дульної хвилі описується моделлю Фрідлендера-Ріда [37]:

$$P_{mw} = A_{mw}\left(1 - \frac{t}{T_0}\right)e^{-\beta t/T_0} \tag{1.4}$$

де A_{mw}– амплітуда імпульсу, T_0, β – параметри форми імпульсу.

Експерименти з записами дульних хвиль від реальних артилерійських пострілів показали, що така хвиля добре апроксимується моделлю Берлаге [38]:

$$P_{mw}^{B} = A_{mw}t^{nr}e^{-\alpha t}\,sin(f_0 t), \tag{1.5}$$

де nr – показник швидкості зростання переднього фронту ДХ, α – показник швидкості згасання коливального процесу ДХ, f_0 – домінуюча частота.

Дульна хвиля поширюється від точки її утворення зі швидкістю звуку с. Фронт дульної хвилі сферичний, але за 50 м від дульного зрізу, його можна вважати плоским. Практично встановлено, що для відстаней, менших за 2–3 км амплітуда дульної хвилі у 2–3 рази вища від амплітуди балістичної хвилі [34].

Акустичне поле, яке виникає при пострілі зі стволу наступне. Балістична хвиля, на відстані більше ніж 10 м від зрізу каналу стволу, завжди приходить на фіксуючий мікрофон раніше за дульну хвилю, оскільки $V > c$, тому на початку реєстрації завжди буде сигнал балістичної хвилі тривалістю 5 мс. Далі тривалістю 200 мс буде фіксуватися шум, потім відповідно до часової затримки приход на мікрофон дульної хвилі. Тривалість дульної хвилі складає 395 мс.

Загальна тривалість фіксації виникаючого акустичного поля під час одного пострілу складає 600 мс.

Зупинимося окремо на перешкодах при реєстрації, сигналів балістичної і дульної хвиль за поширення їх в приземному шарі атмосфери. Сигнали акустичних хвиль під час пострілу є низькочастотними. Аналіз реальних записів сигналів з [39] показав, в області низьких частот (нижче 500 Гц) основною реальною акустичною перешкодою в польових умовах є шум вітру, що оточує мікрофони [40]. Як показано в [41], вітровий шум є на інтервалі стаціонарності особливим випадковим процесом зі спектральною щільністю, спадною з частотою f як $1/f$. Це так званий «рожевий шум».

На рис. 1.2 наведений вид типового запису для SNR = 10 дБ (ствол бездефектний, η=0,98). Стрілками на рис. 1.2 вказані ділянки БХ і відображення ДХ, червоними мітками вказані моменти вступу БХ і ДХ.

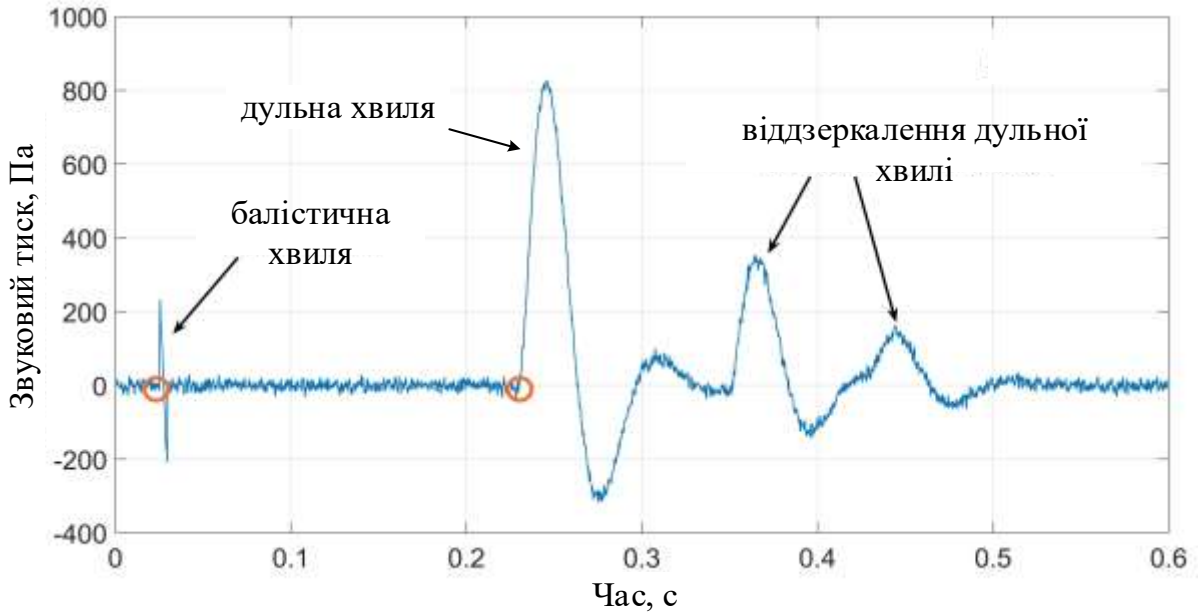


Рис. 1.2 Типовий вид зафіксованого акустичного поля [43]

Аналіз реальних записів пострілів показав, що модель такої вітрової перешкоди, як рожевий шум, добре відповідає реалізації шумів, які спостерігаються на експериментальних записах [42, 43].

Формування записів, що моделюють постріл зі стволу зі зносом, більш складне. Для експерименту відповідно до [4] вибрано гранично допустиме значення коефіцієнта зносу η=0,9.

1.4 Візуальне поле порохових газів дульного викиду.

Гази дульного викиду при виході снаряду з каналу стволу із артилерійської установки представляють складну геометричну фігуру. Викид відпрацьованих порохових газів за снарядом зі ствола, лівий і правий бокові викиди через отвори компенсаторів гармати (дульного гальма) утворюються при виході продуктів згоряння. З точки зору інформаційних ознак виявлення джерела викиду важливо максимальне вилучення інформації із спостережуваної динаміки розвитку дульного викиду. Це можна досягти шляхом високошвидкісної відеореєстрації дульного викиду. Для аналізу було залучено дані отримані при проведені польового експерименту при стрільбах [42].

В дослідженні [43,44] було доведена необхідність використовувати відеоінформацію дульного викиду для підвищення ефективності діагностики стану артилерійської установки. Одним з результатів дослідження е геометричні характеристики дульного викиду зміну яких зафіксовано в часі. Крім того проведено вимірювання температури порохових газів які перетворюються з ударної хвилі в акустичну. На рис. 1.3, рис. 1.4, рис.1.5 представлено розкадровку динаміки утворення фігури викиду порохових газів у верхньому вертикальному ракурсі для трьох різних зарядів. Проведено дослідження послідовних кадрів різних дульних викидів яке показало залежність та відмінність від поточних пострілів. Це дає підстави розглядати

можливість ідентифікації артилерійської установки засобами оптичної розвідки під час пострілу в будь який час доби.

а

t=0,04 с

t=0,04

t=0,04

б

t=0,08 с

t=0,08 с

t=0,08 с

в

t=0,12 с

t=0,12 с

t=0,12 с

г

t=0,16 с

Рис.1.3 Постріл мінімального порохового заряду

t=0,16 с

Рис.1.4 Постріл повного порохового заряду

t=0,16 с

Рис.1.5 Постріл первшого порохового заряду

Результати спільної обробки кадрів, демонструють відмінність проекції фігур тиску та температури порохових газів у дульному викиді (рядки a, b, c, d) для різних зарядів. Слід зауважити, що для випадку рис. 1.3 ударна хвиля перейшла

в звукову на інтервалі часу від 0,08 с до 0,12 с після виходу снаряда, а в другому рис. 1.4 і третьому рис. 1.5 випадках від початку виходу до 0,04 с.

В таблиці 1.1 наведено характеристики які було отримано при проведені ідентифікації артилерійської установки засобами оптичного вимірювання характеристик газу дульного викиду під час пострілу. Ці ж характеристики можуть бути взяти за основу для ідентифікації пострілу артилерійської установки засобами оптичної розвідки під час пострілу.

Таблиця 1.1 − Периметр твірної, площа проекції та температура газів в дульному викиді на інтервалі часу 0,16 с після виходу снаряду

	Рис.1.3			Рис.1.4			Рис.1.5		
	Периметр, м	Площа, $м^2$	Температура, К	Периметр м	Площа $м^2$	Температура, К	Периметр м	Площа $м^2$	Температура, К
а	10,17	3,76	1020	16,14	9,21	1420	19,12	11,45	1390
б	17,77	10,52	910	25,97	16,97	1330	25,88	21,6	1290
в	22,72	16,46	950	33,64	26,85	1250	34,77	33,94	1200
г	64,72	23,99	1180	39,35	25,4	1100	40,84	41,74	1050

Аналіз одержаних результатів дає можливість проводити ідентифікацію пострілу засобами оптичної розвідки за двома незалежними каналами. Перший канал – значення площини проекції поточного об'єму газів дульного викиду. Загальною властивістю такого каналу є монотонне збільшення проекції об’єму дульного викиду поки його тиск не зрівняється з атмосферним. Подальше збільшення площини проекції буде не значне і залежить тільки від властивостей атмосфери дифузійної і вітрової складових [44, 45, 46]. На рис. 1.6 наведено послідовні кадри динаміки розвитку дульного викиду яке ілюструє зроблений висновок. Другий канал – вимірювання температури об'єму газів

дульного викиду при розширинні до атмосферного тиску. Загальною властивістю такого каналу є монотонне зменшення температури газів дульного викиду до температури навколишньої атмосфери, але можливий стрибок температури в момент часу коли дульний газ почне окислення в атмосфері повітря і додатково утворюється візуальний прояв полум’я.

Крім того, об'єм сажі, що утворився в порохових газах дульного викиду, характеризується градієнтом температури. Така інтегральна властивість середньої температури об’єму дульних порохових газів підтверджує, що при їх розширенні та змішуванні з киснем атмосфери утворюється повне окислення сажі з вивільненням енергії. Саме такий процес призводить до такого стрибка температури, а візуальний ефект такого фізичного явища показано на рис. 1.6, рис. 1.7.

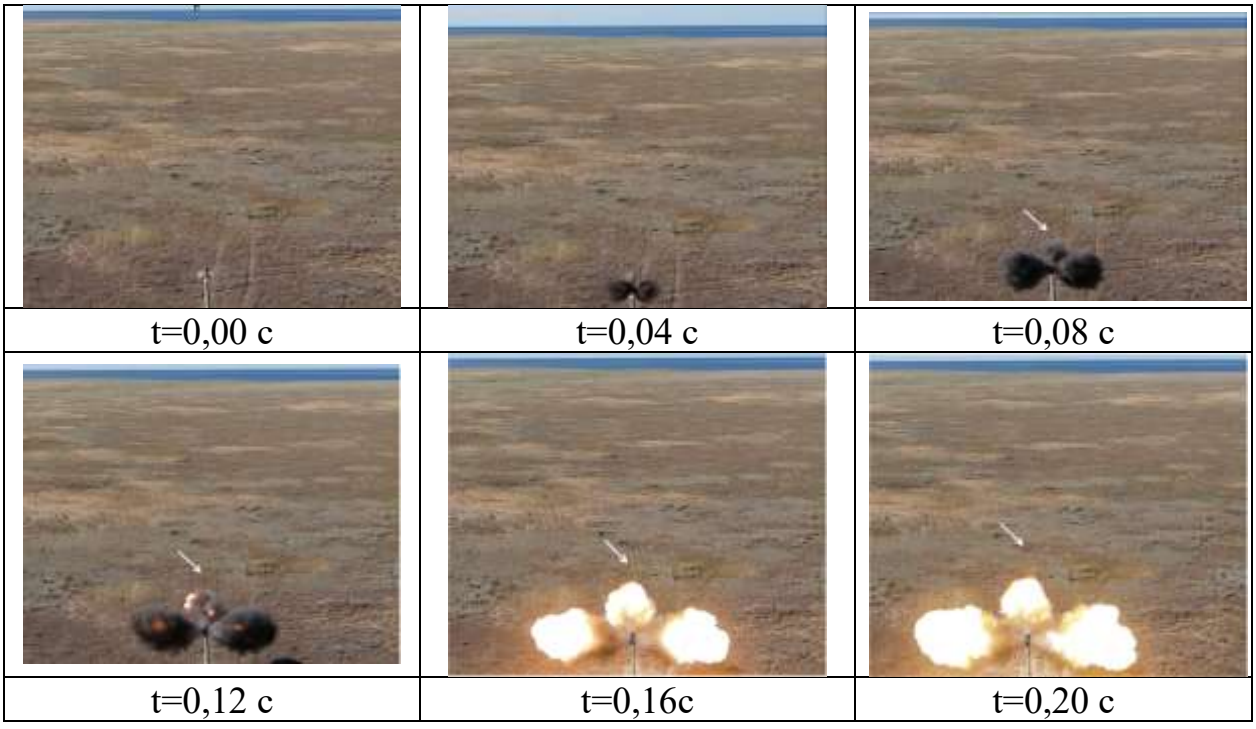


Рис. 1.6 Демонстративна залежність дульного викиду трипелюсткової форми артилерійської установки в залежності від часу пострілу (0; 0,2) с. (На рисунку білою стрілкою показано місце знаходження снаряду.)

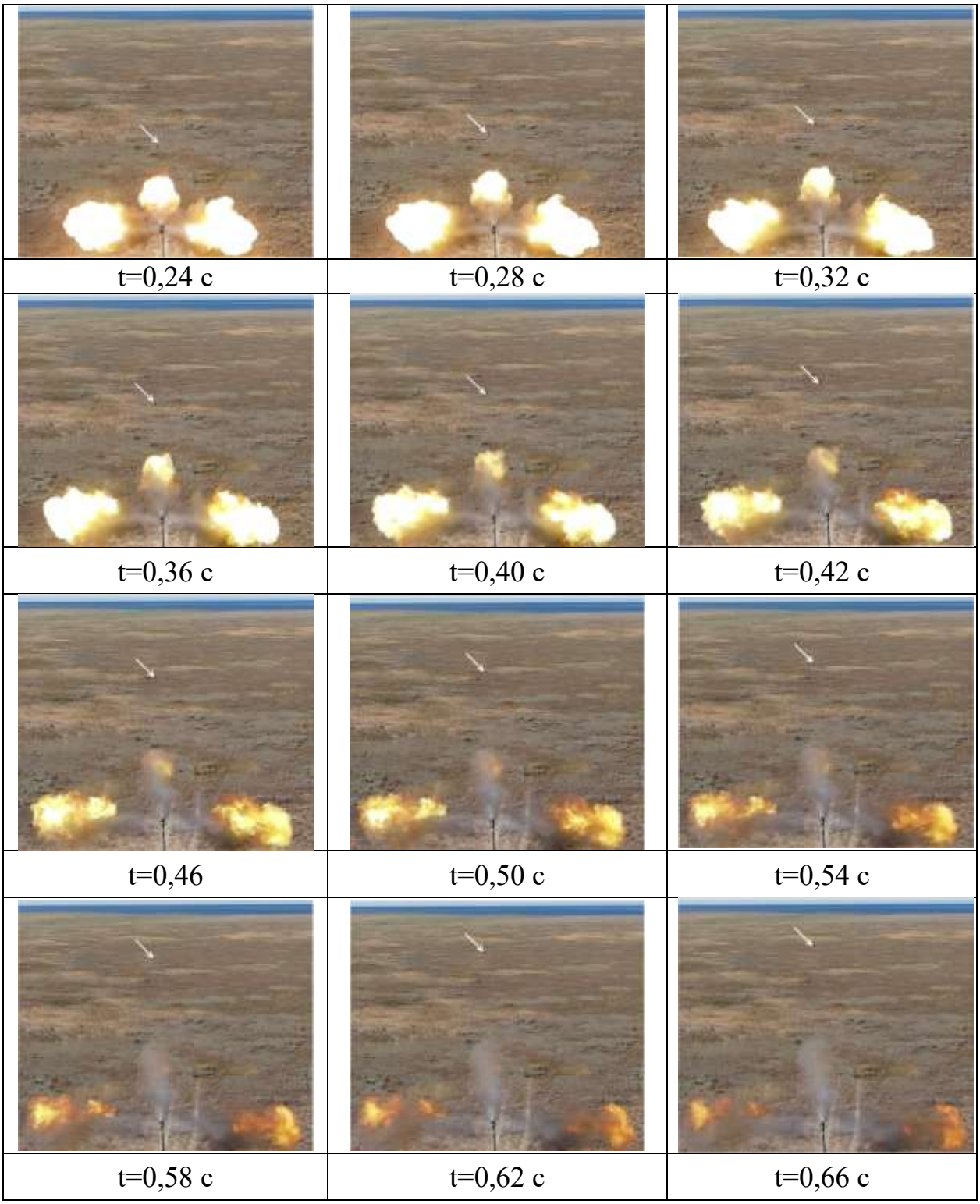


Рис. 1.7 Демонстративна залежність дульного викиду трипелюсткової форми артилерійської установки в залежності від часу пострілу (0,24; 0,66) с. (На рисунку білою стрілкою показано місце знаходження снаряду.)

Слід зауважити, що в усіх наведених рисунках час змінювався з дискретною величиною Δt=0,04 с. З представленого матеріалу можна зробити висновок що візуалізація пострілу можлива в короткий час , максимально не більше одної секунди після моменту часу коли снаряд виходить з каналу стволу і починають в атмосфері біля артилерійської установки з’являться перші ознаки газів дульного викиду.

1.5 Методи випробувань артилерійських стволів

1.5.1 Загальні відомості про систему полігонних випробувань

Натурні дослідження стійкості стволів проводяться при полігонних випробуваннях з метою отримання необхідних вихідних даних для визначення їх споживчих експлуатаційних властивостей. Такі випробування включають дослідження на відповідність стволів тактико-технічним вимогам, оцінці конструктивних, міцнісних та експлуатаційних показників [47].

Зразки артилерійських систем проходять контрольні випробування на полігонах з метою оцінки характеристик виготовлених гармат артилерійських серійного виробництва. Контрольні випробування двох типів проводяться відповідно до технічних умов на виготовлення та приймання. [48].

Експериментальні випробування стволів на стійкість проводяться з метою визначення змін балістики ствола та виявлення їх кількості, за якої ствол досягає межової стійкості. Випробування стволів на стійкість проводяться стрільбою основним для даної зброї снарядом на повному заряді. Ознакою досягнення стволом межі стійкості є систематичне зрізання провідних поясів снарядів та зумовлене цим різке збільшення еліпса розсіювання, а також неправильний політ снарядів, і, як наслідок, поява траєкторних розривів та відмов дії снарядів по цілі. При випробуваннях гарматних стволів на стійкість перевіряються: дальність та еліпс розсіювання на місцевості; функціональний

стан провідних пасків снарядів; правильність стабілізації снарядів; початкова швидкість снарядів [49, 50].

При експериментальних дослідженнях стійкості артилерійських стволів, крім вимірювання зношеності ствола, проводиться візуальний контроль стану його внутрішньої поверхні, в ході якого встановлюються характерні ушкодження. Ці пошкодження мають вигляд раковин на нарізах і на полях. На деякій відстані від дульного зрізу також можуть спостерігатися раковини зношуваності, які за розмірами і глибиною є істотно меншими від тих, які є в казенній частині ствола [51, 52, 53].

.

1.5.2 Технологічні аспекти підвищення стійкості артилерійських стволів

Через високі початкові швидкості й великі навантаження стійкість стволів порівняно невелика. Малий ресурс ствола стимулює пошуки конструктивних та технологічних рішень для його збільшення. До них відносяться: знімна труба; заміна мідних провідних пасків снаряда на паски з інших матеріалів; технологічна обробка внутрішньої поверхні каналу ствола; автоармування; хромування; лазерна термічна обробка (ЛТО); використання сплаву хастелою. [54, 55].

Знімна труба не збільшує ресурс ствола, але забезпечує однакові тимчасові та матеріальні витрати на виготовлення та заміну двох стволів зі стійкістю 210-230 пострілів на стволи зі стійкістю 450-500 пострілів.

Пошуки оптимального рішення в парі «провідний поясок – ствол» однаково відноситься до конструкції снаряда та ствола. Тому цікаво для аналізу порівняння та визначення дійсного ефекту протистояння зношування при стрільбі з артилерійських систем зі стволами, канали яких виготовлені за різними технологіями. Аналіз труб, виконаних за технологією ЛТО, показує хорошу стійкість від 1 до 130 пострілів. Далі у контрольній точці

спостерігається інтенсивне руйнування ствола. Ця тенденція зберігається на всьому залишковому діапазоні пострілів. Далі були розглянуті специфічні особливості технології виготовлення стволів [56, 57].

Хромування – спосіб збільшення терміну служби ствола шляхом нанесення гальванічної технології захисного покриття його внутрішньої поверхні. Це покриття створює термічний опір і знижує корозійну та ерозійну дію порохових газів. Хром має високу твердість, високу температуру плавлення, значний опір удару, хімічну інертність і низьку теплопровідність. Хромування ствола підвищує термін служби гарматних стволів вдвічі, що визначається шаром нанесеного хрому близько 0,1мм [56, 57].

Хастеллой – технологія створення жаростійкого сплаву, що володіє високим опором пластичної деформації та руйнування при дії високих температур та окисних середовищ. Жаростійкі сплави виготовляються на алюмінієвій, титановій, залізній, мідній, кобальтовій та нікелевій основі. Залежно від технології виготовлення жаростійкі нікелеві сплави можуть бути ливарними, деформованими і порошковими. Найбільша жаростійкість властива ливарним складнолегованим сплавам на основі нікелю. Ці матеріали здатні витримувати тисячі годин високі статичні та динамічні навантаження за температури 1050-1100^{0}С. Нікелеві жаростійкі сплави піддаються термічній обробці. Гомогенізаційний відпал дозволяє отримати матрицю з рівномірним розподілом частинок, що зміцнюють фази в процесі подальшого старіння [56, 57].

Враховуючи параметри внутрішньої балістики, найважливішою властивістю є жаростійкість, незважаючи на велику швидкість процесів енерговиділення та руху снаряда стволом.

Одним із факторів, що визначають жаростійкість, є високий опір повзучості. Жаростійкість пов'язана насамперед зі структурою матеріалу та його складом. За структурою жаротривкі сплави мають бути багатофазними з

міцними межами зерен та фаз. У складах типу хастеллой це забезпечується багатокомпонентним легуванням. Причому жаростійкість матеріалу тим вища, чим більша об'ємна частка зміцнювальних фаз і чим вища їхня термостійкість [58, 59].

Жаростійкі сплави на основі кобальту мають більш високу температуру плавлення, тому їхня тривала міцність вища. Високий вміст хрому у них підвищує опір високотемпературної корозії.

Лазерна термічна обробка (ЛТО). Поліпшення характеристик матеріалу досягається підвищенням пластичності та зниженням твердості. ЛТО застосовується для поліпшення поверхневого шару деталі, зміцнення її поверхні і, як наслідок, підвищення зносостійкості. Із застосуванням ЛТО виконується зміцнення поверхні порошками титану, хрому та вольфраму.

Найкращий результат, особливо за ознакою рівномірності зношеності по довжині ствола, дає технологія хастеллой. До найбільшого зношення схильний ствол, поверхня якого оброблена за технологією ЛТО. Аналіз результатів зношеності по довжині для двох стволів (поверхня каналу одного була хромована, а іншого пройшла ЛТО) показав, що відмінність досягає 1,35мм.

Було встановлено, що хромовані стволи, виконані за технологією хастеллой, на відміну від інших, мають характер зношеності, що показує їхню нечутливість до зміни параметрів внутрішньої балістики.

Важливим фактором є вартість ствола, виконаного за тією чи іншою технологією. Одним із критеріїв вибору технології виготовлення може бути збільшення кількості пострілів до межового зношення, віднесене до збільшення витрат на підвищення стійкості ствола.

Крім цього, ствол, виготовлений із застосуванням технології хастеллой, на 100 кг важчий за серійний через наявність вольфраму і молібдену, що входять до складу сталі [58, 59].

Взагалі підвищення стійкості ствола є комплексним завданням, яке поряд з вибором технології виготовлення артилерійського ствола та варіантів обробки його внутрішньої поверхні має відповідати рівню розробки артилерійської установки.

Отже, результати технологій у галузі жаростійких сплавів та антифрикційних покриттів, що запобігають зношенню, можуть бути покладені в основу першого напряму вирішення задачі підвищення стійкості артилерійських стволів [60, 61].

1.5.3 Експериментальні дослідження зношення стволів

Експериментальні дослідження можуть бути розглянуті на прикладі системного підходу, що базується на фізико-механічних моделях процесу зношення та методичній базі обробки експериментальних досліджень.

Отримання достовірної інформації виходить з інтерпретації експериментальних результатів математичними моделями зношення, що дозволяє застосування математичних моделей з візуалізації результатів комп'ютерних розрахунків змін поверхні каналу ствола зі збільшенням зношеності. Має оправлений сенс формулювання зворотного завдання: за результатами візуальних досліджень визначити постійні параметри математичної моделі, що відповідають стану поверхні каналу ствола. Отримані параметри моделі можуть бути використані для прогнозування, що дозволить замінити полігонний експеримент на обчислювальний [62, 63].

Стан стволів прийнято характеризувати ступенем подовження ЗКГ, що з'являється через зношення каналу ствола. Це відбувається внаслідок високих температур і великих тисків, що розвиваються при стрільбі, а також через прорив порохових газів між стінками каналу ствола та снарядом. Розпал утворюється спочатку в перехідному конусі, що з'єднує циліндричну частину ствола з конічною каморою. Першим проявом розпалу є утворення каверн та

розвиток тріщин. У міру його зростання метал з поверхні каналу ствола фарбується, через що довжина ЗКГ і діаметр ствола в циліндричній частині продовжують збільшуватися. Для контролю за цим процесом необхідний огляд поверхні каналу.

Використовувані прилади визначення геометричних характеристик поверхні каналу ствола є оптико-механічними. Контроль поверхні виконується суб'єктивно візуально експертним способом. Відео та фотозйомка не виконуються.

Максимальне зношення ствола спостерігається відразу після зарядної камори і далі у напрямку до дульного зрізу стирання поступово зменшується, і біля дульного зрізу поля нарізки навіть у вкрай зношених стволах істотно зберігаються. У разі інтенсивного зростання зношеності каналу на початку нарізної частини відбувається поверхнева ерозія металу на ділянках, поглиблених внаслідок попереднього процесу фарбування.

Конструкція гарматного ствола для його внутрішнього відображення на оптичні носії інформації характеризуються недостатньою контрастністю як наслідком використанням штучного освітлення та недостатнім простором, що впливає на розміщення відео чи фотообладнання відносно джерел підсвічування [62, 63].

Для стрибкоподібної якісної комп'ютерної обробки знімків застосовують контурне контрастування. Контурне контрастування зображення здійснюється за рахунок створення навколо його частин замкнутих або розімкнутих контурів. Якщо оброблюваний файл є градацією сірого кольору, дуже важливо, щоб відтінок, характерний контуру і частині зображення, що примикає до нього, мали різну градацію сірого, що підвищує загальний контраст малюнка і дозволяє експертам об'єктивно розпізнавати приватні деталі, їх розташування й орієнтацію.

При збільшенні кількості пострілів у гарматних стволах спостерігаються руйнування каналу у вигляді стирання, утворення тріщин та вимивання металу, внаслідок високотемпературної ерозії, що відбуваються одночасно, перекриваючи один одного. Причини руйнування каналу ствола мають різну природу, причому відмінності, що спостерігаються, особливо залежать від способу переміщення снаряда в каналі і від калібру установки.

У гарматних стволах малих та середніх калібрів, як правило, спостерігається сітка тріщин на полях та на нарізах. Вона проявляється у найбільш яскраво вираженій формі від початку нарізки до місця найбільшого тиску газів. У напрямку дульного зрізу розвиток тріщин зменшується. Сильним ступенем руйнування зазнає початок нарізної частини стовбура. У слабшій формі спостерігається сітка тріщин також і в каморі, але тільки в передній частині, яка не захищена гільзою [48, 64, 65].

Значне руйнування каналу ствола на початку нарізної частини призводить до збільшення довжини та діаметру зарядної камори. Таке подовження у стволах великого калібру може досягати розміру більше 0,5 м. При цьому снаряди при роздільному зарядженні просуваються вперед, що призводить до погіршення обтюрації. У зброї, спорядженої унітарним патроном, при пострілі спостерігається сильний удар снаряда на початок нарізної частини, внаслідок чого значно зростають зусилля, що діють на ствол і провідний поясок, що призводить до зменшення початкової швидкості і збільшення розсіювання.

Руйнування внутрішньої частини ствола на початку нарізної частини призводить до неможливості правильного руху снаряда по нарізах. Рухомий снаряд не повторює гвинтову лінію нарізки каналу ствола. У зв'язку з цим поверхня провідного паска в тій чи іншій мірі стирається і може бути повністю відсутня. В результаті тривання таких процесів збільшується розсіювання снарядів і зрештою стає неприпустимим.

Тріщини є результатом крихкого руйнування поверхні каналу ствола. Вони зазвичай нормальні до поверхні каналу і мають глибину від 0,01 мм до 1-2 мм. При значних глибинах тріщини розгалужуються і з'єднуються, утворюючи викришування металу. Утворюються дві множинності тріщин, що розвиваються в різних напрямках: перший, це такий , що паралельний нахилу нарізки, а другий поперечний до виробничої складової каналу ствола. Об'єднання цих множин дає сітку неправильної форми. Глибокі тріщини спостерігаються на основі внутрішньої поверхні каналу ствола. Вони починаються від обох граней, проходять углиб металу під деяким кутом і при відповідному збільшенні глибини призводять до вибраковування поверхні на більшій чи меншій відстані.

Дослідження шліфів, взятих із гарматних стволів, виготовлених з хромонікелевої сталі, показало два характерні стани внутрішньої поверхні каналу ствола. У низці випадків будь-якої зміни структури металу в місцях, що характеризуються наявністю тріщин, не виявлено. Не було виявлено ознак дифузії у поверхневому шарі каналу ствола азотистих утворень від порохів. В інших випадах були виявлені місця, що характеризувались наявністю азотистих утворень, але вони були рівномірно розподіленими по всій товщині зразка, їх виникнення характеризує металургійні процеси. Не було виявлено зневуглеводження поверхневого шару [65].

Ці дослідження дають можливість в завдання внутрішньої балістики включити хіміко-кінетичні процеси, що тривають в порохових газах в момент руху снаряда каналом ствола і, як результат, по енергетичному стану снаряда при виході його з каналу ствола, визначати рівень зношеності.

1.6 Методи розрахунку стійкості стволів артилерійських систем

1.6.1. Методи й моделі розрахунку стійкості за характеристиками ствола

Стійкість ствола, його ресурс визначається швидкістю зношення його каналу і від двох груп чинників. Виділяють теплову групу факторів, що визначається нагріванням ствола пороховими газами, температура яких досягає 2000…3500К. Нагріванням поверхні каналу ствола теплотою від роботи сили тертя у місці контакту провідних пристроїв снаряда з поверхнею каналу ствола. Нагріванням ствола теплотою, що виділяється в металі конструкції при деформації від тиску порохового газу й ударного впливу центруючого потовщення снаряда на поверхню нарізів.

Виділяють механічну групу факторів, що визначається зношенням нагрітого ствола внаслідок механічного зняття шару металу з поверхні потоком порохового газу. Зношенням у зазорах між провідним пояском снаряда і поверхнею каналу ствола та провідними пристроями снаряда [66].

Аналіз груп дозволяє зробити висновок, що інтенсивність процесу зношення залежить від температури порохових газів, маси та початкової швидкості снаряда і калібру ствола. Тоді загальна структура емпіричної формули для допустимої кількості пострілів N може бути подана у вигляді:

$$N = \frac{K_T}{C_q^3 v_0^{4,5} d^{2,5}},$$

де: K_T – температурний коефіцієнт; C_q – потужність зброї; v_0– початкова швидкість снаряда, d – діаметр каналу ствола.

Температурний коефіцієнт K_Tзалежить від енергоємності пороху та механічних характеристик сталі ствола, він визначається зміною механічних характеристик ствольних сталей у міру їх нагрівання в процесі стрільби. При заданих марках пороху та матеріалу ствола K_Tдля зброї з подібною баллістикою вважають постійним [67].

Емпіричний вираз відповідає початку розвитку ствольних систем, тому величини, що входять до нього, є розмірними і навіть зводяться до ступені, що є цілим числом, тобто поняття розмірності в такому випадку втрачає сенс. Такого типу формули узагальнюють кілька експериментальних даних. Перехід до порохів і конструкційних матеріалів з іншими характеристиками вимагатиме коригування значень параметрів цього виразу лише у разі великого обсягу експериментальних даних.

На стійкість ствола помітно впливає режим стрільби, оскільки його температура безперервно зростає від пострілу до пострілу. В автоматичних системах, навіть у разі примусового охолодження ствола, високий темп стрільби може досягти такої величини, коли межа плинності його металу зменшиться до критичної величини. Ствол у цьому випадку отримає великі залишкові деформації та вийде через неправильність польоту снаряда внаслідок оплавлення нарізів та його провідного пояска. При безперервній автоматичній стрільбі ствол настільки інтенсивно нагрівається, що навіть за наявності міжшарового охолодження швидко руйнується. Необхідну стійкість ствола можна забезпечити лише вибором суцільної довжини черги стрільби та перервою між ними. Примусове охолодження каналу ствола дозволяє лише збільшити довжину суцільної черги та скоротити час перерви стрілянини. Стійкість ствола різко падає зі зростанням початкової швидкості снаряда і за деякого її значення стає неприпустимо низькою. У цьому випадку підвищення стійкості ствола можливе за рахунок використання підкаліберних снарядів, що мають мале значення C_q.

При невідомому значення коефіцієнта K_T вираз зручно використовувати для порівняльної оцінки стійкості при зміні початкової швидкості, калібру й ваги снаряда. У першому наближенні величину K_T припустимо вибрати для гармат середнього калібру $K_T \sim 7 \cdot 10^{24}$. Важливо правильно визначати стійкість для систем великої потужності, що мають $C_q = \frac{mv_0^2}{2d^3} \sim$ 400 тсм/дм^3.

Для розрахунку стійкості таких систем можливе використання виразу Юстрова.

$$N = \frac{xy}{d^2}\frac{C_q v_0^2 \sigma \varepsilon}{\lambda \mu k_1},$$

де: $x = f_1(p_{max}, R, k, Q_ж)$; $y = f_2(d, n)$; n – темп стрільби; $\lambda = \frac{L_c}{d}$, L_c - довжина ствола, σ - тимчасовий опір матеріалу ствола; ε - відносна тангенційна деформація стінок ствола; μ - коефіцієнт тертя ведучого пояска об стінки ствола; k_1- тимчасовий опір стиснення матеріалу ведучого пояска; C_q має розмірність гс/см^3; d, см. Стійкість ствола *N* визначається падінням початкової швидкості v_0 на 10%.

Можливе використання виразу Лінте для розрахунку стійкості за властивістю падіння початкової швидкості v_0

$$N = 350\frac{n_0 d^2 \sigma_в}{n \sigma_e W},$$

де n_0, n - темп стрільби, регламентований та дійсний, відповідно; $\sigma_в$, σ_e - тимчасовий опір та категорія міцності матеріалу, відповідно, кгс/см2; d - калібр, см; $W = \frac{q v_0}{2g}$, кгс с.

Габо запропонував визначати матеріальне зношення зброї, аналогічно гіпотезі Шарбоньє за виразом

$$N = N_0 e^{-\frac{k(1-\lambda)T}{\theta}}$$

де N_0 и λ - коефіцієнти, що залежать від властивостей металу, сорту пороху та умови заряджання; k – постійний коефіцієнт; θ - температура переходу металу у в'язкий стан; T – температура поверхні каналу ствола [68].

Враховуючи зношування каналів стволів зброї великої потужності за рахунок вихроутворення та механічного впливу вихорів на поверхню конструкційного металу, Слухоцький перетворив формулу Габо аналогічно гіпотезі Шарбоньє, яка виглядає так

$$N = \frac{k_1 k_2 k_3 \rho (d_{вч}^2 - d^2)(\lambda_д + 1)}{\exp(2{,}2 \cdot 10^{-6} p_0 \frac{d}{\varepsilon} + 0{,}02 t_1) \omega v_д^2 \cdot \left[\lambda_д \left(\frac{v_1}{v_д}\right)^2 + \left(\frac{v_2}{v_д}\right)^2\right]},$$

де: $k_1 k_2 k_3$ - коефіцієнти, що залежать від калібру зброї, крутості та глибини нарізів; $\lambda_д = \frac{l_д}{l_0}$ - відносний шлях снаряда в каналі ствола; ρ - ударна в'язкість металу ствола, кгс/см^2; $d_{вч}$ - найбільший діаметр ведучого пояска снаряда, мм; ε - товщина поверхневого шару металу ствола, мм; t_1-температура горіння пороху, ^{o}C; v_1, v_2 - середні швидкості газів у горловині камори під час руху снаряда каналом ствола і період післядії відповідно, м/с; p_0 – тиск форсування, кг/см^2. У цій залежності рекомендується приймати k_2=k_3= 1, $\frac{d}{\varepsilon}$ =1280 для артилерійських знарядь. Значення k_1 і $\frac{v_1}{v_д}$ визначаються за таблицями в залежності від $\lambda_д$, $\chi_д = \frac{l_0}{l_н}$, де $\lambda_д = l_{км} + 0{,}75d$, $l_{км}$ і l_0 - довжина та наведена довжина камори. При розрахунках приймається $\left(\frac{v_1}{v_д}\right)^2 \ll \left(\frac{v_2}{v_д}\right)^2$ та $\left(\frac{v_2}{v_д}\right)^2 = 0$.

Аналіз емпіричних виразів показав, що вони суперечать фізичним основам процесів артилерійських установок, що відбуваються при експлуатації. З висловлювання Юстрова випливає, що стійкість збільшується зі зростанням C_q і v_0, а за висловом Лінте – зі зростанням калібру, але аналіз результатів експлуатації артилерійських систем різних калібрів виявив протилежне. З наведеного можна зробити висновок, що оскільки ці вирази є емпіричними, вони відповідають деяким наборам експериментальних даних і апроксимують їх. Похибка апроксимації таких виразів неприйнятна навіть для оцінювання обсягу зношування. Вигляд таких виразів властивий для періоду розвитку науки, коли була розроблена і стала широко використовуватися теорія подібності та розмірності, яка передбачає, що основні властивості мають бути

у безрозмірному вигляді і мають представлятися через геометричну подобу. У виразі Слухоцького використовується відносний шлях снаряда, але має ті самі недоліки: для різних величин лінійний розмір має різні одиниці виміру (для тиску - сантиметри, для швидкості - метри). Розглянуті висловлювання є інтересом лише як підсумкова демонстрація розвитку наукових знань з розрахунку зношеності й стійкості артилерійських стволів у другій половині XX століття, в основу якого було покладено концепт розрахунку стійкості через характеристику ствола [68, 69].

1.6.2 Методи й моделі розрахунку стійкості через характеристику системи «ствол - заряд - снаряд».

Методи та моделі зношення та стійкості розглядаються як результат можливого переходу від зосереджених властивостей систем до розподілених. З одного боку, це необхідність розрахункового прогнозування властивостей зношення та стійкості стволів, коли недоцільно проводити випробування на стійкість. З іншого, це вибір з низки відомих технологічних прийомів, що зменшують зношеність і підвищують стійкість, або пошук нових засобів і способів підвищення стійкості артилерійських стволів. Насправді, для отримання об'єктивних розрахункових даних щодо зношеності та стійкості математичні моделі повинні враховувати не лише характеристики станів системи «ствол – заряд – снаряд», а й визначати ефективність використаних технологічних прийомів для покращення показників зношення та стійкості [51, 70].

Складність завдання моделювання зношення і стійкості стволів зумовлена великою кількістю факторів, що впливають на ці процеси. Сформований рівень знань дозволяє отримати імітаційну модель розрахунку та аналізу зношення та стійкості, засновану на необхідних методах та експериментальних даних.

Модель живучості артилерійського ствола зброї містить: модель температурного поля ствола, моделі характеристик зношення каналу, визначення характеристик пострілу методами внутрішньої балістики, моделі характеристик розсіювання снарядів при обчисленому зношенні методами зовнішньої балістики, моделювання межі, за якої відбувається порушення функціонування ведучих елементів снаряда.

В існуючих методах та моделях, орієнтованих на розрахункове оцінювання стійкості ствола, використовуються дослідні дані щодо чинних артилерійських установок, аналогічних до аналізованої. Такий підхід під час моделювання породжує головну проблему можливого підходу, що визначається орієнтацією на «аналоги» під час використання методів «технологічного моделювання», заснованого на теорії подібності та розмірностей. При цьому виникає суперечність, яка виявляє, що робити розрахунок стійкості ствола без даних про «аналог» у просторі ознак неможливо, оскільки відсутні їх опорні значення. Щоб така можливість існувала, методи розрахунку стійкості ствола повинні бути засновані на більш загальних фундаментальних математичних моделях належного рівня узагальнення. Тому при використанні сучасних обчислювальних можливостей надвисокої продуктивності застосовувати вирази рівня емпіричних формул при зосереджених властивостях не є правильним науковим підходом [70, 71].

Моделювання теплового поля при стрільбі проводиться для режимів, властивих ствольному комплексу. За результатами теплового та конструктивно-балістичного розрахунків має бути підібраний «аналог», дослідні дані якого по зношенню та стійкості відомі. Такий підбір зазвичай ґрунтується на основних положеннях теорії подібності артилерійських систем та подібності процесів теплопередачі. Особливо важко підібрати аналог у тих випадках, коли зразок має будь-яку відмінність від існуючих систем, наприклад, новий вид снаряда, змінені склад і конструкція заряду.

Моделювання зношення на один постріл — питоме діаметральне зношення $\Delta d_{\text{уд}}$, заснований на використанні теплового розрахунку ствола з урахуванням геометрії каналу, режиму стрільби, миттєвих значень коефіцієнта тепловіддачі, наявності охолодження, зміни теплофізичних характеристик матеріалу. У результаті визначається максимальна температура T_l^m поверхні каналу в ряді перерізів [72, 73].

На підставі моделей визначають характеристики пошкодженості або зносостійкості поверхні каналу стволаδ_p, енергетичних витрат на пошкодження поверхні A_p.

Емпірична залежність для питомого зношення може мати вигляд ступеневої функції

$$\Delta d = A(T_l^m)^{\alpha}\ (\delta_p)^{\beta}\ (A_p)^{\gamma}$$

Кожен із аргументів T_l^m, δ_p, A_p і дослідний коефіцієнт A визначають з вихідних конструктивно-балістичних та експлуатаційних даних та прийнятого методу розрахунку. Поширення цієї залежності з тими значеннями аргументів, які обчислені для «аналогу», справедливо настільки, наскільки «аналог» відповідає «зразку».

Аргументом емпіричної залежності приймаються ті величини, які для процесів зношення наразі вважаються визначальними.

Після обчислення питомого діаметрального зношення «зразка» необхідно задати, використовуючи дослідні дані «аналогу», очікуваний діапазон значень стійкості N і, вважаючи, що $\Delta d = \Delta d_{\text{уд}} N$, перейти до трьох величин для ствола, що має зношення Δd: подовження зарядної камори $\Delta\lambda_1$, збільшення шляху снаряда до повного врізання провідного пояска в нарізи $\delta\lambda_2$, максимальної площі прориву порохових газів δS_m та функції $\delta S = \delta S(l_{\text{сн}})$.

Нехтуючи величиною δl і апроксимуючи криву зношення прямої, можна з певним ступенем похибки подати як: $\Delta\lambda_1 = 0{,}5\Delta d ctg\beta(1 - \frac{(D_0-d)}{\Delta d})$, $\Delta\lambda_2 = 0{,}5\Delta d ctg\beta$, $\delta S = 0{,}5\pi d\Delta d(1 - \frac{(D_0-d)}{\Delta d})$. Дані залежності справедливі при $\frac{(D_0-d)}{\Delta d}$<1, інакше $\Delta\lambda_1 = \delta S = 0$, і змінюється тільки конус врізання. Величина $ctg\beta$ має бути скоригована за дослідними даними. Значення $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$, і δS розраховують для крайніх значень настрілів очікуваного діапазону значень стійкості (N_1, N_2)або для деякого одного настрілу *N*. Відповідно до цих величин вибирають конструктивні параметри каналу [74, 75].

Для моделювання зміни внутрішньобалістичних характеристик пострілу та падіння початкової швидкості снаряда необхідно вирішити пряму задачу внутрішньої балістики зношеного ствола з урахуванням поступового врізання паска у нарізи та прориву порохових газів. Умови, за яких відбувається порушення функціонування провідних елементів снаряда в стволі, слід встановлювати одночасно з розв'язанням задачі внутрішньої балістики зношеного ствола.

Задача вирішується методами теорії пластичності з урахуванням динамічності деформування ведучого пояска (ВП), та її результат відповідає питанням, чи відбудеться зрізання виступів ВП, тобто, чи досягне ствол при заданій зношеності межі стійкості.

Оцінювання стійкості ствола полягає в порівняльному аналізі отриманих результатів падіння початкової швидкості снаряда і зрізу ведучого пояска. Тут або аналізується задана в ТЗ величина настрілу *N*, або проводиться порівняння настрілу при $\Delta v_0 = \Delta v_0^{\text{доп}}$, де $\Delta v_0^{\text{доп}}$ – допустиме падіння початкової швидкості і настріла при $l_{\text{ср}}$=$\Delta\lambda_1$ ($l_{\text{ср}}$=$\Delta\lambda_1 - \delta\lambda_2$). В останньому випадку доводиться встановлювати залежності $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$, δS і Δv_0від числа пострілів і фактичну стійкість приймати за найменшим настрілом.

Для оцінювання стійкості за критерієм розсіювання снарядів або овальності пробоїн вирішується завдання зовнішньої балістики для снаряда, що має початкові відхилення поступальної та обертальної швидкостей та швидкості нутації, зумовлені зношенням каналу ствола [76, 77].

1.7 Інформаційне моделювання експлуатації артилерійських стволів.

Завдання моделювання експлуатації артилерійського ствола полягає або в неповноті вхідної інформації, або в надмірності вхідної інформації, що є суперечливою. Така специфіка завдання моделювання експлуатації ствола підтверджує необхідність при інформаційному підході моделювання експлуатації ствола розглядати її поступово з урахуванням інтенсивності роботи бойових порядків [78].

1.7.1 Автоматизація моделювання експлуатації артилерійських стволів

Автоматизація моделювання експлуатації артилерійських стволів повинна забезпечити користувачеві можливість запровадження будь-якої вихідної інформації, отриманої як при експлуатації артилерійських стволів, так і значень дотримання межових властивостей стволів, необхідних для виконання бойової роботи.

Результатом моделювання експлуатації артилерійського ствола є отримання достовірних даних про ресурс і характеристики його зміни в залежності від початкових умов стрільби. Крім того, отримання можливості, на розсуд оператора, забезпечення немежових значень вихідних даних для збільшення часу застосування ресурсу без навантаження, якщо таке використання артилерійської установки не порушує логіку бойової роботи [79, 80].

Можливість у ході моделювання складати різні сценарії щодо розвитку експлуатації артилерійської установки для використання залишкового ресурсу.

Інформаційна і, як наслідок, багато вихідна, що призводить до однакового результату, природа процесу моделювання дозволяє здійснити не лише автоматизацію процесу моделювання експлуатації артилерійських стволів, а й їхню оптимізацію в реальному часі на базі сучасних обчислювальних систем. Інформаційна модель експлуатації артилерійського ствола розглядається як сукупність математичних моделей, необхідних для обчислень розподілених властивостей, моделей станів, що забезпечують можливість ведення бойової роботи, та моделей графічних та візуальних інтерфейсів для подання у зручній для сприйняття формі. Оскільки основою для побудови інформаційної моделі служить технологічна потреба про стан ствола, дані по якій забезпечуються цілеспрямованою сукупністю модельних розрахунків на поточні властивості, необхідні для забезпечення рішення про стан ствола. Інформаційна модель заснована на різних джерелах, до яких відносять: технічний паспорт та циркуляр на артилерійську зброю; результати полігонних випробувань, зокрема балістичних; статистичні дані у разі серійних зразків, що виробляються за однаковою технологією, вони зазвичай виділяються у самостійну інформаційно-довідкову систему [81].

Вихідні дані для інформаційної моделі процесу моделювання експлуатації артилерійської установки є константне забезпечення механічних, теплофізичних і хіміко-кінетичних величин та масивів властивостей, необхідних для моделювання.

Аналіз фізико-хімічних процесів, що відбуваються в артилерійському стволі в процесі експлуатації, дозволив виділити кілька груп параметрів, необхідних для перевірки в процесі моделювання з метою оцінки залишкового ресурсу [82].

Перша група параметрів, що характеризує загальну поперечну, повздовжну та місцеву міцність ствола та його частин. Умови можливої експлуатації за цією групою параметрів ґрунтуються на перевірці виконання умов нерівностей $\sigma \leqslant [\sigma]$ и $P_1 \leqslant [P]$, де $\sigma = \{\sigma_{экв}, \sigma_{эж}, \sigma_{ду}, .\}$ – вектор розрахункових показників міцності; $P_1 = \{p_1^y,\ p_1^{ckp}, p_2^{об},\ p_{усл}, p_{разр}, .\}$- вектор розрахункової ключової здатності пружних і можливих опорів; [σ] - вектор допустимих значень напруги; $[P]$ - вектор необхідних опорів, відповідні їм запаси міцності визначаються дослідним шляхом; $\sigma_{экв}$- еквівалентна напруга в нарізці ствола; $\sigma_{эж}$ – максимальна напруга в районі інжекційних отворів; $\sigma_{ду}$ – максимальна напруга перед дульним потовщенням; p_1^y – межа пружного опору моноблоку; p_1^{ckp} – межа можливого опору скріпленого ствола; $p_2^{об}$ – пружний опір оболонки ствола; $p_{усл}$ – умовна межа пружного опору; $p_{разр}$ – руйнівний тиск.

Друга група параметрів, що характеризує зміну форми, розмірів та стану поверхні каналу ствола, узагальнюється нерівністю $\delta \leqslant [\delta]$. Складові вектору є характеристиками стану каналу по зношеності, вони можуть бути як розрахунковими, так і дослідними: $\{\Delta d_{уд}, \Delta\lambda_0, \delta_{пл}, \delta_{сф}, \delta^{р},\ \delta_{т}, l_{mp}.\}$, де $\Delta d_{уд}$ – діаметральне зношення на постріл; $\Delta\lambda_0$ – подовження камори; $\delta_{пл}$ -– глибина зони плавлення; $\delta_{сф}$ – глибини зони структурних перетворень; $\delta^{р}$ – глибина зони пластичної деформації; $\delta_{т}$ – теплове розширення каналу; l_{mp} – середня довжина тріщини.

Третя група параметрів характеризує ствол як механічну коливальну систему, що зводяться до нерівності: $\gamma \leqslant [\gamma]$, де складові вектора $\gamma = \{\gamma_д, f_{ст}, EJ,\ \nu_i, .\}$; $\gamma_д$ – дульний кут; $f_{ст}$ – статичний прогин ствола від власної ваги; EJ – поперечна жорсткість ствола; ν_i – частоти власних, радіальних, поперечних та повздовжніх коливань.

Четверта група параметрів характеризує ствол як складову частину зброї: $\varepsilon \leqslant [\varepsilon]$, де складові вектору $\varepsilon = \{Q_{\text{ств}}, J_i, x_{\text{цм}}, \delta r_2, T_1^{\text{кам}}, P_3.\}$, де $Q_{\text{ств}}$, $J_i (i = 1,2)$, $x_{\text{цм}}$ – відповідно, маса, моменти інерції, координата центру мас; δr_2- розширення ствола в місці з'єднання з колискою, $T_1^{\text{кам}}$- температура поверхні камори; P_3– зусилля на затвор.

Важливим є тепловий аспект умов працездатності, який позначається на всіх інших умовах. Цей вплив поширюється на величину параметра лівої частини нерівності і величину в межах допустимого значення. Нерівномірний нагрівання стінки ствола призводить до появи температурної напруги і допустимої напруги через зниження міцнісних характеристик конструкційної сталі при нагріванні. Максимальна температура поверхні ствола є визначальним фактором зношення і повинна враховуватися у другій групі. Для різних груп параметрів ствола, по яких можлива відмова у роботі, істотні різні характеристики теплового поля. Універсальної характеристики немає [83].

Так, для параметрів першої групи важливий перепад температури та загальний рівень нагріву, для параметрів другої групи – максимальні температури, для параметрів третьої групи – повздовжній перепад, для параметрів четвертої групи інтегральна теплова характеристика δr_2^T. Тому тепловий аспект умов працездатності є нерівністю: $T \leqslant [T]$, де складові вектора характерних теплових показників $T = \{T_{\text{ун}}, T_1^{max}, T_1^{\text{кам}}, \Delta T_{ср}, T^m, T_{\text{ж}}, T(r_1, r_{1,}), .\}$,, де $T_{\text{ун}}$- температура поверхні каналу на початку нарізів перед поточним пострілом, що характеризує загальний рівень нагріву; T_1^{max}- максимальна температура поверхні каналу; $T_1^{\text{кам}}$- температура поверхні камори перед надходженням боєприпасу; $\Delta T_{ср}$ - перепад по довжині ствола середньої температури стінки; T^m- профіль температур у перерізі максимального тиску; $T_{\text{ж}}$- температура охолоджуючої рідини на виході із системи безперервного охолодження; $T(r_1, r_{1,})$– середня температура по товщині стінки.

Кожен із наведених векторів властивостей слід розуміти як відкритий, оскільки розвиток уявлень про працездатність ствола розширює його. Зведені докупи нерівності всіх груп і становлять модель, що складається з умов працездатності артилерійського ствола. Таким чином, аналіз представленої моделі показав, що існує важлива проблема, яка полягає у моделюванні нових стволів, технологія якого маловивчена або невідома. Природно, що проблеми посилюються на етапі інтерпретації результатів форсованої бойової роботи нових систем.

1.7.2 Автоматизація розрахунків внутрішньобалістичними моделями стану стійкості стволів

Рівень сучасного розвитку обчислювальної техніки та інформаційного моделювання дозволяє автоматизувати будь-які методи вирішення основного завдання балістики ствольних систем, що робить можливим проведення моделювання газодинамічних процесів при пострілі, вирішення оптимізаційних та зворотних завдань внутрішньої балістики [74, 76].

Найбільш поширеними методами розв'язання основного завдання балістики є емпіричні методи Валльє, Гейденрейха, Кранца, Екінгауза, фон Цедліца, Ледюка та аналітичні методи Дроздова, Серебрякова, Слухоцького, Оппокова, Корнера [74].

Набули поширення змішані методи, основою яких є узагальнена термодинамічна модель за стандартом STANAG 4367. При вирішенні основного завдання внутрішньої балістики методи дозволяють розраховувати значення швидкості боєприпасу та середнього тиску в каналі ствола не тільки в опорних точках, а й отримувати функції зміни швидкості та тиску залежно від часу та довжини ствола.

Слід відмітити програмні сервіси з реалізацією емпіричних методів як LeDuc і Nabmp. Базовим алгоритмом LeDuc є емпіричний спосіб визначення

внутрішньобалістичних характеристик, розроблений Ледюком, орієнтований на моделювання початкової швидкості боєприпасу стрілецької зброї при вихідних даних у дев'ять змінних. Nabmp реалізує покращений числовий метод балістичного розрахунку (numerical advance ballistics model). Nabmp орієнтована також на моделювання піродинамічних процесів у каналі ствола стрілецької зброї.

Аналітичні методи реалізовані у Interior Ballistics: Easterm model. Розрахунковий сервіс Interior Ballistics: Eastern model, ballistics.eu є програмним продуктом автора – Jan Krcmar. Сервіс призначений для внутрішньобалістичного моделювання, за структурою вхідних даних передбачається, що в основу покладено модифікацію методу Слухоцького, вихідними даними є 19 змінних.

Відомий розрахунковий модуль Int.Ballistics для Matlab, який дає вирішення основної задачі внутрішньої балістики методом чисельного інтегрування системи внутрішньобалістичних рівнянь при заданому аргументі, автор – В.Л. Хайков. Як базовий алгоритм був застосований метод послідовного чисельного інтегрування систем рівнянь внутрішньої балістики, у першому та другому періодах вихідними даними на вирішення є 16 змінних [78].

Змішані методи представлені у програмному продукті Interior Ballistics: STANAG 4367 model, Edition 2, який є угодою НАТО, автор – Jan Krcmar, що формалізує та стандартизує термодинамічну внутрішньобалістичну модель. Це дозволяє уніфікувати моделювання та порівняльний аналіз процесів, що відбуваються при пострілі, для вирішення необхідно визначити 46 змінних. Результат розрахунку – швидкість снаряда і середній тиск порохових газів як в опорних точках: початок розгону, максимальний тиск газів, закінчення горіння пороху, швидкість снаряда і тиск на дульному зрізі, так і в кожній точці його руху в каналі ствола.

Автоматизація моделювання процесів оцінки стійкості ствола зводиться до методу керованої зміни можливих балістичних характеристик зброї для досягнення максимуму стійкості. З іншого боку, в обговоренні тертя є особливі застереження. Тертя визначає дисипативні втрати, які можна розглядати як процес метання термодинамічної машиною. Дві характеристики такої машини: якість перетворення бризантної речовини на порохові гази та тертя, визначатимуть ККД процесу, з яким пов'язана початкова швидкість снаряда.

Звідси випливає необхідність модернізації розв'язання такої задачі, що ґрунтується на моделюванні внутрішньобалістичних енергетичних процесів, в основу якої закладено моделі термокінетичних характеристик процесів перетворення твердої бризантної речовини на порохові гази.

Підвищення швидкості горіння і, як наслідок, питомого енерговиділення веде до усунення координат початку газоутворення у бік казенної частини, повне перетворення твердої речовини на газоподібне для порохового заряду закінчується раніше, що призводить до зміни законів внутрішньої балістики.

Високі швидкості руху сучасних засобів повітряного нападу, що зумовили зменшення часових інтервалів їхнього знаходження в зонах обстрілу зенітних автоматів, при неврахуванні змін початкових швидкостей снарядів сприятиме невиконанню завдань протиповітряної оборони. Для танкових гармат ефект невизначеності початкової швидкості призведе до невизначеного результату при зустрічі снаряда з ціллю, що особливо важливо для підкаліберних снарядів.

Проте нині недостатньо вивчено енергетичний стан задачі внутрішньої балістики з погляду кінетичних процесів. Стосовно артилерійських стволів цікавить розгляд періодичного виділення сажі при стрільбах.

Процес незакономірного періодичного утворення сажі пов'язаний із значним збільшенням дульної кінетичної енергії як засобу підвищення вражаючої дії зброї. Такі процеси нерегулярно виявляються при надвисокій

початковій швидкості снаряда. Як при звичайному, так і при надшвидкісному режимі для оптимізації вражаючої дії системи слід звертатися до взаємозв'язку маси й швидкості. Для деяких застосувань збільшена маса є основним параметром, що веде до значно збільшеної дульної енергії.

Мінімізація вразливості артилерійської системи та підвищення стійкості ствола є серйозним обмеженням використання технології дульних засобів ураження в США. Передбачається прийняття на озброєння лише тих боєприпасів, які є безпечними до вкрай максимального ступеня. Оскільки покращені характеристики артилерійської системи та зменшена небезпека несумісні, то для задоволення вимог щодо безпечних боєприпасів необхідні нові підходи та компроміси характеристик [77, 78].

Габарити та маса артилерійської системи та боєприпасу впливають на інші характеристики системи. Це насамперед зменшення навантаження по матеріально-технічному забезпеченню, покращення тактичної, оперативної та стратегічної мобільності, збільшена наявність боєготових сил та засобів, покращена можливість промислового виробництва, зменшена вартість та зменшена дія на природне довкілля протягом усього життєвого циклу.

Зрештою, характеристики всіх артилерійських систем обмежуються технологічно реалізованим максимальним тиском, що допускається корисним навантаженням, яке може витримувати ствол.

Основою циклу внутрішньої балістики є компроміс між швидкістю газоутворення за рахунок розкладання бризантної речовини та швидкістю збільшення вільного об'єму як результату переміщення снаряда каналом ствола. На початку балістичного циклу утворюється багато газів і перевищується межа максимального тиску, що накладає обмеження на початкову поверхню горіння. На наступних стадіях циклу снаряд рухається каналом ствола і потрібна швидкість газоутворення більша, ніж початкова, для підтримки тиску. Так як

швидкість газоутворення зменшується при падінні тиску, то на пізній стадії балістичного циклу необхідна максимальна площа поверхні горіння.

Вимога до поверхні горіння, що збільшується, призвела до використання пористої геометрії зерна пороху. В межах цієї концепції вивчаються: метальні заряди із сповільнювачами або інгібіторами, а також із програмованим виділенням енергії; ущільнені заряди; монолітні метальні заряди з високою швидкістю горіння; рухливі метальні заряди. Для досягнення початкових швидкостей, що перевищують 2 км/с, потрібні дуже високі відношення метального заряду до маси снаряда [66, 61].

1.8. Постановка завдання дослідження

Представлений матеріал було узагальнено і структуровано. Дослідження матеріалу, що викладено в п.п. 1.1–1.7, дозволив представити мету дисертаційного дослідження, яка полягає в визначенні найкращого часу виконання бойової задачі артилерійською гарматою при тривалих динамічних збуреннях за рахунок удосконалення імітаційних моделей та методів керування станами для забезпечення мінімальної втрати її боєздатності.

На першому кроці планується здійснити удосконалення імітаційної моделі розподіленого утворення порохових газів по довжині стволу гармати в процесі спрацьовування заряду та методу ідентифікації їх температури для виявлення станів як додаткової діагностичної ознаки ефективного пострілу [9, 10].

На першому кроці потрібно буде розв’язати наступний комплекс завдань:

– провести аналіз причин утворення сажі в каналі ствола при пострілі;

– розробити на основі фізико-хімічних процесів розширення порохових газів у каналі ствола математичну модель, що визначає умови утворення сажі;

– розробити модель і метод визначення зміни температури порохових газів по довжині ствола в процесі руху снаряду;

– змоделювати розподіл температури в просторі ствола між зарядною коморою і рухомим снарядом.

Пошук фізико-хімічного ефекту, що призводить до утворення сажі при пострілі, дасть змогу розв’язати прикладну практичну задачу. Така задача полягає в необхідності, при кожному поточному пострілі, визначення стану артилерійської установки (заряд–зарядна камора–ствол–ціль) у разі проведення стрільб за обмеженого часу або організації діагностичного каналу для забезпечення ефективного вирішення бойового завдання.

Доступним способом отримання інформації по формуванні уставок для поточного пострілу є отримана інформація від пострілу що відбувся попередньо. У польових умовах це можна зробити лише шляхом вимірювання відповідних збурень, від існуючих фізичних полів. Відповідну інформацію можна отримати за рахунок вимірів акустичних полів та на основі візуалізації проявів пострілу.

Розв'язання такого завдання дозволить у сфері практичних стрільб вести управління стрільбою у реальному часовому діапазоні. Отримати результат можна тільки в результаті розробки обґрунтованих одновимірних моделей та методів автоматизованого керування для забезпечення управління практичними стрільбами за багатьох обмежень і збурень, які є в реальному бойовому застосуванні.

Другий крок передбачає удосконалення методу пошуку оптимального стану і моделі ефективного керуванням бойовою роботою артилерійським підрозділом при ураженні цілі за умовою зміни вогневої позиції для забезпечення мінімальної втрати боєздатності та найкращого часу [11, 12, 13, 14, 15].

В цьому напрямку треба буде вирішити наступний комплекс завдань:

– адаптувати узагальнений критерій оцінки стрільби артилерійського підрозділу за наявності випадкових збурень пострілів;

– провести Марківське моделювання ефективності послідовної стрільби артилерійського підрозділу за наявності у пострілах випадкових збурень;

– удосконалити імітаційну модель керуванням бойовою роботою артилерійської установки при ураженні цілі при забезпечені розрахунку поточного стану боєздатності;

– удосконалити метод пошуку рішення про стан виконання бойової задачі артилерійською установкою атакуючої сторони при умові виконанні протиборчою артилерійською установкою вогню на враження на поточну вогневу позицію артилерійського підрозділу і при її зміні на іншу.

Модель, що буде розроблено може бути пристосована для керування бойовою роботою артилерійської установки для розв'язку виконання бойового завдання по знищенню цілі заданою кількістю снарядів при умові зміни вогневої позиції для зменшення ймовірності її вогневого ураження артилерійською установкою протиборчої сторони. Динаміка системи взаємодії «артилерійська установка атакуючої сторони − ціль − артилерійська установка протидіючої сторони» повинна розглядатися в процесах дій. Модель повинна враховувати зменшення боєздатності в часі за рахунок: раптових відмов, зносових відмов при проведені бойової роботи та відмов при руйнуванні протиборчою стороною при вражені.

На третьому етапі потрібно буде розробити метод параболічної апроксимації визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею на основі реєстрації балістичної хвилі, утвореної снарядом, що летить траєкторією, розподіленою у просторовому відношенні системою акустичних сенсорів [16, 17, 18, 19].

В цьому напрямку треба буде вирішити наступний комплекс завдань:

– розробити метод реєстрації координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею;

– побудувати схему методу верифікації артилерійського пострілу з випадковими збуреннями;

– розробити метод розрахунку точки приземлення снаряда під час пострілу з випадковими збуреннями на основі параболічної апроксимації;

– виконати імітаційне моделювання;

– здійснити зіставлення розробленого методу із методом компенсації випадкових збурень методом артилерійської вилки;

– провести попередній польовий експеримент, для підтвердження ефективності запропонованого методу.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ ДУЛЬНОГО ВИКИДУ ЯК ДІАГНОСТИЧНОЇ ОЗНАКИ ПРО СТАН ПОСТРІЛУ

Розділ присвячений розробці імітаційної моделі утворення газів дульного викиду в тому числі сажі в процесі пострілу та їх розподілу температури по довжині ствола.

Для моделювання необхідно:

– провести аналіз причин утворення сажі в каналі ствола при пострілі;

– розробити на основі фізико-хімічних процесів розширення порохових газів у каналі ствола математичну модель, що визначає умови утворення сажі;

– розробити метод визначення зміни температури порохових газів по довжині ствола в процесі пострілу;

– змоделювати розподіл температури в просторі ствола між зарядною коморою і рухомим снарядом.

2.1 Загальні положення про інформаційне поле пострілу гармати.

Призначення порохів передбачає їхнє масове використання в непередбачувані моменти тривалого проміжку часу. В результаті в арсеналах відбувається їхнє накопичення з різними термінами зберігання. Особливістю нітроцелюлозних (НЦ) порохів є нестабільність хімічного складу в процесі зберігання. Вибірковий контроль якості партії використовуваного НЦ пороху, відсутність даних окремих її частин ускладнює виконання поставлених завдань стрільби. Розкид характеристик метальних зарядів у межах однієї партії збільшується при закінченні гарантійних термінів зберігання пороху. На точність стрільби впливає і технічний стан ствола, ступінь його зношеності. Ця характеристика змінна для різних видів зброї, зокрема в залежності від кількості й потужності здійснених пострілів, від вихідного стану ствола.

Розв'язання завдань стрільби за одночасної мінімізації витрачених ресурсів може бути забезпечене шляхом внесення коригувань до розрахункових параметрів пострілу. В умовах практичних стрільб не можливе визначення якості метальних зарядів (їхньої енергетичної «ємності», ентальпії) та технічного стану ствола безпосередньо за допомогою інструментальних засобів. Але зміна параметрів процесів внутрішньої балістики впливає на зовнішній вияв пострілу.

Моделі, що використовуються для вирішення завдань внутрішньої балістики, дозволяють розрахувати низку параметрів процесів зовнішнього вияву пострілу. Одним із таких, що якісно піддається відеофіксації, є переміщення снаряда. За певними ознаками може бути виділена ударна дульна й балістична хвилі. Вони можуть бути основою непрямого визначення швидкості снаряда для аналізу стану артилерійської системи [53, 54]. Найменше приділяється уваги дульному спалаху (Muzzle Flash) та впливу на нього зміни параметрів процесів внутрішньої балістики. Однак саме вона найінформативніша в зовнішньому вияві пострілу і піддається якісній відеофіксації. Таким чином, для визначення параметрів процесів внутрішньої балістики (швидкості та тиску), що залежать від стану метального заряду та технічного стану ствола, є актуальним аналіз ефектів, що супроводжують зовнішній вияв пострілу. Для забезпечення можливості їхнього обліку необхідний подальший розвиток математичної моделі фізико-хімічних процесів, що супроводжують постріл.

Математичні та імітаційні моделі (ММ), що використовуються для визначення характеристик пострілу, переважно розрізняють за ступенем організації передачі даних від одного модуля або функції до іншої, що робить можливим деталізувати опис цих процесів. Так, для моделі у зосередженій постановці або одновимірній і класичне аналітичне [84, 85] чи чисельне рішення систем звичайних диференційних рівнянь с застосуванням методів

кінцево-різницевих елементів [86]. З подальшим розвитком апроксимаційних методів та економічної доступності обчислювальних ресурсів з'явилися багатовимірні розподілені в просторі і часі моделі [87], а також моделі, що враховують можливість багатофазного існування газів викиду [88]. В останньому випадку як конденсована фаза розглядаються будь які металеві домішки або фрагменти пороху.

Невизначеність процесів пострілу з гармати пов’язана з похибками математичного опису і імітаційного моделювання. Така невизначеність зробила можливим використовувати в моделях будь які емпіричні коефіцієнти. Такий технічний прийом дозволяє узгодити аналітично розраховані параметри процесів з практичними і бойовими стрільбами. Дослідження, що проведені різними авторами з удосконалення імітаційних моделей та способів їх вирішення не дозволили усунути вплив емпіричних коефіцієнтів. Це дозволяє припустити як неточність, так і неповноту опису тривалих явищ. По суті внутрішня балістики не дає можливість вимірювання процесів які її утворюють. Наслідки перебігу подій системи «заряд-зарядна камора-снаряд-порохові гази» однозначно проявляються у зовнішніх виявах при утворенні дульного спалаху. Наприклад, у [89] основним завданням є дослідження руху ПГ у дульному спалаху за наявності дульного гальма. Спроба використання такого взаємозв'язку для його вирішення через результати чисельного розв'язання задачі з урахуванням хімічних реакцій розкладання пороху у ствольній системі враховуючи дульний спалах. Для вторинного спалаху порохових газів горюча складова продукти розкладу НЦ CO і H_2.

Дослідження процесу розвитку дульного спалаху деяких видів зброї свідчать про необхідність імітаційного моделювання процесів. Викиди сажі в дульному викиді фіксуються в [88] при пострілі 155 мм САУ М109 (Paladin, США).

У складі НЦ пороху недостатньо кисню для окислення за максимальним ступенем присутніх елементів. Дефіцит кисню може становити ~20%. Але під час вирішення завдань внутрішньої балістики з урахуванням хімічної кінетики процесів горіння пороху не виділяються умови можливого утворення конденсованої фази у вигляді сажі. Таким чином, залишаються нез'ясованими питання причин та локалізації (у стволі чи дульному спалаху) утворення значних обсягів сажі.

На наявність сажі в дульному викиді звертають увагу фахівці, які досліджують проблеми визначення типу та локації зброї за дульним спалахом [90, 91]. Використання інформації про енергію дульного спалаху, склад НЦ пороху, вологість, температуру, суттєво відхиляють експериментальні дані та результатів розрахунків при порівнянні, що свідчать про відсутність відповідних верифікованих моделей.

Відсутнє пояснення й у описі деяких процесів, що відбуваються в дульному спалаху. Так, у [89] вторинний спалах пояснюється запалюванням у повітрі складових ПГ у вигляді CO та H_2. Як причина додаткового розігріву суміші розглядається дульна ударна хвиля. Через певну площу її межі можна було очікувати запалювання суміші на деякій поверхні. Такий стан речей відомий і представлено у навчальній літературі як результат полігонних випробувань, але зрозумілого пояснення процесу утворення не наводиться.

У наукових працях [92, 93] приведено дослідження впливу зношеності ствола гармати та деградації пороху на процес пострілу. На основі відомих моделей одержані результати багатьох досліджень. У використовуваних моделях фізико-хімічних явищ у процесі пострілу не розглядається повнота обліку вхідних значень і розрахунків. Не проводиться зіставлення отриманих результатів з ефектами зовнішнього вияву пострілу. Так, у [92] розглядається лише форма вибоїни у мішені. Її еліптична форма пояснюється збільшенням кута атаки снаряда внаслідок зменшення швидкості обертання при зношеності

ствола. Але при бойовому застосуванні швидкість обертання снаряда може бути зменшеною за великою кількістю умов і в першу чергу при зменшені швидкості снаряда на виході зі ствола внаслідок зміни складу пороху. У [93] представлено результати моделювання стану гармати де зношеність стволу та зміна якості пороху на зовнішній прояв пострілу не пов'язуються один з одним.

На достовірність результатів розрахунків впливає повнота обліку ефектів у імітаційній моделі досліджуваного процесу. З цих позицій цікавить виявлення фактора, що призводить до утворення сажі в процесі пострілу та визначення можливості впливу на нього ступеня зношеності ствола та деградації пороху.

2.2 Аналіз причин утворення сажі в каналі ствола під час пострілу

Від процесів внутрішньої балістики залежать ефекти проміжної балістики (дульний викид, дульний спалах). Їхньою особливістю є можливість візуального спостереження. У зазначених вище роботах склад ПГ по довжині ствола приймається постійним і визначається виходячи із процесу горіння НЦ пороху певної марки. Як основні його компоненти розглядаються CO_2, H_2O, N_2 – інертні, CO, H_2, CH_4 – горючі. Усі компоненти газоподібні.

При такому складі ПГ не вдається пояснити прикметну освітленість різних частин дульного спалаху. Так, однаковий склад повинен давати однакову або близьку інтенсивність освітленості по всій довжині дульного викиду. Але це не відбувається. Це може відбуватися за різного складу ПГ по довжині дульного викиду. Згадані вище горючі газоподібні компоненти (CO, H_2, CH_4) при горінні мають безбарвне полум'я або таке, що ледь світиться. Їх доспалювання в повітрі може визначати спектр дульного спалаху, що мало світиться. Яскраву освітленість можуть давати розпечені тверді частинки. У їх якості при використанні НЦ пороху може виступати сажа.

Однорідний по довжині ствола і тільки газоподібний склад ПГ не дозволяє пояснити і форму дульного спалаху. Він може бути різним. Для

прикладу зупинимося на одному з них. Можна виділити дві стадії дульного викиду. Першу позначимо як «газодинамічну». У цей час відбувається викид ПГ без їх спалаху. Очікувано дульний викид формується у вигляді конусоподібного тіла з розширенням у головній частині та характеризується великим вмістом речовини, схожої на сажу. Надалі відбувається займання частини ПГ, що вийшла, але їх викид триває. Цю стадію назвемо «піродинамічною». ПГ, що продовжують надходити, вже практично не містять сажі. При тільки газоподібному складі ПГ можна було очікувати поступової зміни поперечного перерізу їх викиду.

Геометрія дульного викиду при його спалахові також можна пояснити наявністю в головній частині сажі. Підвищення температури під час дульного спалаху призводить до збільшення обсягу ПГ у всіх частинах дульного викиду. Але при горінні сажі мольна кількість газоподібних продуктів до і після реакції не змінюється:

$$C \downarrow + \underline{O_2} \uparrow = \underline{CO_2} \uparrow . \qquad (2.1)$$

Водночас при горінні CO та H_2 мольна кількість газоподібних продуктів реакції порівняно з вихідним зменшується в 1.5 рази:

$$2 \cdot CO \uparrow + O_2 \uparrow = 2 \cdot CO_2 \uparrow \; 2 \cdot H_2 \uparrow + O_2 \uparrow = 2 \cdot H_2O \uparrow . \qquad (2.2)$$

Це може зменшувати ступінь розширення ПГ за рахунок нагрівання в кореневій частині дульного викиду (у зоні відсутності сажі) під час дульного спалаху.

Таким чином, з аналізу виду дульного викиду та дульного спалаху випливає, що склад ПГ по довжині ствола в момент виходу з нього снаряда має змінний склад. До складу частини ПГ може входити сажа.

Під час пострілу НЦ порох не передбачає в процесі його горіння утворення сажі. Її наявність у дульному викиді свідчить про можливість перебігу додаткової хімічної реакції.

Кількість кисню у складі НЦ пороху недостатньо для окислення всіх горючих елементів до максимальної валентності. В результаті в ПГ поряд з двоокисом вуглецю CO_2 у значній кількості присутній його монооксид CO. Водночас кількості кисню достатньо для досягнення в процесі горіння температур продуктів згоряння ~ 2500К – 3000К. Результати розрахунків з урахуванням застосовуваних моделей показують, що під час розгону снаряда температура ПГ зменшується до величин ~ 1000К - 1200К, і навіть нижче. Поєднання наявності монооксиду вуглецю CO та різкого зниження температури суміші ПГ до величин, менших за 1300 – 1400К, створює умови для можливості перебігу реакції Будуара – Белла. Це реакція диспропорціонування монооксиду вуглецю CO у вуглець (сажу) і двоокис вуглецю:

$$2 \cdot CO \uparrow \rightarrow C \downarrow + CO_2 \uparrow + (Q). \qquad (2.3)$$

Наявність цієї реакції впливає на величину параметрів ПГ, що необхідно враховувати у моделі процесів внутрішньої балістики. З одного боку, утворення конденсованої фази (сажі) веде до зменшення тиску каналу ствола. З іншого боку, екзотермічний характер реакції сприяє підтримці температури в процесі розширення ПГ.

2.3. Модель утворення сажі на основі реакції Будуара – Белла

Реакція (2.3) зворотна. Але на практиці під ім'ям реакції Будуара – Белла найчастіше вона розглядається в одному напрямку зі згадкою про можливість її зворотності:

$$C\downarrow + CO_2\uparrow \rightleftarrows 2\cdot CO\uparrow - (Q). \qquad (2.4)$$

Такі процеси тривають або розглядається можливість їх використання в чорній та кольоровій металургії, при газифікації вугілля та різноманітних органічних речовин (піроліз). Процеси з перебігом реакції у напрямку (2.3) розглядаються рідше. До них відноситься, наприклад, технологія очищення від *CO* потоку, збагаченого воднем, для використання в низькотемпературних паливних елементах [94]. Ще одним прикладом розгляду диспропорціонування *CO* може бути дослідження отруєння каталізатора в процесі синтезу метанолу із синтез-газу [95].

Термодинамічна рівновага реакції Будуара – Белла за температури ~ 1300К практично повністю зміщена у бік утворення монооксиду вуглецю (2.4). При цьому за цієї температури реакція (2.3) залишається екзотермічною. Така ситуація пояснюється ендергонічністю (endergonic) реакції (2.3) за високої температури, що сприяє перебігу екзергонічної (exergonic) реакції (2.4). За 400К термодинамічна рівновага повністю зміщена у бік утворення двоокису вуглецю (2.3). Але на практиці за цієї температури у стійкому стані зберігається монооксид вуглецю (*CO*), що пояснюється низькою швидкістю реакції (2.3) за нормальних умов.

Враховуючи результати [96], можна виділити температурний діапазон 1000К – 1200К, коли відбувається утворення вуглецю відповідно до реакції (2.3). З одного боку, у цьому температурному діапазоні термодинамічна рівновага ще допускає перебіг реакції. З іншого боку, висока температура суттєво збільшує її швидкість. У [97] розглядається виділення вуглецю на різних сплавах. Але навіть з урахуванням їх каталітичних властивостей абсолютні значення кількості вуглецю, що виділився, невеликі. Це пояснюється все ще малою швидкістю реакції (2.3) при атмосферному тиску. В умовах пострілу перед виходом снаряда зі ствола тиск ПГ може дорівнювати

~ 30 – 50 МПа. За рахунок високого тиску в порівнянні з атмосферним і з урахуванням другого порядку реакції (2.3) її швидкість зростає в ~ 300^2 - 500^2 (90000 – 250000) разів. Швидкість реакції може бути ще більшою, якщо температура ПГ знизиться до величини ~ 1200К – 1300К під час розгону снаряда в стволі до моменту досягнення ним дульного зрізу. В цьому випадку тиск ПГ буде більшим і швидкість реакції (2.3) зросте. Це пояснює утворення під час пострілу великої кількості сажі. Можливість такого сценарію розвитку реакції (2.3) зі збільшенням тиску підтверджується результатами роботи [97].

Динамічний процес руху артилерійського снаряду каналом ствола від зарядної комори до дульного гальма утворює зміну величини тиску ПГ від ~ 300–500 МПа до 0,1 МПа. Такий градієнт тиску, а також висока температура можуть утворювати рівноважений стан хімічних реакцій між компонентами порохових газів і газів дульного викиду. Розв’язання задачі пошуку складу ПГ основане на системі алгебраїчних рівнянь, що включають закони діючих мас, збереження речовини, Дальтона (сума парціальних тисків газів, що складають суміш).

Для запропонованої моделі форма рівнянь закону діючих мас базується на використання рівняння утворення хімічних компонентів ПГ з елементарних хімічних речовин [98]. Наприклад:

$$H_2O \;\rightleftarrows\; 2\cdot H + O\;; CO_2 \;\rightleftarrows\; C + 2\cdot O\;. \qquad (2.5)$$

Універсальна форма представлення рівноважної моделі дозволяє систему рівнянь на основі заданого переліку речовин які можуть бути у складі суміші завжди мати замкнутою. Розроблені імітаційні моделі формалізують стани пострілу, для НЦ пороху. Склад речовин ПГ розраховується відповідно до моделі компонентів, які було прийнято.

$$H_2O,\ CO_2,\ CO,\ H_2,\ CH_4,\ N_2\ . \qquad (2.6)$$

Для відображення можливості утворення сажі доповнимо цей список ще одним компонентом та позначимо його символом F_C (free carbon, дрібнодисперсна конденсована фаза вуглецю). Врахування наявності вуглецю в ПГ є особливістю використаної для розрахунку моделі. Метод і імітаційна модель розрахунку термодинамічних і теплофізичних параметрів суміші продуктів газоутворення для конденсованої фази наведено в [98].

Для розрахунку складу ПГ необхідні дані про склад порохового заряду. Їх можна вважати відомими після його виготовлення та протягом гарантійного терміну зберігання. Надалі внаслідок деструктивних змін склад може суттєво змінитись. На підставі даних Ліверморської національної лабораторії США [99] про процеси герентології пластичних бризантних вибухових речовин може бути відображений у вигляді:

$$C_6H_{7.7}N_{2.3}O_{9.6} \rightarrow C_{5.95}H_{7.99}N_{1.9}O_{8.76} + \text{нітропохідні ДФА} + \\ +0{,}001\ N_2 + 0.024\ N_2O + 0.012\ CO + 0.012\ H_2O, \qquad (2.7)$$

де ДФА – дифеніламін.

З (2.7) виявляється, що вихідна речовина деградує у вигляді втрати азоту з початкових 12 – 12,5% до 9 – 10% у кінцевому стані. В [99] зазначено, що при втраті внаслідок розкладання 7,2% вихідного нітрополімеру основна його частина (~ 80%) утримується стабілізатором ДФА. Внаслідок цього втрата загальної маси заряду не перевищує 3%. Можна вважати, що в результаті зберігання та деградації змінюється (зменшується) ентальпія заряду при практично незмінній його брутто-формулі.

У процесі руху снаряда у стволі температура ПГ безперервно змінюється і, як наслідок, відбувається зміна співвідношення їх компонентів. Особливістю

є сталість брутто-формули газової суміші та рівність її вихідної брутто-формулі порохового заряду. Це дозволяє на попередньому етапі розрахувати склад ПГ для різних температур та апроксимувати його за допомогою, наприклад, поліноміальної залежності. Надалі ця залежність може бути використана при вирішенні завдань внутрішньої балістики за різного ступеня деградації вихідного заряду.

Для подальшого моделювання виберемо зразок пороху, вихідний склад якого наведено в [99] і відповідає нижче наведеним даним (Таблиця 2.1):

Таблиця 2.1 − Склад артилерійського пороху

Компонент	Речовина	%	Брутто-формула
Енергетична основа	нітроцелюлоза	96.0	$C_6H_{7.7}N_{2.3}O_{9.6}$
Пластифікатор	етанол	0.5	C_2H_6O
	диетиловий ефір	0.5	$C_4H_{10}O$
Стабілізатор хімічної стійкості	дифеніламін	1.0	$C_{12}H_{11}N$
Речовини-паразити	вода (волога)	2.0	H_2O

Його брутто-формула має вигляд:

$$C_1H_{1.44}N_{0.37}O_{1.57}\ , \tag{2.8}$$

або, надавши їй вигляду (2.7):

$$C_6H_{8.64}N_{2.22}O_{9.42}\ . \tag{2.9}$$

При описі властивостей порохів як енергетичної характеристики прийнято використовувати їхню силу (f). Водночас в [98] розрахунок базується на основі ентальпії утворення вихідної речовини. Оцінимо співвідношення цих величин. Приймемо: процес горіння – ізоентальпійний (isoenthalpic process,

constant-enthalpy process); процес у газовій фазі – адіабатичний (adiabatic process). Відповідно до прийнятих припущень:

$$I_{\text{уд}}^{\text{П}} = I_{\text{уд}}^{\text{ПГ}} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot f, \qquad (2.10)$$

де $I_{\text{уд}}^{\text{П}}$ – питома ентальпія пороху, $I_{\text{уд}}^{\text{ПГ}}$ – питома ентальпія порохових газів, γ – показник адіабати, f – сила пороху.

Припустимо, γ=1.2, f=950 кДж/кг. Тоді $I_{\text{уд}}^{\text{П}} = 5700\ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$. З урахуванням цих величин виконано подальші розрахунки. Визначено мольний урівноважений склад ПГ при різній температурі. Результати наведені в таблиці 2.2. Як і зазначалося раніше, помітна кількість вільного вуглецю F_C може з'являтися в суміші, починаючи з температури ~ 1300К.

Таблиця 2.2 − Мольний склад порохового газу.

Склад ПГ	Температура, К							
	2940	**2000**	**1500**	**1400**	**1300**	**1200**	**1100**	**1000**
CO	0.400	0.396	0.392	0.377	0.362	0.333	0.273	0.177
CO_2	0,125	0,129	0,133	0,146	0,159	0,180	0,220	0,279
H_2O	0,167	0,165	0,163	0,158	0,152	0,152	0,167	0,212
H_2	0,211	0,213	0,215	0,221	0,229	0,236	0,236	0,219
N_2	0,097	0,097	0,097	0,097	0,098	0,100	0,104	0,112
CH_4	0	0	0	0	0	0	0,0003	0,0015
F_C	0	0	0,0016	0,0036	0,0092	0,0253	0,0673	0,1474

Під час моделювання використано наближення ідеального газу. При необхідності для значних величин тиску в рівнянні стану може бути врахований коволюм (covolume) газів. Співвідношення кількості CO_2, CO, F_C в діапазоні температур 1000К 1500К відповідає даним [94, 95].

2.4. Метод визначення температури ПГ за довжиною ствола в процесі пострілу.

Для розв'язання задачі внутрішньої балістики передусім проводиться усереднення значень величин, що визначають газодинамічні процеси (тиску та температури), що проходять у ПГ по довжині ствола в кожний момент часу при пострілі. Така процедура полегшує рішення. Можливість її застосування обґрунтовується несуттєвим впливом відхилення значень тиску і температури від середніх значень на аналізовані процеси.

Так, у [101] розрахунки виконані для зброї калібром 100 мм, із зарядною коморою довжиною lc=1 м. та довжиною ствола Ld=5 м. Маса заряду змінювалася в діапазоні 2,5...45 кг. Розмір тисків визначалася на дні каналу і на дні снаряда під час проходження ним дульного зрізу. Для всіх розрахунків відхилення тиску на дні снаряда від тиску на дні каналу становить у межах 6…53%. Відхилення величини тиску в різних частинах простору за снарядом, що рухається, від середнього значення може впливати на точність визначення швидкості снаряда. У той же час практично не впливає на склад ПГ. Великі значення тисків безвідносно до їх величин при високих температурах ПГ допускають їхній рівноважний склад.

У відкритих літературних джерелах не виявлено відомостей про розподіл температури ПГ по довжині ствола в процесі руху снаряда по стволу. При використанні моделей, що не враховують можливість утворення конденсованої фази, не виникає потреби в такій інформації. Вважається, що в процесі пострілу в діапазоні зміни температури ПГ їхній склад залишається практично незмінним. Це підтверджують результати розрахунків, наведені в табл. 2.2. У діапазоні від температури горіння (2940К) до температури початку утворення значної кількості сажі (~ 1400К) склад ПГ залишається майже постійним [101].

Характер зміни дульного викиду у часі свідчить як про можливість утворення конденсованої фази, так і про нерівномірність цього процесу за довжиною ствола. Для виявлення принципової можливості появи умов перебігу реакції диспропорціонування монооксиду вуглецю необхідно провести моделювання розподілу температури ПГ по довжині ствола методом кінцево-різницевих елементів у процесі пострілу. Розглянемо модель та процес пострілу снаряда. Введемо низку припущень:

− пороховий заряд горить за лінійним законом, швидкість залежить тільки від тиску;

− об’єм НЦ не враховується;

− початковий тиск перед пострілом однаковий;

− під час руху снаряда переміщення ПГ каналом ствола одномірне. Не відбувається згодом перемішування ПГ, що раніше утворилися, з вступниками;

− процес розширення ПГ з відомим показником адіабати;

− протитиск не враховується коли снаряд рухається;

− додаткові витрати енергії, враховуються через фіктивну масу снаряда;

− ПГ є сумішшю ідеальних газів, коволюм не враховується.

Для отримання можливості розгляду розподілу температури ПГ по довжині ствола математична модель (ММ) процесу має бути записана у приватних похідних. Це зазвичай веде до необхідності використання її для вирішення чисельних методів. Для попередньої оцінки розподілу температури при прийнятих припущеннях такий підхід не є раціональним. Запропоновано такий підхід, що описує стани і переходи між ними в процесі пострілу гармати:

− рух снаряда по каналу ствола складається с двох частин при розкладанні пороху та після;

− пороховий заряд згоряє незмінними порціями-елементами, рівними за масою;

− тиск утвореного газу постійний і дорівнює тиску при закінченні розширення ПГ для попереднього етапа розрахунку.

Значення величини тиску розкладання порції заряду визначає час (t_i) цього кінцево-різницевого процесу, який і є інтервалом розрахунку часу на черговому етапі. інтервал часу згоряння чергової частки заряду залежить від поточного тиску. Тому, інтервал часу на якому відбувається процес на черговому етапі розрахунку не буде постійним;

− утворення поточної порції газу масою m_i відбувається без впливу на вже існуючі ПГ. Кожному поточному етапу розкладання відповідає припущення про кількість обсягу порохового заряду;

− поточна порція ПГ, що утворилася, з'являється у зарядній коморі миттєво (рис. 2.1) і відбувається приріст тиску ПГ, і утворюється його нове значення (p_i), яке визначається кількістю доданих газів, а також обсягом (W_0, W_1, … W_{i-2}, W_{i-1}) і тиском вже існуючих;

Рис. 2.1. Схема формування частки газу на черговому кроці розрахунку [11]

− за дискрет часу t_i (тривалість чергового етапу розрахунку) відбувається розширення газу виконується робота і продовжується розгін снаряда, але надходження нової порції газу не враховується. При приросту інтервалу часу розраховується нова величина тиску газу. Що є умовою для розрахунку значення часу горіння чергової порції НЦ пороху на наступному етапі розрахунку часу;

− після повного згоряння НЦ пороху проводиться розрахунок адіабатичного розширення газу, виконання ним термодінамічної роботи для розгону снаряда.

Запропонований метод і модель розраховує розподіл температури ПГ по довжині ствола у процесі переміщення снаряду по каналу ствола. Для моделювання було прийнято використовувати залежності з значеннями вихідних даних, що відповідають сучасним артилерійським системам.

Зроблені спрощення та припущення дозволили на основі підходів методу кінцево-різницевих елементів запропонувати метод вирішення імітаційної моделі.

Крок 1. З (2.10) температура ПГ в зарядній коморі визначається, як функція від стану і якості НЦ пороху. Від температури, об'єму зарядної комори і показника адіабати, залежить тиск форсування. Частина заряду, яка згоріла визначає ентальпію. Визначається маса залишкового порохового заряду, вибирається кількість кроків розрахунку. На кожному етапі розрахунку розраховується маса заряду (m_i), яка перетворилась в газ. Умова можливості такого розрахунку, це маси всіх кінцевих елементів які є константами. Тиск форсування визначає швидкість перетворення НЦ пороху. Такий об'єм утвореного газу позначається як W_0 .

Крок 2. По розрахованому тиску з попереднього кроку, по імітаційній моделі розраховується час горіння t_i виділеної частини маси m_i. Прийнятий лінійний закон горіння $u_1=u_0 \cdot p$ та постійна площа горіння F. Формалізація перелічених дій дозволяє скласти вираз:

$$m_i = (u_0 \cdot p) \cdot F \cdot t_i \quad \Rightarrow \quad t_i = \frac{m_i}{(u_0 \cdot F) \cdot p} \; . \; . \qquad (2.11)$$

Спосіб визначення виразу в дужках описаний нижче.

Крок 3. В подальшому в простір каналу стволу, що за снарядом, без урахування зміни часу, без урахування зміни його об'єму поступає наступна частина ПГ, яку було утворено. В подальшому від значення *i*-го номера кроку моделювання ця частина ПГ позначатися як W_i. Пошук ентальпія (I_i^n) ПГ представляє собою сума ентальпії кінця попереднього кроку розрахунку і поточною яу це продемонстровано в (2.12). Зазначимо, що на початку кроку розрахунку енергія процесу горіння перетворена в ентальпію

$$I_i^n = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot P_i^n \cdot W_i^n \quad \Rightarrow \quad P_i^n = \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{I_i^n}{W_i^n} \tag{2.12}$$

що і визначає тиск газу (P_i^n). Як було показано і прийнято об'єми газу не змішуються, що дозволяє визначати наступні зміни величин.

Крок 4. Розширення ПГ і розгін снаряда на поточному крокові розрахунку відбувається впродовж часу t_i, визначеному на крокові 2 і описується співвідношенням:

$$\varphi M \frac{d^2x}{dt^2} = P \cdot S. \tag{2.13}$$

Тут M – маса артилерійського снаряда, φ – розрахунковий коефіцієнт, x – довжина заснарядного простору ствола, P –тиск газу, S – площа зрізу ствола.

Величина P визначається із співвідношення , що описує адіабатичний процес розширення газу:

$$(P_i^n) \cdot (W_i^n)^\gamma = (P_i) \cdot (W_i)^\gamma \quad \Rightarrow \quad P_i = (P_i^n) \cdot \left(\frac{W_i^n}{W_i}\right)^\gamma, \tag{2.14}$$

де P_i^n, W_i^n – значення тиску і об'єму заснарядного простору на етапі розрахунку які еквівалентні теплофізичним і термодинамічним величинам попереднього стану, P_i, W_i – значення тиску й об'єму в момент часу розрахунку на кроці.

Викладене дозволяє скласти модель процесу з припущеннями і попередніми моделями $W_i=S\cdot x_i$ і (2.14), тому модель (2.13) буде представлено у вигляді:

$$\frac{d^2x}{dt^2}-\frac{r}{(x)^\gamma}=0\ ,\quad where\quad r=\frac{P_i^n\cdot S\cdot(x_i^n)^\gamma}{\varphi\cdot M}\ . \tag{2.15}$$

Тут x_i^n – загальний розмір простору за снарядом який ще не рухається в початковий час на заданому кроці розрахунку.

Лінеаризуємо другий член рівняння (2.15) в точці x_{in}. Використовуємо за початкові умови значення величини x_{in} і швидкості снаряда v_{in} в початковий момент розрахунку на поточному крокові (кінцева швидкість на попередньому крокові розрахунку). Припускаючи, як і раніше γ=1.2, рішення (2.15) запишеться у вигляді:

$$x(t)=\frac{v^n}{\sqrt{d_1}}\,sin\,sin\,(\sqrt{d_1}\cdot t)-\frac{5}{6}x_i^n\,cos\,cos\,(\sqrt{d_1}\cdot t)+\frac{11}{6}x_i^n\ , \tag{2.16}$$

де $\quad d_1=\dfrac{6r}{5x_i^n}$

Враховуючи значення t_i, визначаємо величину заснарядного простору x_i^n яку буде отримано в кінці кроку моделювання, після знаходження похідної від (2.16)

$$v=x'(t)=v^n\,cos\,cos\,(\sqrt{d_1}\cdot t)+\frac{5}{6}x_i^n\sqrt{d_1}\,sin\,sin\,(\sqrt{d_1}\cdot t) \tag{2.17}$$

де v − швидкість снаряда v_i^k в цей момент.

Крок 5. Прийняті припущення і отримані результати на поточному кроці с застосуванням першого початку термодинаміки

$$\Delta U = A\ , \tag{2.18}$$

при адіабатичному розширенні газу між снарядом і зарядною коморою, враховуючи, що I=γ⋅U, ентальпія газу з врахуванням вже здійсненої термодинамічної роботи до кінця кроку розрахунку приймає значення:

$$I_{res} = I_{com} - \gamma \cdot \varphi M \frac{\left(v_i^k\right)^2}{2}\ . \tag{2.19}$$

Тут ΔU – зміна внутрішньої енергії газу, витраченої на термодинамічну роботу A з переміщення снаряду з розрахунковою масою φM, I_{com} – повна ентальпія, внесена з газом в заснарядний простір, I_{res} – остаточна ентальпія до кінця поточного кроку розрахунку. Рівняння (2.19) це рівняння Резаля яке представлено в ентальпійній (енергетичній) формі. У відповідності з

$$I_{res} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot P_i^k \cdot W_i^k \quad \Rightarrow \quad P_i^k = \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{I_{res}}{W_i^k} \tag{2.20}$$

Отримано модель ентальпії, яка визначає рушійний тиск газу при горінні НЦ пороху для поточного кроку моделювання.

Крок 6. Перевіряємо використання всього запасу порохового заряду, якщо використаний не весь пороховий заряд, то повертаємось до кроку 2.

Крок 7. Імітація процесу руху снаряду по каналу ствола відбувається у відповідності з основами методу кінцево-різницевих елементів який прийнятий для постійного елементу маса, що представлено на кроках від другого до п’ятого. Запропонований метод розв’язання задачі переміщення снаряду з врахуванням теплофізичних і термодинамічних параметрів, не розглядає моделювання виходу газу в заснарядний простір. Час зупинення розрахунку визначається станом досягнення артилерійським снарядом дульного зрізу.

У процесі розрахунку для кожного елементу W_i газу (рис. 2.1) із рівняння стану може бути визначена поточна температура і тиск, що докорінно змінює можливості подальшого аналізу.

2.5. Результати моделювання розподілу температури.

Запропонований метод розв'язання задачі дав можливість отримати результати, що характеризують розподіл температури ПГ в процесі пострілу для одновимірної моделі по довжині ствола гармати. Результати розв'язку задачі отримано для усереднених величин, що показано в (табл. 2.3). Модельний експеримент було організовано таким чином, щоб забезпечити значення усереднених величин з прийнятою похибкою розрахунку.

Модельний експеримент визначив величину кінцево-різницевого елементу, що еквівалентний спалюванні 0.5 кг НЦ пороху при умові нерухомості снаряду, що підтвердило можливість досягти тиск біля $3.0 \cdot 10^7$ Па, що відповідає тиску форсування. Процес спалювання залишкового 10.5 кг заряду розбитий на 35 кроків по $\Delta m = m_i = 0.3$ кг. Шляхом підбору величини виразу в дужках (2.11) отримані значення V =633.5 м/с і V=774.5 м/с, близькі до контрольних даних (табл. 2.3). При цьому прийнято $u_0 \cdot F = 8.65 \cdot 10^{-8}$ м^3/с. Отримавши в процесі розрахунку значення опорних величин, близьких до заданих, можна припустити, що і розрахований розподіл температури ПГ в заснарядному просторі адекватно відбиває реальну тривалість процесу.

Таблиця 2.3 − Контрольні значення для модельного експерименту

Найменування	**Позначення**	**Значення**
Тиск форсування	P_f, Па	$3*10^7$
Швидкість снаряда (для зменшеного заряду)	V, м/с	775
Швидкість снаряда в момент закінчення горіння пороху ($\tilde{V}=0.8*V$)	$\tilde{V}$, м/с	620

За вихідними даними з табл.2.2 та табл.2.3 у табл. 2.4 наведено результати модельного експерименту.

Таблиця 2.4 − Результати модельного експерименту для зменшеного заряду свіжого пороху

$L_{ст}$, м	$P_{пг}$, МПа	T_1, К	T_2, К	T_3, К	$V_{сн}$, м/с
0,05		2131	2125	1277	
0,20		2203	2008	1185	
0,40		2255	1864	1136	
0,60		2370	1735	1091	
0,80	33	2691	1620	1049	16
1,00	241	3359	1520	1009	99
1,20	250	4517	1434	973	167
1,40	229		1363	940	224
1,60	203		1306	909	274
1,80	188		1263	882	318
2,00	174		1235	858	357
2,20	162		1222	836	393
2,40	150		1222	818	425
2,60	139		1237	803	455
2,80	129		1267	790	483
3,00	119		1311	781	509
3,20	111		1369	775	533
3,40	103		1407	772	555
3,60	95		1484	771	577
3,80	88		1565	774	597
4,00	82		1721	780	616
4,20	76		2032	789	634
4,40	70		2456	800	652
4,60	65			815	668
4,80	60			833	684
5,00	56			854	695
5,20	52			878	704
5,40	48			904	718
5,60	45			934	723
5,80	41			967	734
6,00	38			1003	743
6,20	35			1042	753
6,40	33			1084	763
6,80	28			1287	781
7,20	24				797

В результаті проведеного розрахункового експерименту отримано зміну тиску в МПа по довжині каналу ствола $L_{ст}$, м у процесі руху снаряда $P_{пг}$, і розподіл температури в градусах за шкалою Кельвіна (К) в зарядному просторі при різному положенні снаряда при його русі у каналі ствола. T_1, в момент максимального тиску в просторі за снарядом, T_2, в момент часу перетворення всієї бризантної речовини на пороховий газ, T_3, при знаходженні носика снаряда біля дульного зрізу. Температурна межа реакції Будуара-Белла $T_{ББ}$ = 1280К.

Величина тиску $P_{пг}$ в табл.2.4 відображається для точки, прив'язаної до дна снаряда, що пояснює положення початкової точки таблиці. Величини температур відображаються для точок, прив'язаних до відповідних частин ПГ. Усі частини мають однакову масу по 0.3 кг. Але за різних тисків ці частини мають різну довжину. Швидкість руху снаряда в каналі ствола $V_{сн}$, *м/с*, отримана при моделюванні, наведена для можливості оцінки часових інтервалів процесів, що відбуваються.

Аналіз результатів модельного експерименту продемонстрував, що до закінчення перетворення пороху в газ горіння порохового заряду значення температур T_1, T_2 , відсутні умови для протікання реакції Будуара-Белла. Температура ПГ протягом усього заснарядного простору вища межі її початку. Далі при розширенні газу при температурі T_3 виявлено умови утворення сажі. Комп'ютерний експеримент показав, що такі температури було отримано при моделюванні системи «снаряд-зарядна комора». Температура найбільший проміжок часу у середній частині є нижчою тому саме тут може утворюватися конденсована фаза у вигляді сажі.

Для моделювання впливу деградації НЦ пороху на фізичні і хімічні величини при пострілі проведено розрахунковий експеримент для НЦ пороху з тією ж брутто-формулою, але за зменшеною енергетичною ємністю, отримані результати показано в табл. 2.5.

Таблиця 2.5. − Результати модельного експерименту для зменшеного заряду пороху, що деградував

$L_{ст}$, м	$P_{пг}$, МПа	T_1, К	T_2, К	T_3, К	$V_{сн}$, м/с
0,05		1928	1906	1104	
0,20		1895	1776	1068	
0,40		1920	1629	1022	
0,60		2088	1508	978	
0,80	58	2336	1410	938	14
1,00	222	2851	1329	900	93
1,20	221	3885	1263	865	158
1,40	208		1209	832	212
1,60	186		1165	802	259
1,80	168		1129	775	301
2,00	156		1099	750	338
2,20	145		1076	728	372
2,40	134		1060	709	403
2,60	125		1050	692	431
2,80	116		1048	678	457
3,00	107		1056	666	482
3,20	100		1075	658	505
3,40	93		1109	652	526
3,60	86		1161	648	546
3,80	80		1234	647	565
4,00	74		1333	649	584
4,20	69		1463	654	601
4,40	64		1629	661	617
4,60	59		1837	671	633
4,80	55			683	648
5,00	51			698	663
5,20	48			700	676
5,40	44			721	687
5,60	41			744	697
5,80	38			770	708
6,00	35			798	718
6,20	33			829	727
6,40	30			863	735
6,80	26			983	752
7,20	23			1204	768

У результаті характерні швидкості визначені як $\tilde{V}$=618.5 м/с і V=750 м/с. По відношенню до раніше розрахованих величин для свіжого пороху вони відрізняються лише на 2.5% – 3.5%, але температури зазнали суттєвих змін. Було зроблено висновок, що для такого випадку температура газів знаходиться нижче межі, реакції Будуара-Белла, що дає можливість утворення сажі.

Було отримано результати зміни температури газу для повного заряду маса НЦ пороху m=18.4 кг. Результати модельного експерименту наведено у табл. 2.6. Як контрольні для модельного експерименту прийнято величини швидкостей V=945 м/с і $\tilde{V}$=756 м/с. По результатам моделювання отримано значення V=944 м/с та $\tilde{V}$=780 м/с. Отримані результати продемонмтрували перевищення температури порохових газів на дні зарядної комори та дульному зрізі межу температури проходження реакції Будуара-Белла. Вперше отримано результат який доводить, що на початку та кінці процесу викиду газів дульного викиду має бути відсутня сажова складова після початку руху снаряду в оточуючий атмосфері.

Запропонована модель та метод розрахунку процесів внутрішньої балістики реалізовані з використанням суттєвих припущень. Проте отримані результати дають підстави для виявлення зв'язку між параметрами процесу розширення ПГ в стволі і характером дульного спалаху [9, 10].

По результатам викладеного матеріалу другого розділу можна констатувати, що удосконалено імітаційну модель розподіленого утворення порохових газів, у тому числі сажі, при їх розширенні в стані пострілу артилерійської гармати, що дало можливість розробити метод визначення зміни їх температури по довжині стволу з встановленням граничної кількості сажі, як додаткової діагностичної ознаки, необхідної для визначення ефективного пострілу. В основу розрахунків покладено метод кінцево-різницевих елементів, де елементом розглядається постійна маса НЦ пороху що утворює порохові гази.

Таблиця 2.6 – Результати модельного експерименту для повного заряду свіжого пороху

$L_{ст}$, м	$P_{пг}$, МПа	T_1, К	T_2, К	T_3, К	$V_{сн}$, м/с
0,05		2047	2113	1367	
0,20		2059	2006	1318	
0,40		2165	1874	1292	
0,60		2223	1755	1265	
0,80	31	2574	1649	1236	20
1,00	397	3104	1555	1208	120
1,20	388	3814	1475	1178	201
1,40	367		1407	1149	270
1,60	325		1352	1120	330
1,80	299		1309	1092	382
2,00	280		1280	1064	429
2,20	263		1263	1038	472
2,40	246		1259	1013	511
2,60	231		1267	989	547
2,80	216		1289	968	580
3,00	203		1323	948	611
3,20	190		1370	932	639
3,40	178		1429	918	667
3,60	167		1432	907	692
3,80	156		1509	899	716
4,00	147		1667	896	739
4,20	137		1801	896	761
4,40	129		2132	900	782
4,60	121		2457	909	802
4,80	113			923	821
5,00	106			941	839
5,20	99			965	856
5,40	93			995	869
5,60	87			1031	882
5,80	82			1073	893
6,00	77			1121	904
6,20	72			1164	915
6,40	67			1216	927
6,80	59			1353	950
7,20	52			1601	972

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ Й МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ БОЙОВИМ ЗАСТОСУВАННЯМ АРТИЛЕРІЙСЬКОЇ УСТАНОВКИ

Атакуюча сторона має початкову інформацію про координати цілей протиборчої сторони, проводить повну підготовку і першої відкриває вогонь. Протиборча сторона вже після першого атакуючого пострілу визначить приблизне місце розташування артилерійських установок, що ведуть вогонь, в міру збільшення кількості пострілів визначає координати установок які ведуть вогонь на враження і з достатньою точністю відкриє вогонь у відповідь. У якийсь момент часу, після низки пострілів атакуюча сторона може перемістити артилерійські установки на нову вогневу позицію, щоб уникнути вогню у відповідь і не втратити боєздатність. Перемістившись на нову вогневу позицію, артилерійський підрозділ, що атакує, здійснює один залп по цілях протиборчої сторони без втрати боєздатності, тому що нова вогнева позиція протиборчій стороні не відома, такий стан закінчується після першого залпу з нової вогневої позиції [2, 103, 104].

Для розв’язання завдання дисертаційного дослідження в удосконаленні методу і моделі ефективного керуванням бойовою роботою артилерійським підрозділом при ураженні цілі за умовою зміни огневої позиції для забезпечення мінімальної втрати боєздатності та найкращого часу [105, 5].

Необхідно:

– сформувати узагальнений критерій оцінки бойового застосування артилерійського підрозділу при збуреннях;

– адаптувати стохастичне імітаційне моделювання на базі Марківського моделювання бойовим застосуванням артилерійського підрозділу за наявності збурень;

– удосконалити стохастичну імітаційну модель для забезпечення розрахунку поточного стану боєздатності при керуванням бойовим застосуванням артилерійської установки;

– удосконалити метод пошуку формування станів боєздатності при умові виконанні протиборчою стороною вогню на враження на поточну вогневу позицію артилерійського підрозділу і при її зміні на іншу.

3.1 Загальні положення про ефективний постріл.

В основу дослідження покладено припущення що основними кількісними параметрами, що визначають боєздатність артилерійської установки, є: швидкість снаряда при виході з ствола, швидкість транспортування установки з однієї вогневої позиції на іншу, енергетична характеристика артилерійського заряду — сила пороху. Якщо початкова швидкість таблична, швидкість транспортування артилерійської установки відповідає регламентним значенням і сила пороху в заряді відповідає при верифікації його марці така установка є боєздатною [6, 7, 8].

Для розв’язання задачі по удосконаленню методу і моделі керування бойовим завданням артилерійської установки було прийнято такі спрощення. Регулярні помилки стрільби пов'язані з топологічними особливостями поточної вогневої позиції і доріг зміни однієї позиції на іншу. Місце розташування цілі та метеорологічні дані враховані на етапі підготовки стрільби. Розглядається лише зміна властивостей які впливають на боєздатність при початковій швидкості снаряду, швидкості транспортування установки та сили пороху в заряді [9, 10, 11].

Для аналізу стрільби гарматою було залучено де які положення сучасної теорії прийняття рішень [106, 107].

Було застосовано поняття критерію ефективності через розрахунок згортки показників. Показники було віднормовано до максимального його значення.

Показник точності

$$Crit_{accuracy} = \frac{CEP_{fire}}{CEP_D}, \quad (3.1)$$

показник виконання

$$Crit_{time} = \frac{time_{fire}}{time_{fire}^{limit}}, \quad (3.2)$$

показник витрати снарядів

$$Crit_{project} = \frac{n_{shoot}^{non_eff}}{n_{shoot}^{total}}, \quad (3.3)$$

де: CEP_{fire} – серединна кругова похибка стрільби, CEP_D – серединна кругова похибка стрільби для дальності D, $time_{fire}$ – час вогню АП для ураження цілі, $time_{fire}^{limit}$ – граничний час вогню на даній позиції, $n_{shoot}^{non_eff}$ – кількість неефективних пострілів, n_{shoot}^{total}– загальна кількість зроблених пострілів.

Для гармат калібром вище ніж 122 мм $CEP_D \approx 1\ \%D$ [108]. З практики значення такого показника не менше 0,75 [109]. В реальних умовах він має становити 0,6–0,7 від повного часу стрільби [8, 110].

Тому показники було згорнуто в критерій з відстанню від ідеальної точки за нормою L_2:

$$Crit_0^{ideal_point} = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{(Crit_i - Crit_i^{ideal_point})^2}, \ i = \overline{1,n}, \quad (3.4)$$

де $Crit_i^{ideal_point}$ – значення частинних показників у ідеальній точці в n-вимірному просторі, в якій показники досягають мінімуму.

Неефективним є постріл, швидкість якого відповідає умові: $v_0<0{,}95v_{table_fire}$. Ефективним є постріл, при якому артелирійський снаряд потрапляє в коло радіусу R=1 % D з імовірністю не менше 0,5 [11].

3.2 Моделювання бойової роботи артилерійських установок

В роботі прийнято, що основним критерієм, який характеризує бойову роботу артилерійського підрозділу є «боєздатність». На втрату боєздатності суттєво впливають будь-які дії навколишніх систем протиборчого виду [12, 13, 14].

Ступінь опору артилерійської установки впливам із боку протиборчих систем можна умовно назвати «боєздатністю». Боєздатність артилерійської установки відносний показник який погіршується від 1 до 0 і характеризує в поточному стані виконувати бойового завдання з ефективністю не гірше як задана [12].

«Боєздатність» артилерійської установки означає не тільки її опір механічним навантаженням, вібраціям, ударам, тиску, прискоренню, навантаженню, електричній міцності, вологостійкості, стійкості до корозії та випромінюванню, а й протидії впливу протиборчої сторони по її знищенню. На практиці генеральну сукупність елементів, з яких складається артилерійська установка, піддають суттєвому навантаженню і визначають кількість елементів, котрі вийшли з ладу протягом заданого періоду роботи. У результаті отримують інтенсивності відмов елементів для заданого рівня навантаження. [15, 16].

Потім по одному змінюють деякі параметри та повторюють весь експеримент у нових умовах. При цьому отримують інформацію про характер зміни інтенсивності відмов аналізованих елементів, а також від масштабу навантаження. Таким чином, інтенсивність відмов може замінити міру боєздатності [57].

Математична модель боєздатності артилерійської установки може бути представлено наступним чином. У військовій практиці оцінку боєздатності артилерійської батареї прийнято визначати двома ймовірнісними складовими [53, 111]: виникненням раптових відмов та відмов через зношеність. Раптові відмови моделюються експоненціальним законом, у якому боєздатність представляється як безвідмовна робота і визначається як:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

де λ — інтенсивність раптових відмов які впливають на початкову швидкість снаряду при виході з дульного зрізу ствола, швидкість транспортування установки з однієї вогневої позиції на іншу, енергетичну характеристику артилерійського заряду — силу пороху.

У загальному випадку:

$$\lambda = -\frac{1}{P(t)}\frac{dP(t)}{dt}$$

Також для будь-якого закону розподілу істотним є вираз:

$$\lambda = \frac{f(t)}{P(t)} \tag{3.5}$$

де $f(t) = -\frac{dP(t)}{dt}$ — частота ймовірності відмов.

За нормальної бойовою роботою для експоненціального закону інтенсивність відмов є постійною величиною. При втраті боєздатності інтенсивність відмов починає зростати і до раптових відмов додаються відмови через втрату боєздатності, що в технічній практиці моделюються нормальним законом розподілу

$$P_{\text{и}}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t}^{\infty} e^{-(t-M)^2/2\sigma^2} dt$$

де M — середнє значення боєздатності.

Стандартне відхилення від середньої боєздатності визначається так:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(t-M)^2}{N}}$$

де N — число відмов за час t.

Спільна ймовірність боєздатності артилерійської установки з урахуванням раптових відмов та відмов через втрату боєздатності у період від $t_0 = 0$, до часу t визначається виразом:

$$P(t) = e^{-\lambda t} P_{\text{и}}(t)$$

Якщо артилерійська установка частково втратила боєздатність, то спільна можливість визначається як:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \frac{P_{\text{и}}(t_0+t)}{P_{\text{и}}(t_0)} \qquad (3.6)$$

Хоча вираз (3.6) дозволяє боєздатність артилерійської установки в будь-який момент часу, в межах даного дослідження він має низку недоліків. Так, нерегламентна експлуатація технічної системи призводить до її форсованого зношення. Згідно з польовими спостереженням, інтенсивність відмов суттєво залежить від якості експлуатації артилерійської установки відповідно до її паспортних вимог [17, 18, 19].

Коли навантаження перевищує номінальне, спостерігається досить швидке зростання інтенсивності відмов. Більш того запропонований вираз не враховує стрибкоподібне зменшення боєздатності в разі влучення в установку

протиборчою стороною. З іншого боку, інтенсивність відмов зменшується, коли навантаження стає нижчим за номінальний рівень [112].

Оскільки описані фактори впливають насамперед на інтенсивність відмов, то для моделювання надійності використовують вираз:

$$P(t) = e^{-\int_T^{T+t} \lambda dt} = e^{-\lambda_в t + \int_T^{T+t} \lambda_и dt} \quad (3.7)$$

де: $\lambda_в$ —інтенсивність раптових відмов; $\lambda_и$ — інтенсивність відмов через втрату боєздатності.

Для визначення інтенсивності відмов через втрату боєздатності можна скористатися таким підходом. Із формули (3.5) у загальному випадку інтенсивність відмов визначається, як $\lambda = f(t)/P(t)$.

Розглянемо тепер таку ситуацію. В ході імітаційного моделювання боєздатність установки на черговій ітерації поточного часу роботи може бути збільшеною на деякий показник *Δt*, а потім за формулою (3.7) визначають значення поточної інтенсивності відмов через втрату боєздатності. Припустимо, що при поточній ітерації моделювання на артилерійську установку здійснили форсований вплив, що призвело до підвищеної втрати її боєздатності. Тоді для моделювання підвищеної втрати боєздатності достатньо додати до поточного часу установки додати величину Δt_u, що відповідає величині зменшення боєздатності системи. Залежність $P(t) = e^{-\lambda t}$ відповідає теоретичній моделі зміні в часі боєздатності для раптових відмов. Залежність $P(t) = P_и(T + t)/P_и(t)$ описує зміну боєздатності при проведені бойової роботи, але без руйнування протиборчою стороною [54].

3.3 Стохастична модель стрільби артилерійського підрозділу

Модель артилерійської батареї [21] може забезпечити пошук умов бойової роботи різних типів артилерійського озброєння від мінометів до важких самохідних установок за рахунок зміни параметрів налаштування. Модель представлена у вигляді неприведеного рекурентного ланцюга Маркова у

реалізації певних станів, тому для такого формалізму артилерійська батарея репрезентується як єдине ціле для порівняння систем озброєнь та алгоритмів бойової роботи. Рівняння простору станів можуть бути вирішені у вигляді границь розподілів, оскільки ланцюг Маркова неприведений і позитивно рекурентний. Результатом пошуку є інтервал часу, який артилерійська батарея проведе в стані, що забезпечує вогневу підтримку [21].

Логічна структура моделі бойової роботи артилерійської батареї побудована на засадах практичного досвіду. Щоразу, коли батарея займає нову вогневу позицію, вона для протиборчої сторони залишається непоміченою. Основним джерелом виявлення батареї є пасивний акустичний контрбатарейний радар. Фіксація радаром першого пострілу дозволяє визначити місцезнаходження батареї з раціональною похибкою та ймовірністю [11]. Чисельні значення ймовірності виявлення одиничного та багатьох залпів однакові. Імовірність виявлення залежить від кількості пострілів, зроблених до виявлення. Послідовність цілей різних типів підпорядковується однорідному пуассонівському розподілу. Артилерійська батарея здійснює встановлену кількість пострілів по кожному типу цілей [21]. Зміна вогневої позиції артилерійською батареєю відбувається після виконання заданої кількості пострілів для отримання інформації про виявлення. При наявній інформації про виявлення артилерійська батарея має високу ймовірність залишити вогневу позицію до атаки її протиборчою стороною. У разі переміщення між вогневими позиціями артилерійська батарея не може виконувати вогневі завдання. Під час атаки протиборчою стороною вогневої позиції артилерійська батарея зазнає втрат і бойових пошкоджень, внаслідок чого вона протягом певного часу або назавжди не здатна виконувати бойові завдання. Виходячи з вищезазначеного, рекурентний ланцюг Маркова для артилерійської батареї має такі стани, які в різній мірі зменшують її поточну боєздатність при подіях які виникають [11, 21]:

— на вогневій позиції веде вогневу підтримку, здійснила певну кількість залпів з поточної позиції, але не була виявлена протиборчою стороною;

— на вогневій позиції веде вогневу підтримку, здійснила певну кількість залпів з поточної позиції, виявлена протиборчою стороною, але не має цієї інформації;

— на вогневій позиції не веде вогневу підтримку, виявлена протиборчою стороною, має таку інформацію та готується залишити вогневу позицію;

— під час руху на нову вогневу позицію не веде вогневої підтримки;

— не може вести вогневу підтримку на деякий час через закінчення боєкомплекту або назавжди через втрату боєздатності.

Прийняті вихідні дані для моделювання виконання бойової задачі: кількість цілей, швидкість виявлення цілей, кількість пострілів для ураження цілі, ймовірність виявлення батареї під час стрільби, середній час бойової роботи до нападу протиборчою стороною на батарею після виявлення, швидкість відновлення батареї після атаки, швидкість переміщення батареї між вогневими позиціями, ймовірність того, що батарея буде атакована під час руху, швидкість визначення протиборчою стороною початку бойової роботи батареї, швидкість виходу з вогневої позиції після ухвалення рішення про її зміну [21].

Розглянемо процес зміни бойового застосування артилерійської батареї у вигляді графу рис. 3.1. Кожна з його вершин відповідає поточному стану батареї, а ребра – описують переходи з одного стану до наступного.

Так, початковий стан S_0 відповідає готовності до бойового застосування батареї з n гармат одночасного бойового застосування, якщо кількість гармат менша. Наступі стани S_i описують виконання пострілу одночасно усіма i гарматами $(i = \overline{1,n})$. Вага ребра l_{ij} представлена як p_{ij} – імовірність переходу Марківського процесу із стану S_i у стан S_j. $(i,j = \overline{0,n})$.

У зв’язку з тим, що стани мають випадковий характер, то цей процес можна вважати Марківським. Стохастична модель для автоматизованого

керування враховує збурення. Характерним збуренням є різниця між поточною і початковою швидкостями снаряда Δv_0, що обумовлено зношеності зарядної комори $\Delta v_0^{\lambda_chamb}$, зношеності ствола гармати Δv_0^{barrel} і невизначеності енергетичної спроможності заряду – Δv_0^{charge}. Як що одночасно присутні всі три прояви вказаного збурення то ефективність пострілу можна вважати нескінченно малою величиною.

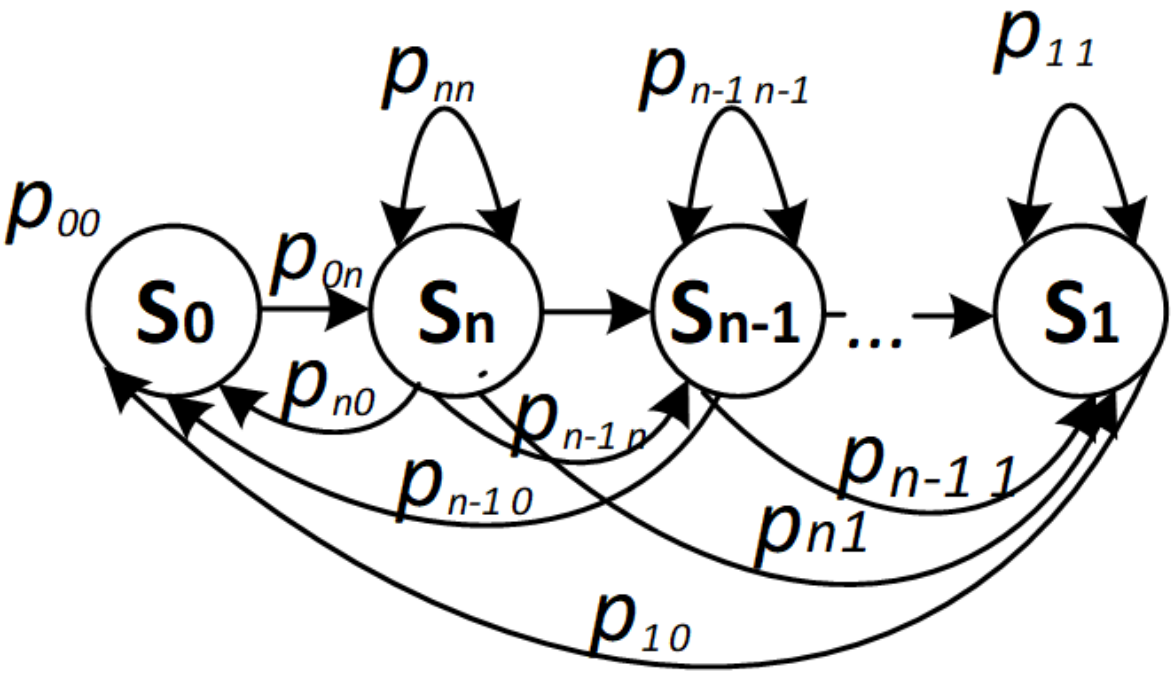


Рис. 3.1. Марківський граф станів та перехідних імовірностей

Так як прояви збурення мають випадковий характер, то розглянемо ймовірність відсутності впливу відповідного прояву на збурення:

$$p_1 = p(\Delta v_0^{\lambda_chamb}),\ p_2 = p(\Delta v_0^{barrel})\ \text{и}\ p_3 = p(\Delta v_0^{charge}).$$

Тоді, ймовірність впливу відповідного прояву на збурення може бути представлено як

$$q_1 = 1 - p(\Delta v_0^{\lambda_chamb}),\ q_2 = 1 - p(\Delta v_0^{barrel})\ \text{і}\ q_3 = 1 - p(\Delta v_0^{charge}).$$

Таким чином матриця переходу з одного стану до іншого відповідно до Марківського моделювання має вигляд:

$$\boldsymbol{P} = \begin{Vmatrix} 0 & p_{0n} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ p_{n\,0} & p_{n\,n} & p_{n\,n-1} & p_{n\,n-2} & \dots & p_{n\,1} \\ p_{n-1\,0} & 0 & p_{n-1\,n-1} & p_{n-1\,n-2} & \dots & p_{n-1\,1} \\ p_{n-2\,0} & 0 & 0 & p_{n-2\,n-2} & \dots & p_{n-2\,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{1\,0} & 0 & 0 & 0 & \dots & p_{n\,1} \end{Vmatrix} \quad (3.8)$$

Метою Марківської моделі є розрахунок кількості пострілів, при яких ймовірність влучення не менше заданої величини.

Розглянемо заповнення матриці переходів. Перший рядок містить один ненульовий елемент $p_{0n} = 1$, тобто вважаємо, що вихід с початкового стану до стану *Sn* відбувається тільки за умовою, що всі *n* гармат готові до бойового застосування.

Розрахунок всіх інших елементів розглянемо на прикладі елементів і - го рядка:

для $i = 1 \dots n$

$$p_{i0} = 1 - \sum_{j=1}^{n} p_{ij} \quad (3.9)$$

$$p_{ij} = \begin{cases} C_i^j p^j q^{i-j}, & \text{якщо } j \le i \\ 0, & \text{якщо } j > i \end{cases},$$

де p – імовірність здійснення ефективного пострілу.

Сума елементів кожного рядка дорівнює одиниці, тому виконується умова стохастичності матриці.

Таким чином процес керування відбувається як послідовність можливостей виконання ефективного пострілу будь-якою кількістю установок. В разі, якщо при поточній кількості установок виникає неефективний постріл в будь-який установці, то вона виводиться з процесу виконання завдання. А завдання продовжують виконувати артилерійські установки в меншій кількості. Можливий стан, коли всі установки будуть виконувати неефективні постріли, тоді за умовою задача не може бути виконана.

За допомогою описаної моделі (3.9) виникає можливість розрахувати ймовірність ефективних пострілів після M циклів бойового застосування батареї:

$$\boldsymbol{P}_M = (\boldsymbol{P_0})^{\boldsymbol{M}}, \tag{3.10}$$

де P_0 – матриця перехідних імовірностей після першого циклу стрільби.

За кількість ефективних пострілів можна взяти математичне сподівання випадкової величини кількості гармат, що здійснюють ефективний постріл:

$$\boldsymbol{sv}_i = \left[sv_j = 1, j = i; sv_j = 0, j \neq i; j = \overline{1,n}\right]^{\mathrm{T}}, \tag{3.11}$$

Розглянемо приклад використання Марківської моделі для оцінки результатів бойового застосування батареєю в кількості 6 гармат. ймовірність здійснення ефективного пострілу складає відповідно: p_1=0,95 –з відсутністю збурення у вигляді зношеності зарядної камори; p_2=0,95 –з відсутністю збурення у вигляді зношеності ствола; p_3=0,9 –з відсутністю збурення як невизначеності заряду. Тоді ймовірність ефективного пострілу у разі відсутності всіх трьох видів збурень $p=p_1p_2p_3$=0,81225.

В таблиці 3.1. представлені результати розрахунків матриці переходів з одного стану до іншого відповідно до Марківського моделювання (3.9).

Таблиця 3.1 − Матриця перехідних імовірностей

Стан	S_0	S_6	S_5	S_4	S_3	S_2	S_1
S_0	0	1	0	0	0	0	0
S_6	0,00004	0,28717	0,39827	0,23015	0,07093	0,01230	0,00114
S_5	0,00023	0	0,35355	0,40861	0,18890	0,04366	0,00505
S_4	0,00124	0	0	0,43527	0,40245	0,13954	0,02150
S_3	0,43651	0	0	0	0,40245	0,13954	0,02150
S_2	0,03525	0	0	0	0	0,65975	0,30500
S_1	0,96475	0	0	0	0	0	0,03525

3.4 Модель бойового застосування артилерійської установки.

Розробимо модель задачі керуванням бойовою роботою артилерійської установки в наступній постановці. Артилерійська установка АУ1 повинна виконати бойове завдання, яке полягає в знищенні стаціонарної цілі n снарядами при повній підготовці стрільби з можливістю зміни вогневої позиції.

Для розв’язання поставленої задачі введемо припущення для моделювання. Приймемо наявність вогневих позицій і пострілів n, необхідних для ураження цілі. Крім того, мінімальна кількість пострілів з вогневої позиції дорівнює одиниці, тобто на поточній позиції необхідно виконати хоча б один постріл. Зміна позиції не передбачає повернення на попередні. Переїзд з одної позиції на іншу суміжну позицію відбуваються послідовно по одній з s доріг різної якості покриття та різної вірогідністю ураження протиборчою стороною. При виконанні бойового завдання артилерійською установкою АУ1 приймається неможливість переміщення АУ2 та її враження [19, 20, 21].

Задаємо початкове значення стану боєздатності артилерійської установки АУ1 $Kmch$. Математична модель складено таким чином, що би визначати поточне значення боєздатності артилерійської установки, при врахуванні її втрати за рахунок нанесення вогневого враження по артилерійській установці протиборчою стороною і її переміщенні з однією позиції на іншу для подальшого виконання задачі знищення цілі [8].

Для врахування динаміки системи артилерійські установки АУ1 та АУ2 розглядається в наступних процесах дій (А, В та С). Для АУ1, А − на вогневій позиції: (А1 − перехід з маршового стану в бойовий; А2 − бойова робота АУ1 по цілі; А3 − перехід з бойового стану на вогньовій позиції в маршовий. В − Зміна позиції. Для АУ2, С − на вогневій позиції: (С1 − бойова робота АУ2 по стаціонарній цілі АУ1 після її першого пострілу до кінця переходу з бойового стану на вогньовій позиції в маршовий; С2 − бойова робота АУ2 по рухомій цілі АУ1 при зміні її вогневої позиції).

Події, що розглядаються та відбуваються в часі:

− подія А1 характеризується інтервалом часу переходу АУ1 з маршового стану в бойовий стан на вогньовій позиції $t_{\text{мб}}$;

− подія А2 характеризується інтервалом часу роботи АУ1 по цілі на вогньовій позиції на один постріл $t_{\text{АУ1}}$, в разі кількох пострілів загальний час збільшується;

− подія А3 характеризується інтервалом часу переходу АУ1 з бойового стану на вогньовій позиції в маршовий стан $t_{\text{бм}}$;

− подія В характеризується інтервалом часу маршу при зміні вогневої позиції на іншу $t_{\text{м}}^{j}$ по j-ій $(j = 1 \ldots s)$ дорозі.

− подія С1 характеризується інтервалом часу роботи АУ2 по цілі на вогньовій позиції на один постріл $t_{\text{АУ2}}$ та часом польоту снаряда з вогневої позиції в стаціонарну ціль $t_{\text{ст}}$.

– подія С2 характеризується сумарним інтервалом часу $t_{\text{м}}^{j}$ по j-ій $(j = 1\ldots s)$ дорозі та інтервалом часу переходу АУ1 з маршового стану на вогньовій позиції в бойовий стан $t_{\text{бм}}$.

На поточний стан боєздатності артилерійської установки АУ1 впливають всі події, які його зменшують.

Вплив події А2 на зміну боєздатності АУ1 характеризується величиною зменшення боєздатності за рахунок зносу стволу $k_i^{\text{ств}}$ на вогневій позиції за один постріл та величиною зменшення боєздатності за рахунок зносу ходової частини АУ1 $k_i^{\text{ход}}$ за один постріл.

Вплив події В на зміну боєздатності АУ1 при транспортуванні j-ою дорогою $(j = 1..s)$ характеризується величиною зменшення боєздатності за рахунок зносу стволу $k_{\text{ств_тр}}^{j}$ та величиною зменшення боєздатності за рахунок зносу ходової частини $k_{\text{ход_тр}}^{j}$.

Вплив події С1 на зміну боєздатності артилерійської установки АУ1 характеризується величиною зменшення боєздатності $k_{\text{вс}}$ за рахунок влучення снарядів з АУ2 в АУ1 в залежності від кількості снарядів d, випущених з АУ2 по АУ1 для припинення стрільби по цілі:

$$k_{\text{вс}} = \sum_{j=1}^{d} \frac{1}{j(j+1)},$$

Кількість снарядів d розраховується за виразом при умові, що АУ1 здійснює a_i пострілів по цілі при виконанні бойової роботи на i-ій позиції $(i = 1..n)$:

$$d = INT\left(\frac{a_i \cdot t_{\text{АУ1}} + t_{\text{бм}} - (t_{\text{АУ1}} + t_{\text{ст}})}{t_{\text{АУ2}} + t_{\text{ст}}}\right),$$

де $INT()$ – виділення цілої частини отриманого дійсного числа.

Вплив події С2 на зміну боєздатності артилерійської установки АУ1 характеризується величиною зменшення боєздатності $k^{j}_{\text{м_тр}}$ за рахунок зносу установки при вогневому впливі противника при транспортуванні j-ою дорогою $(j = 1..s)$.

Таким чином значення боєздатності АУ1 PA_i після бойової роботи на i -ій позиції $(i = 1..n)$, розраховується за формулою:

$$PA_i = PB_{i-1} - \left(k_{\text{вс}} + k_{\text{ств}} \cdot t_{\text{АУ1}} \cdot a_i + k_{\text{ход}} \cdot t_{\text{АУ1}} \cdot a_i\right)$$

де PB_{i-1} – боєздатності АУ1 після зміни позиції $i-1$ на позицію i, за умовою $PB_0 = Kmch$.

Зменшення боєздатності АУ1 при зміни позиції i на позицію $i+1$ $(i = 1..n-1)$ розраховується за формулою:

$$PB_i = PA_i - \left(k^{j}_{\text{ств}_{\text{тр}}} + k^{j}_{\text{ход}_{\text{тр}}} + k^{j}_{\text{м}_{\text{тр}}}\right).$$

Боєздатність артилерійської установки АУ1 після виконання бойового завдання n пострілами при умові, що останній n – ий постріл виконано на позиції k $(k \le n)$ дорівнює PA_i.

3.5. Метод пошуку рішення виконання бойової задачі атакуючої сторони

Для розробки розрахункового методу пошуку рішення про стан виконання бойової задачі артилерійською установкою атакуючої сторони при умові виконанні протиборчою артилерійською установкою вогню на враження на поточну вогневу позицію артилерійського підрозділу і при її зміні на іншу ведемо визначення вхідних даних.

Визначаємо масив $a[1 \dots n]$, елемент $a(i)$ якого дорівнює кількості пострілів на i -ій поточній вогневій позиції. Визначаємо масив $b[1 \dots n-1]$, елемент $b(j)$ якого дорівнює однієї з трьох доріг при зміні j -ій вогневої позиції на наступну.

Поточною ***структурою*** виконання завдання будемо називати послідовність кількості пострілів на кожної з вогневих позицій та номерів доріг, по яким відбувається зміна позицій: $a(1)\ b(1)\ a(2)\ b(2) \dots\ a(n)$.

Задаємо початкове значення стану боєздатності артилерійської установки АУ1 $Kmch = 0{,}965$. В таблиці 3.2 значення часу виконання відповідних дій при виконанні завдання АУ1 на вогневій позиції. В таблиці 3.3 наведено значення параметрів впливу на боєздатність установки при зміні позицій в залежності від обраної дороги.

Таблиця 3.2 − Інтервали часу виконання відповідних дій при виконанні завдання АУ1 на вогневій позиції та протидії протиборчої сторони

Час для	Вогнева позиція (стрільба)
переходу з маршового стану в бойовий на вогньовій позиції $t_{\text{мб}}$	5 хв.
роботи АУ1 по цілі на вогньовій позиції на один постріл $t_{\text{АУ1}}$	15 сек
роботи АУ2 на вогньовій позиції по АУ1 на один постріл $t_{\text{АУ2}}$	20 сек
переходу з бойового стану на вогньовій позиції в маршовий $t_{\text{бм}}$	2 хв.
польоту снаряду на відстань з вогневої позиції в ціль визначає початок вогневої дії протиборчої сторони при стаціонарній цілі $t_{\text{ст}}$	35 сек 12 000 м

Запропонований метод розрахунку моделі бойового застосування артилерійської установки включає загальний алгоритм розрахунку і спеціалізовані алгоритми. Спеціалізований алгоритм “Позиції” визначає

поточну кількість снарядів, що використовуються на кожній з позицій. Спеціалізований алгоритм “Зміна позиції” визначає послідовність номерів доріг, використаних при зміні позицій з одної на іншу. Спеціалізований алгоритм “Боєздатність” визначає кінцеву боєздатність АУ1 при виконанні бойового завдання при поточній структурі. Спеціалізований алгоритм “Час” визначає сумарний час при виконання бойового завдання при поточній структурі.

Таблиця 3.3 − Параметри впливу на боєздатність установки при зміні позицій

Параметри впливу на боєздатність установки та загальний час її роботи в залежності від обраної дороги переміщення між позиціями	Номер дороги (j)		
	№ 1	№ 2	№ 3
Час маршу при зміні вогневої позиції на іншу $t_m(j), c.$	180	720	1440
Величина зменшення боєздатності АУ1 за рахунок зносу стволу при транспортуванні $k_{\text{ств_тр}}(j)$	0,000025	0,000055	0,000075
Величина зменшення боєздатності АУ1 за рахунок зносу ходової частини при транспортуванні $k_{\text{ход_тр}}(j)$	0,00074	0,00094	0,0024
Величина зменшення боєздатності АУ1 за рахунок зносу установки при вогневому впливі противника при транспортуванні $k_{\text{м_тр}}(j)$	0,000055	0,00003	0,000015

Загальний алгоритм розрахунку по наведеним в Табл. 3.2 та Табл. 3.3 вхідним даним визначає поточну структуру виконання завдання: $a(1)\ b(1)\ \ a(2)\ b(2)\ \ldots\ a(n)\ b(n)$ та розраховує кінцеве значення боєздатності артилерійської установки, при врахуванні її втрати за рахунок нанесення вогневого враження по артилерійській установці протиборчою стороною і її

переміщенні з однією позиції на іншу для подальшого виконання задачі знищення цілі. Загальний алгоритм представлено наступними кроками.

Крок 1. Задаємо а $(1) = \cdots$ а $(n) = 1$, тобто, коли відбувається по одному пострілу на кожній з позиції та $k = n$ (далі *k* - номер останньої позиції).

Крок 2. Задаємо початкові значення змінних. Максимальне значення боєздатності всіх можливих *структур* $Pmax = 0$, мінімальне значення боєздатності всіх можливих *структур* $Pmin = 1$, максимальний час загальної роботи Tmax =0, та мінімальний час загальної роботи $Tmin = 10^{10}$.

Крок 3. Задаємо $b(1) = \cdots b(k-1) = 1$, тобто, коли зміни позиції відбуваються по дорозі № 1.

Крок 4. За алгоритмом "Боєздатність" для поточної *структури* обчислюємо кінцеву боєздатність АУ1.

Крок 5. За алгоритмом "Час" обчислюємо для поточної структури загальний час виконання АУ1 бойового завдання.

Крок 6. Порівнюємо отримані значення боєздатності $PA(k)$ артилерійської установки АУ1 при поточній структурі її роботи з поточними значеннями $Pmax$, $Pmin$ та загальний час роботи АУ1 T на позиціях та зміни позицій для поточної структури з поточними значеннями $Tmax, Tmin$ та у випадку кращих значень робимо переприсвоєння на поточні значення та зберігаємо в масивах відповідні структури $aPmax\,[1 \ldots n]$, $aPmin\,[1 \ldots n]$, $aPmax\,[1 \ldots n]$, $aPmin\,[1 \ldots n]$, $aTmax\,[1 \ldots n]$, $aTmin\,[1 \ldots n]$, $aTmax\,[1 \ldots n]$, $aTmin\,[1 \ldots n]$.

Крок 7. Поки всі $b\,(i) \neq 3$ $(i = 1 \ldots k-1)$ за алгоритмом "Зміна позиції" формуємо наступну *структуру* за рахунок зміни елементів масиву b та переходимо на *Крок 4*. Інакше переходимо на наступний крок

Крок 8. Якщо $a\,(1) \neq n$ то за алгоритмом "Позиції" формуємо наступну *структуру* та переходимо на крок 3. Інакше переходимо на наступний крок.

Крок 9. За алгоритмом “Боєздатність” обчислюємо кінцеву боєздатність поточної *структури*.

Крок 10. За алгоритмом “Час” обчислюємо загальний час роботи АУ1 на позиціях та час на зміну між позиції для поточної *структури*.

Крок 11. Порівнюємо отримані значення боєздатності $PA(k)$ артилерійської установки АУ1 при поточній структурі її роботи з поточними значеннями $Pmax$, $Pmin$ та загальний час роботи АУ1 T на позиціях та час на зміну між позиції для поточної структури з поточними значеннями $Tmax$, $Tmin$ та у випадку кращих значень робимо переприсвоєння на поточні значення та зберігаємо в масивах відповідні структури $aPmax\ [1 \dots n]$, $aPmin\ [1 \dots n]$, $aPmax\ [1 \dots n]$, $aPmin\ [1 \dots n]$, $aTmax\ [1 \dots n]$, $aTmin\ [1 \dots n]$, $aTmax\ [1 \dots n]$, $aTmin\ [1 \dots n]$.

Крок 12. Виводимо результати обчислень. Алгоритм закінчено.

Алгоритм **“Позиції”** отримує вхідні дані у вигляді масиву значень $a\ [1 \dots k]$ з загального алгоритму.

Крок 1. Знаходимо *m* - номер останнього ненульового елементу масиву *a* поточної структури виконання завдання.

Крок 2. Змінюємо значення елементу масиву поточної структури

$a\ (m-1) = a\ (m-1) + 1.$

Крок 3. Якщо $a\ (m) = 1,$ то a $(m) = 0$, інакше, якщо a $(m) = n - m,$ то поки $\sum_{j=1}^{m+i} a(j) \le n$ всім елементам від $a\ (m+1)$ до $a\ (m+i)$ присвоюється значення 1; інакше $a\ (m) =$ a $(m) - 1.$

Крок 4. Повертаємо нові значення елементів масиву a $[1 \dots k]$.

Алгоритм **“Зміна позиції”** отримує вхідні дані у вигляді масиву значень $b\ [1 \dots k-1]$ з загального алгоритму.

Крок 1. Знаходимо m - номер останнього елементу масиву b, що дорівнює або 1 або 2.

Крок 2. Якщо $m = k - 1$, то $b\ (k-1)\ =\ b\ (k-1) + 1$,

інакше $b\ (m)\ =\ b\ (m) + 1$ та $b\ (i) =\ 1 \quad (i = m + 1 \ldots k - 1)$.

Крок 3. Повертаємо нові значення елементів масиву $b\ [1 \ldots\ k - 1]$

Алгоритм **“Боєздатність”** отримує вхідні дані у вигляді масиву значень $b\ [1 \ldots\ k - 1]$ з загального алгоритму.

Крок 1. Початкове значення боєздатності АУ1 $\text{РВ}(1) =\ Kmch$

Крок 2. Для $i = 1 \ldots k$ виконуємо кроки 3-7.

Крок 3. Розраховується кількість снарядів d, випущених з АУ2 по АУ1 для припинення стрільби по цілі

$$d = \frac{a(i) \cdot t_{\text{АУ1}} + t_{\text{бм}} - (t_{\text{АУ1}} + t_{\text{ст}})}{t_{\text{АУ2}} + t_{\text{ст}}}$$

Крок 4. Розрахунок коефіцієнту зменшення боєздатності АУ1 за рахунок влучення снарядів з АУ2 в АУ1:

$$k_{\text{вс}} = \sum_{j=1}^{d} \frac{1}{j(j+1)}$$

Крок 5. Розрахунок зменшення боєздатності АУ1 за рахунок ведення бойової роботи по знищенню цілі

$$k_{\text{бр}} = k_{\text{ств}} \cdot t_{\text{АУ1}} \cdot a(i) + k_{\text{ход}} \cdot t_{\text{АУ1}} \cdot a(i) \cdot$$

Крок 6. Розрахунок боєздатності АУ1 після роботи на i -ій позицій

$$PA_i = PB(i) - \left(k_{\text{вс}} + k_{\text{бр}}\right)$$

Крок 7. Розрахунок зменшення боєздатності АУ1 при зміні позиції виконується поки $i = 1 < k$

$$PB(i+1) = PA_i - \left(k_{\text{ств_тр}}(b(i)) + k_{\text{ход_тр}}(b(i)) + k_{\text{мч_тр}}(b(i))\right)$$

Крок 8. Повертаємо значення боєздатності $PA(k)$ артилерійської установки АУ1 при поточній структурі її бойової роботи.

Алгоритм "Час" отримує вхідні дані у вигляді масивів значень a $[1 \ldots k]$, та b $[1 \ldots k-1]$ з загального алгоритму.

Крок 1. Задаємо початкове значення часу T=0

Крок 2. Для $i = 1 \ldots k$ виконуємо кроки 3-4.

Крок 3. Розраховуємо сумарний час бойової роботи та переміщень АУ1 включно з бойовою роботою на $i-$ ій позиції.

$$T = T + t_{\text{мб}} + a(i) \cdot t_{\text{АУ1}} + t_{\text{бм}}$$

Крок 4. Якщо $i \neq k$ розраховуємо сумарний час бойової роботи та переміщень АУ1 з урахуванням часу переміщення на позицію $i+1$.

$$T = T + t_{\text{м}}(b(i))$$

Крок 5. Повертаємо загальний час T виконання бойового завдання АУ1 при поточній *структурі.*

3.6 Результати дослідження імітаційного експерименту.

Дослідження зменшення боєздатності в постановці задачі (див. пункт 3.2) представляє собою велику, але скінчену кількість можливих варіантів виконання бойового завдання, яке можна виконати за правилами Парето−орієнтованих задач з одного боку, або задач динамічного програмування з іншого. Але, як виявилось кількість, вхідних параметрів (див.

табл. 3.2 і табл.3.3) і кількість змінних аргументів табл. 3.4 і табл. 3.5 дозволили отримати всі можливі розв'язки простим прямим перебором. В таблицях (табл. 3.6 табл. 3.7 табл. 3.8 табл. 3.9) представлені результати дослідження.

Табл. 3.4 Характеристики змінних аргументів для розв'язання бойової задачі артилерійською установкою

Назва характеристики	Числові значення			
1. Початок вогневої дії протиборчої сторони після першого пострілу атакуючої $t_{\text{ст}}$, с	35	43	51	59
2. Кількість снарядів для знищення стаціонарної цілі n, штук	4	6	8	10

Необхідно відмітити важливу властивість моделі розрахунку зменшення боєздатності, представленої на кроці 6 алгоритму «Боєздатність».

Табл. 3.5. Характеристики варіантів змінних аргументів для розв'язання бойової задачі артилерійською установкою при зміні вогневої позиції

Назва характеристики зменшення боєздатності АУ1	Варіант моделювання X			Варіант моделювання Y		
	Номер дороги (j)					
	1	2	3	1	2	3
1. За рахунок зносу стволу при транспортуванні $k_{ств_тр}(j)$	$2{,}5\cdot10^{-5}$	$5{,}5\cdot10^{-5}$	$7{,}5\cdot10^{-5}$	$2{,}5\cdot10^{-4}$	$5{,}5\cdot10^{-4}$	$7{,}5\cdot10^{-4}$
2. За рахунок зносу ходової частини при транспортуванні $k_{ход_тр}(j)$	$7{,}4\cdot10^{-4}$	$9{,}4\cdot10^{-4}$	$2{,}4\cdot10^{-3}$	$7{,}4\cdot10^{-3}$	$9{,}4\cdot10^{-3}$	$2{,}4\cdot10^{-2}$
3. За рахунок зносу установки при вогневому впливі при транспортуванні $k_{м_тр}(j)$	$5{,}5\cdot10^{-5}$	$3{,}0\cdot10^{-5}$	$1{,}5\cdot10^{-5}$	$5{,}5\cdot10^{-4}$	$3{,}0\cdot10^{-4}$	$1{,}5\cdot10^{-4}$

Таблиця 3.6 − Результати дослідження розподілу всіх варіантів боєздатності з можливих для 10 пострілів для двох варіантів моделювання

Інтервали розподілу	Варіант моделювання X				Варіант моделювання Y			
	Початок вогневої дії, $t_{ст}$, с				Початок вогневої дії, $t_{ст}$, с			
	35	43	51	59	35	43	51	59
(0,075;0,100]	0	0	0	0	37	0	0	0
(0,100;0,125]	0	0	0	0	120	2	0	0
(0,125;0,150]	202	7	1	0	53	5	1	0
(0,150;0,175]	0	0	0	0	833	0	0	0
(0,175;0,200]	0	0	0	0	6144	6	0	0
(0,200;0,225]	0	0	0	0	23026	325	5	0
(0,225;0,250]	0	0	0	0	35117	1350	176	4
(0,250;0,275]	0	0	0	0	16902	2217	471	81
(0,275;0,300]	120	0	0	0	1373	941	355	110
(0,300;0,325]	83283	4851	1023	208	0	12	16	13
(0,575;0,600]	0	0	0	0	1	1	1	1
(0,600;0,625]	0	0	0	0	171	171	171	171
(0,625;0,650]	0	0	0	0	1978	1986	1986	1986
(0,650;0,675]	0	0	0	0	13363	14196	14196	14196
(0,675;0,700]	0	0	0	0	44613	50766	50772	50772
(0,700;0,725]	0	0	0	0	65746	89247	89567	89572
(0,725;0,750]	0	0	0	0	37652	74350	75524	75696
(0,750;0,775]	0	0	0	0	5670	24651	26397	26787
(0,775;0,800]	8086	8206	8206	8206	15	1915	504	2749
(0,800;0,825]	161123	249077	252914	253730	0	0	2	6
Структури та відповідні екстремальні значення боєздатності								
для *max* значення боєздатності	Послідовність кількості пострілів на позиціях							
	2,2,2,2,2	2, 4, 4	5, 5	4, 6	2,2,2,2,2	2, 4, 4	5, 5	4, 6
	Послідовність номерів доріг при змінах позицій							
	1,1,1,1	1,1	1	1	1,1,1,1	1,1	1	1
	Значення боєздатності							
	0.8117	0.8134	0.8142	0.8142	0.7822	0.7986	0.8068	0.8068
	Час							
	2680	1590	1050	1050	2680	1590	1050	1050
для *min* значення боєздатності	Послідовність кількості пострілів на позиціях							
	1,1,1,7	1,9	10	1,1,1,7	1,1,1,7	1,9	10	1,1,1,7
	Послідовність номерів доріг при змінах позицій							
	3, 3, 3	3		3, 3, 3	3, 3, 3	3		3, 3, 3
	Значення боєздатності							
	0.1409	0.1458	0.1483	0.3075	0.0736	0.1234	0.1483	0.2403
	Час							
	5910	2310	510	5910	5910	2310	510	5910

Таблиця 3.7 – Результати дослідження розподілу всіх варіантів боєздатності з можливих для 8 пострілів для двох варіантів моделювання

Інтервали розподілу	Варіант моделювання X				Варіант моделювання Y			
	Початок вогневої дії, $t_{ст}$, с				Початок вогневої дії, $t_{ст}$, с			
	35	43	51	59	35	43	51	59
(0,150;0,200]	7	0	0	0	7	0	0	0
(0,200;0,225]	0	0	0	0	6	0	0	0
(0,225;0,250]	0	0	0	0	145	0	0	0
(0,250;0,275]	0	0	0	0	1038	4	0	0
(0,275;0,300]	0	0	0	0	2150	45	3	0
(0,300;0,325]	0	0	0	0	974	119	19	2
(0,325;0,350]	4353	208	40	7	40	40	18	5
(0,650;0,675]	0	0	0	0	1	1	1	1
(0,675;0,700]	0	0	0	0	21	21	21	21
(0,700;0,725]	0	0	0	0	568	574	574	574
(0,725;0,750]	0	0	0	0	2641	2786	2786	2786
(0,750;0,775]	0	0	0	0	4928	5968	5972	5972
(0,775;0,800]	0	0	0	0	3346	5514	5556	5559
(0,800;0,825]	0	0	0	0	267	1274	1374	1391
(0,825;0,850]	11772	16176	16344	16377	0	38	60	73
Структури та відповідні екстремальні значення боєздатності								
для *max* значення боєздатності	Послідовність кількості пострілів на позиціях							
	2,2,2,2	4,4	3,5	2,6	2,2,2,2	4,4	3,5	2,6
	Послідовність номерів доріг при змінах позицій							
	1,1,1	1	1	1	1,1,1	1	1	1
	Значення боєздатності							
	0.8425	0.8442	0,8442	0.8442	0.8204	0.8368	0.8368	0.8368
	Час							
	2100	1020	1020	1020	2100	1020	1020	1020
для *min* значення боєздатності	Послідовність кількості пострілів на позиціях							
	1,7	1,1,1,5	1,1,6	1,7	1,7	1,1,1,5	1,1,6	1,7
	Послідовність номерів доріг при змінах позицій							
	3	3,3,3	3,3	3	3	3,3,3	3,3	3
	Значення боєздатності							
	0.1758	0.3375	0,34	0.3425	0.1534	0.2703	0.2952	0.3201
	Час							
	2280	5880	4080	2280	5880	4080	4080	2280

Ця розрахункова величина може отримувати від’ємне значення, що з технічної точки зору означає фізичну втрату артилерійської установки і чим більше ця

величина за модулем, це означає що втрата обладнання настає раніше на попередніх кроках виконання завдання при структурі, яка розглядається.

Таблиця 3.8 − Результати дослідження розподілу всіх варіантів боєздатності з можливих для 6 пострілів для двох варіантів моделювання

Інтервали розподілу	Варіант моделювання X				Варіант моделювання Y			
	Початок вогневої дії, $t_{ст}$, с				Початок вогневої дії, $t_{ст}$, с			
	35	43	51	59	35	43	51	59
(0,300;0,325]	0	0	0	0	28	0	0	0
(0,325;0,350]	0	0	0	0	121	0	0	0
(0,350;0,375]	201	6	0	0	52	6	0	0
(0,375;0,400]	1	1	1	0	1	1	1	0
(0,750;0,775]	0	0	0	0	11	11	11	11
(0,775;0,800]	0	0	0	0	155	155	155	155
(0,800;0,825]	0	0	0	0	393	421	421	421
(0,825;0,850]	0	0	0	0	250	371	371	371
(0,850;0,875]	819	1017	1023	1023	10	59	65	65
(0,875;0,900]	0	0	0	1	0	0	0	1
Структури та відповідні екстремальні значення боєздатності								
для *max* значення боєздатності	Послідовність кількості пострілів на позиціях							
	2,2,2	2,4	1,5	6	2,2,2	2,4	1,5	6
	Послідовність номерів доріг при змінах позицій							
	1,1	1	1		1,1	1	1	
	Значення боєздатності							
	0.8734	0.8742	0.874	0.875	0.8586	0.8668	0.8668	0.875
	Час							
	1530	990	990	450	1530	990	990	450
для *min* значення боєздатності	Послідовність кількості пострілів на позиціях							
	1,1,1,3	1,5	6	1,1,1,1,1,1	1,1,1,3	1,5	6	1,1,1,1,1,1
	Послідовність номерів доріг при змінах позицій							
	3,3,3	3		3,3,3,3,3	3,3,3	3		3,3,3,3,3
	Значення боєздатності							
	0.3675	0.3725	0.375	0.8625	0.3003	0.3501	0.375	0.7505
	Час							
	5850	2250	450	9450	5850	2250	450	9450

При розв'язанні поставленої задачі, попередньо враховувалось, що всі постріли моделюються як ефективні, як це було запропоновано в [11]. Ймовірність влучення в ціль будь-якою артилерійською установкою більше,

або дорівнює 0.5. Ймовірність зменшення боєздатності артилерійської установки атакуючої сторони за рахунок влучення снарядів з артилерійської установки протиборчої сторони від пострілу до наступного пострілу представлено виразом на кроці 4 алгоритму «Боєздатність».

Представлені результати дослідження дивись в таблицях (табл. 3.6 табл. 3.7 табл. 3.8 табл. 3.9) найкращого варіанта з можливих з точки зору мінімальної втрати боєздатності при виконанні бойового завдання в часі, для розуміння отриманої характеристики і подальшого аналізу в таблицях наведено значення й найгіршого з варіантів.

Аналіз всіх таблиць з результатами дозволяє констатувати, що для кожного значення необхідної кількості снарядів при враження цілі існує найкраща структура (див. пункт 3.2), яка підтверджується мінімальним зменшенням боєздатності та часом виконання завдання.

Також існує спосіб для найкращої структури по враженню цілі за умовами максимального збереження боєздатності при виконанні бойового завдання, але він не завжди відповідає мінімальному часу його виконання. З іншої точки зору існує найменший час для виконання бойового завдання, але втрата значення боєздатності має досить суттєве значення і в ряді випадків артилерійську установку буде знищено вогнем артилерії протиборчої сторони.

Для аналізу варіанту, що розглядається (див. пункт 3.2) було розраховано 262144 значень боєздатності для кожного з варіантів за умови зміни розрахункових аргументів. При виконані бойового завдання в 10 снарядів, для варіанта моделювання X, боєздатність зменшується з 0,965 до різних значень, але існує досить велика кількість результатів 169209 значень для часу початку вогневої дії протиборчої сторони по атакуючій в 35 с, де величини поточної боєздатності утворюють смугу від 0,775 до 0,825. Аналогічно 257283 значень для часу 43 с, 261120 значень для часу 51 с и 261936 значень для часу 59 с.

Таблиця 3.9 – Результати дослідження розподілу всіх варіантів боєздатності з можливих для 4 пострілів для двох варіантів моделювання

Інтервали розподілу	Варіант моделювання X				Варіант моделювання Y			
	Початок вогневої дії, $t_{ст}$, с				Початок вогневої дії, $t_{ст}$, с			
	35	43	51	59	35	43	51	59
(0,375;0,400]	0	0	0	0	6	0	0	0
(0,400;0,425]	7	0	0	0	1	0	0	0
(0,825;0,850]	0	0	0	0	7	7	7	7
(0,850;0,875]	0	0	0	0	28	28	28	28
(0,875;0,900]	7	7	7	7	22	28	28	28
(0,900;0,925]	50	57	57	57	0	1	1	1
Структури та відповідні екстремальні значення боєздатності								
для max значення боєздатності	Послідовність кількості пострілів на позиціях							
	2,2	4	4	4	2,2	4	4	4
	Послідовність номерів доріг при змінах позицій							
	1				1			
	Значення боєздатності							
	0.9042	0.905	0.905	0.905	0.8968	0.905	0.905	0.905
	Час							
	960	420	420	420	960	960	960	960
для min значення боєздатності	Послідовність кількості пострілів на позиціях							
	1,3	1,1,1,1	1,1,1,1	1,1,1,1	1,3	1,1,1,1	1,1,1,1	1,1,1,1
	Послідовність номерів доріг при змінах позицій							
	3	3,3,3	3,3,3	3,3,3	3	3,3,3	3,3,3	3,3,3
	Значення боєздатності							
	0.4025	0.8975	0.8975	0.8975	0.3801	0.8303	0.8303	0.8303
	Час							
	2220	5820	5820	5820	2220	5820	5820	5820

Для варіанта моделювання Y, боєздатність зменшується з 0,965 до різних значень, але існує досить велика кількість результатів 169209 значень для часу початку вогневої дії протиборчої сторони по атакуючій в 35 с, де величини поточної боєздатності утворюють більш широку смугу від 0,575 до 0,825. Аналогічно 257283 значень для часу 43 с, 261120 значень для часу 51 с и 261936 значень для часу 59 с.

Для варіанта моделювання Y і X для початку часу вогневої дії протиборчої сторони по атакуючій в 35с існують від'ємні значення боєздатності в кількості 9330, для варіантів іншого часу варіантів від'ємних значень боєздатності не існує.

Що до виконання пострілів від варіанту по 2 постріли на кожній з перших п'яти бойових позицій до 5 з перших двох бойових позицій. Що до зміни дороги між позиціями, найкращі рішення відповідають біль швидкому і більш небезпечному варіанту 1. Що до спів ставлення найкращого та найгіршого з рішень, відношення складають від 4 до 10.

Якісно аналогічні результати було отримано з аналізу таблиць табл. 3.6, табл. 3.7, табл. 3.8, табл. 3.9. Слід зауважити, що кількість можливих розв'язувань зменшилась, зменшилась ширина смуги результатів, та відношення при спів ставленні найкращого та найгіршого з рішень, зменшилось і стало менше ніж 2. Але при шести пострілах збільшилась кількість можливих вогневих позицій.

Що до аналізу часу виконання бойового завдання по результатам отриманим в табл. 3.6, табл. 3.7, табл. 3.8, табл. 3.9 можна констатувати найкращому максимальному варіанту, який забезпечено розрахунковою структурою проведення враження цілі, відповідає мінімальне значення часу. Але існують розв'язки при виконані бойового завдання 10 та 8 снарядами коли таке порушується. Дійсно є суттєве зменшення часу, але при значенні поточної боєздатності в інтервалі від 0.1 до 0.2, що означає фактичну втрату артилерійської установки.

Аналіз результатів представлених в табл. 3.9 довів можливість бойового застосування гармати при одному максимум при двох пострілах з кожної вогневої позиції без зменшення її бойової стійкості. Як що, витрати пострілів по знищенню цілі в кількості 10-ти орієнтовані на обороні дії, то тактика по

знищенню цілі в кількості не більше 4-х пострілів з одної позиції відповідає бойовому застосуванню гармати при наступальних діях [11, 12, 13, 14, 15].

Що підтверджується найгіршими результатами де переїзд між позиціями можливо виконувати саме по будь яким дорогам з будь якими характеристиками по втраті боєздатності, що відповідає саме наступальним діям. Тому тактику в перекладі з англійської «вистрілив і втік» [8, 21] для наступу можна назвати «сховався і вистрілив» «hid and shot».

По результатам викладеного матеріалу третього розділу можна констатувати, що знайшли подальшого розвитку імітаційна модель та метод керування станами артилерійської гармати при стрільбі за наявності у ефективних пострілах випадкових динамічних зовнішніх і внутрішніх збурень, що дало можливість визначити найкращий час виконання бойової задачі при мінімальній втраті боєздатності з врахуванням частоти зміни вогневої позиції для виконані бойової задачі.

РОЗДІЛ 4. МЕТОД ПАРАБОЛІЧНОЇ АПРОКСІМАЦІЇ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТИ ЗІТКНЕННЯ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО СНАРЯДА З ПОВЕРХНЕЮ.

Мета розділу – розробити та дослідити ефективний метод відстеження артилерійського пострілу з випадковими збуреннями на основі реєстрації балістичної хвилі, утвореної снарядом, що летить траєкторією, розподіленою у просторовому відношенні системою акустичних сенсорів.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

– розроблено метод реєстрації координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею;

– побудовано схему методу верифікації артилерійського пострілу з випадковими збуреннями;

– розроблено метод розрахунку точки приземлення снаряда під час пострілу з випадковими збуреннями на основі параболічної апроксимації;

– виконано імітаційне моделювання;

– здійснено зіставлення розробленого методу із методом компенсації випадкових збурень методом артилерійської вилки;

– проведено попередній польовий експеримент, що підтверджує ефективність запропонованого методу.

4.1 Загальні положення.

Згідно з [113], [13] у 2022 році Збройні сили України здійснювали в середньому 4000–7000 артилерійських пострілів за день, з боку росіян цей показник був у 2-4 рази більший. Застосування артилерії у локальних збройних конфліктах XXI століття та під час російсько-української війни засвідчило, що збільшити ефективність застосування артилерії можна лише засобом нових тактичних моделей. На сьогодні класична версія контрбатарейної війни [114]

трансформувалася в тактику "shoot-and-scoot" [8], як це було продемонстровано в третьому розділі. Поразка ворога, забезпечена артилерійським підрозділом зі збереженням своєї боєздатності, неминуча лише шляхом скорочення часу стрільби на ураження цілі до мінімально можливого [115]. Кожен постріл з артилерійської установки дає можливість супротивнику визначити її координати і відкрити вогонь у відповідь. Отже, своєчасним є завдання розробки методів ведення артилерійського вогню, застосування яких забезпечить точне ураження цілі найменшим числом пострілів.

Найчастіше застосовані в сьогоденні нові принципи підвищення точності артилерійської стрільби тісно пов'язані із впровадженням прогресивних інформаційних технологій (ІТ). ІТ, безперечно, застосовуються в складанні таблиць стрільби [116]. Розрахунок траєкторій польоту снарядів з уточненими балістичними моделями також ґрунтується на основі ІТ для оптимального оцінювання та прогнозування точності стрільби в польових умовах [117, 118]. Геоінформаційні системи спеціального призначення є базою побудови карт-планшетів командирів артилерії [119, 120].

Подальший виклад способів вирішення важливого наукового та практичного завдання оцінювання впливу випадкових збурень на точність стрільби також буде пов'язаний із відповідною інформаційною технологією, що сприятиме досягненню поставленої мети.

4.2 Загальні положення завдань акустичної розвідки.

Розглянемо спосіб визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею шляхом звукової реєстрації акустичного поля, утвореного цим же снарядом. Реєстрація акустичного поля снаряда, що розірвався біля цілі, може розглядатися як інтегральний процес, що призводить до кінцевого результату – зменшення витрати снарядів під час виконання бойового завдання за рахунок уникнення похибок обчислень і вимірювань, а також через

скорочення розкидання снарядів при компенсуючих діях зовнішніх збурень, що фіксуються в низці пострілів. Швидкість уведення компенсуючих дій в бойову роботу артилерійських підрозділів для нівеляції бойових порядків супротивника або знищення заданих цілей є визначальною під час ведення бою в сучасних умовах.

Звукова розвідка проводиться безперервно, отримані дані повинні бути достовірними й точними. За координатами звукових цілей забезпечується стрільба на ураження без попередньої пристрілки. А за координатами точок падіння і розриву снарядів повинна відбуватися пристрілка незвукових і оптично не виявлених цілей.

Реєстрація акустичного поля для потреб артилерійських підрозділів дозволяє вирішити два завдання. З цією метою на місцевості встановлюється апаратура звукометричного комплексу в певній конфігурації, що складається з декількох звукоприймачів, розміщених на пунктах бази, а також центрального пункту, на якому розташовується апаратура обробки інформації, поста спостереження і зв'язку [113].

Перше завдання дозволяє виявити вогневі позиції гармат, що оптично не спостерігаються незалежно від видів застосовуваних боєприпасів, за демаскуючою ознакою, якою є звук пострілу. Пропонуємо таку послідовність операцій при розгортанні підрозділів звукової розвідки для обслуговування стрільби артилерійських гармат по звукових цілях.

Крок 1. Підрозділ звукової розвідки на базі автоматизованого звукометричного комплексу має три звукоприймачі на пунктах бази, координати яких відомі. На центральному пункті, координати якого також відомі, розташовують устаткування обробки інформації у вигляді центральної обчислювальної машини, метеорологічного вимірювального комплексу та обладнання спостереження і зв'язку. Звукоприймачі й обладнання обробки інформації поєднуються засобами внутрішньої зв'язку, водночас

артилерійський підрозділ і звукометричний комплекс поєднуються засобами зовнішньої зв'язку.

Крок 2. Звукоприймачі розташовують на місцевості в однакових умовах, краще на горішніх точках по лінії, що є перпендикулярною до напрямку очікуваної появи звукової хвилі на відстані від 500 до 1000 м один від одного.

Крок 3. Визначають координати кожного звукоприймача і вносять в апаратуру обробки інформації на основі центральної обчислювальної машини.

Крок 4. Метеорологічний вимірювальній комплекс фіксує інформацію про погоду (температуру повітря, напрям і швидкість вітру в надземному пласті). Інформація передається на центральний пункт в апаратуру обробки інформації і вводиться в центральну обчислювальну машину.

Крок 5. Проводять налаштування і калібрування обладнання прийому інформації на кожному пункті бази з підключеними звукоприймачами.

Крок 6. Здійснюють за кожним каналом окремо налаштування обладнання, яке розташовано на пунктах бази, з апаратурою обробки інформації на центральному пункті.

Крок 7. Проводять калібрування каналів передачі інформації від кожного звукоприймача до апаратури обробки інформації.

Крок 8. Вводять астрономічний час в центральну обчислювальну машину та здійснюють синхронізацію і вивірення єдиного часу центрального пункту з кожним пунктом бази.

Друге завдання дозволяє вести стрільбу своєї артилерії по незвукових цілях, оптично не виявлених, шляхом визначення точок падіння снарядів за звуком їх розривів. Встановимо послідовність операцій під час супроводу підрозділом звукової розвідки стрільби артилерійських гармат за розривами снарядів.

Крок 1. У центральну обчислювальну машину вводять координати цілі і вогневої позиції.

Крок 2. Проводять постріл з артилерійської гармати на вогневій позиції. У момент зіткнення снаряда з твердою перешкодою відбувається його розрив, в результаті якого виникає звукова хвиля, що, поширюючись в атмосфері, досягає звукоприймачів.

Крок 3. За допомогою звукоприймачів реєструють звукову хвилю розриву снаряда і отриману інформацію по каналу зв'язку передають на апаратуру обробки інформації, а центральна обчислювальна машина в результаті обробки отримує координати точки розриву снаряда (репера).

Крок 4. Розраховують координати точки розриву за відомими даними звукоприймачів, швидкістю поширення звукової хвилі з урахуванням поправок на поточний метеорологічний стан надземного пласта атмосфери і різницею часу реєстрації звукової хвилі звукоприймачами.

Крок 5. Визначають координати точки падіння снаряда щодо вогневої позиції.

Під час виконання бойових завдань у супроводі підрозділу звукової розвідки стрільби артилерійських гармат за переліченими алгоритмами маємо такі недоліки [13].

Якщо артилерійська гармата на вогневій позиції робить постріл по цілях, розташованих на м'якому заболоченому ґрунті або на ґрунті, покритому товстим сніговим пластом, то при зіткненні снаряда з такою поверхнею не утворюється розрив і, як наслідок, не виникає звукова хвиля, що не поширюється в атмосфері і не досягає звукоприймачів.

Якщо артилерійська гармата на вогневій позиції робить постріл по цілях, розташованих на водній поверхні, снаряд проходить товщу води і розривається в підводному стані, але при цьому вся енергія вибуху поглинається водним середовищем, і акустична хвиля в атмосфері не утворюється.

Значне послаблення звукової хвилі також відбуватиметься, якщо снаряд утворює розрив, але звукова хвиля проходить через перешкоди з великим

поглинанням акустичних хвиль (великі лісові масиви, місцевість на якій присутня велика кількість пагорбів, ярів і т. ін.).

Реєстрація акустичної хвилі від вибуху снаряда здійснюється звукоприймачами, розташованими на лінії, перпендикулярній до напрямку очікуваної появи звукової хвилі.

Перераховані недоліки призводять до неможливості отримання координат розриву снаряда або в результаті його відсутності, або за умов ослаблення звукової хвилі.

4.3 Метод реєстрації координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею.

В основу методу визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею, яким за рахунок введення нових операцій і зміни порядку виконання чинних буде забезпечено визначення координат снарядів, що не вибухнули, а також підвищено точність визначення координати зіткнення снаряда з поверхнею. Актуальними в запропонованому методі є наявність таких ознак [121].

Уздовж лінії напрямку стрільби від гармати на передбачувану відстань, коли снаряд втратить надзвукову швидкість, визначають місця розміщення трьох вимірювальних мікрофонів або трьох груп вимірювальних мікрофонів.

Визначимо умови розміщення трьох вимірювальних мікрофонів або трьох груп вимірювальних мікрофонів.

1. В певних місцях розміщують перший, другий і третій вимірювальні мікрофони або першу, другу і третю групи вимірювальних мікрофонів з похибкою не більше 50%.

2. Визначають координати трьох вимірювальних мікрофонів або трьох груп вимірювальних мікрофонів, що перебувають на лінії стрільби.

3. Реєструють балістичну і дульну хвилі над мікрофонами або групами мікрофонів.

4. Визначають інтервал між часом реєстрації балістичної хвилі і часом реєстрації дульної хвилі від вимірювального мікрофона або групи вимірювальних мікрофонів ближнього/ближньої до гармати до вимірювального мікрофона або групи вимірювальних мікрофонів дальнього/дальньої від гармати.

5. Визначають початкову швидкість снаряда під час пострілу з гармати.

6. Отримують три види балістичних кривих, що позначаються трьома точками, за якими виявляють координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею.

7. За трьома отриманими координатами визначають середню координату зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею.

Причинно-наслідковий зв'язок між сукупністю представлених умов і досягнутим технічним результатом можна пояснити таким чином. У момент виходу снаряда зі ствола (джерела звуку) утворюються дві звукові хвилі. Балістична хвиля утворюється, коли рухається снаряд з надзвуковою швидкістю і на інтервалі часу до його зникнення в результаті переходу снаряда в дозвуковий режим руху, де швидкість її поширення еквівалентна швидкості руху снаряда. Дульна хвиля утворюється при виході порохових газів, після виходу снаряда зі ствола. Спочатку на відносно малому інтервалі часу вона має властивості ударно-акустичної хвилі і перетворюється в акустичну при врівноваженні тиску цих газів з атмосферним [122]. Згодом швидкість її поширення є постійною і дорівнює швидкості розповсюдження звуку. Обидві хвилі (балістична і дульна) почергово реєструються мікрофоном або групою мікрофонів, що розташовані по лінії напрямку стрільби. За часом досягнення дульної і балістичної хвиль кожного мікрофона або групи мікрофонів визначають відстані від джерела звуку до пристроїв які реєструють звукові

хвилі. Вимірюють швидкість балістичної хвилі над мікрофоном або групою мікрофонів. Водночас визначають початкову швидкість снаряда. У конкретний момент часу і на відомій відстані швидкість поширення балістичної хвилі дорівнює швидкості снаряда. Далі за даними трьох точок і характеристиками рухомого снаряда будують апроксимуючу параболу, яка визначає місце зіткнення снаряда з поверхнею.

Пропонований метод пояснюється схемою, що представлена на рис. 4.1 [121].

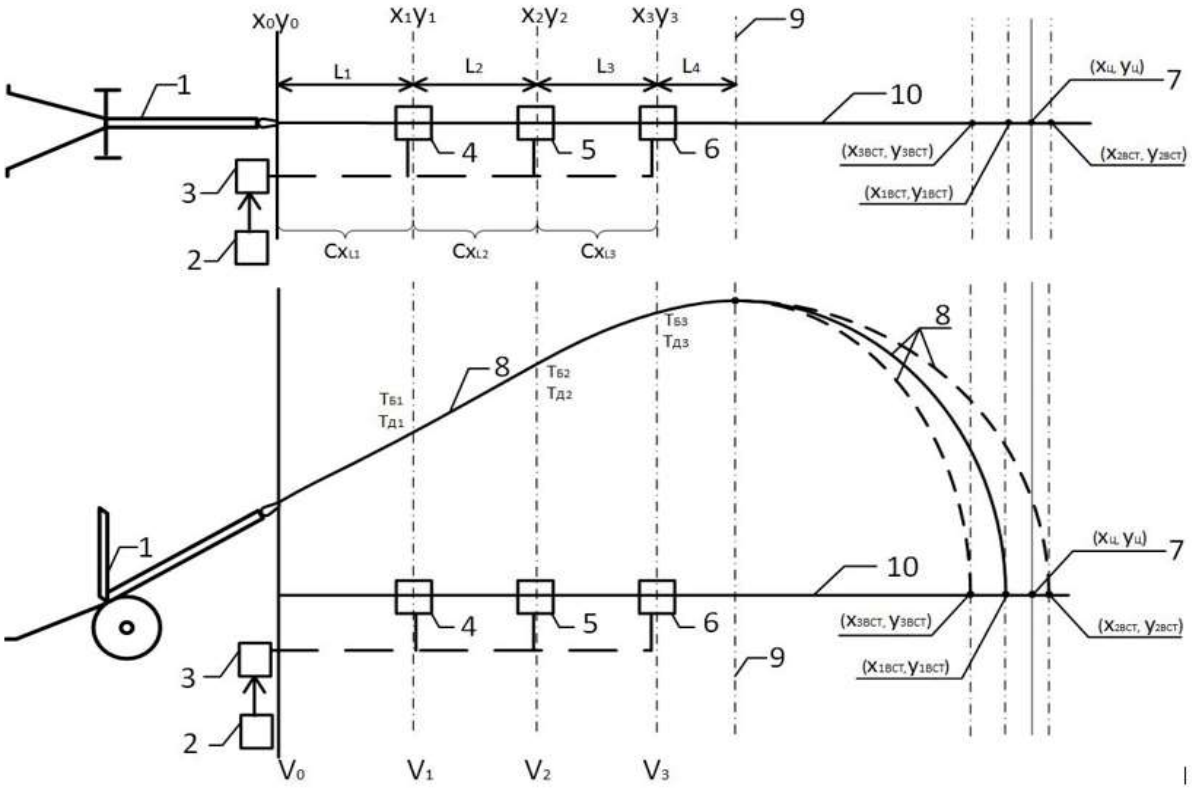


Рис. 4.1 - схема розміщення обладнання, вид зверху та збоку. (на рис. показано: 1 – артилерійська гармата, 2 - метеостанція, 3 - розрахунковий блок, 4 - перший вимірювальний мікрофон або перша група вимірювальних мікрофонів з апаратурою комутації, 5 - другий вимірювальний мікрофон або друга група вимірювальних мікрофонів з апаратурою комутації, 6 - третій вимірювальний мікрофон або третя група вимірювальних мікрофонів з апаратурою комутації, 7 - ціль, 8 - апроксимуючі параболи, які визначаються за трьома точками траєкторії польоту артилерійського снаряда, 9 - таблична відстань втрати снарядом надзвукової швидкості, 10 - лінія напрямку стрільби.)

Для представлення опису методу реєстрації координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею в схему введено такі позначення. L_1 - відстань між гарматою 1 і першим вимірювальним мікрофоном 4 (або першою групою вимірювальних мікрофонів 4). L_2 - відстань між першим вимірювальним мікрофоном 4 (або першою групою вимірювальних мікрофонів 4) і другим вимірювальним мікрофоном 5 (або другою групою вимірювальних мікрофонів 5). L_3 - відстань між другим вимірювальним мікрофоном 5 (або другою групою вимірювальних мікрофонів 5) і третім вимірювальним мікрофоном 6 (або третьою групою вимірювальних мікрофонів 6). L_4 - відстань між третім вимірювальним мікрофоном 6 (або третьою групою вимірювальних мікрофонів 6) і табличною відстанню, на якій снаряд втратить надзвукову швидкість. X_0, Y_0 - координати гармати 1. X_1, Y_1 - координати першого вимірювального мікрофона 4 або першої групи вимірювальних мікрофонів 4. X_2, Y_2 - координати другого вимірювального мікрофона 5 або другої групи вимірювальних мікрофонів 5. X_3, Y_3 - координати третього вимірювального мікрофона 6 або третьої групи вимірювальних мікрофонів 6. $X_ц$, $Y_ц$ - координати цілі 7. $X_{1вст}$, $Y_{1вст}$ - перша група координат зіткнення снаряда з поверхнею, визначених за розрахунковими параболами 8 за першою групою трьох точок траєкторії. $X_{2вст}$, $Y_{2вст}$ - друга група координат зіткнення снаряда з поверхнею, визначених за розрахунковими параболами 8 за другою групою трьох точок траєкторії. $X_{3вст}$, $Y_{3вст}$ - третя група координат зіткнення снаряда з поверхнею, визначених за розрахунковими параболами 8 за третьою групою трьох точок траєкторії. V_0 - швидкість снаряда над координатою X_0, Y_0. V_1 - швидкість снаряда над координатою X_1, Y_1. V_2 - швидкість снаряда над координатою X_2, Y_2. V_3 - швидкість снаряда над координатою X_3, Y_3. Cx_{L1} - інтегральний коефіцієнт лобового опору на ділянці L_1. Cx_{L2} - інтегральний коефіцієнт лобового опору на ділянці L_2. Cx_{L3} - інтегральний коефіцієнт лобового опору на ділянці L_3. $T_{Б1}$ - час реєстрації балістичної хвилі в координаті

X_1, Y_1. $T_{Б2}$ - час реєстрації балістичної хвилі в координаті X_2, Y_2. $T_{Б3}$ - час реєстрації балістичної хвилі в координаті X_3, Y_3. $T_{Д1}$ - час реєстрації дульної хвилі в координаті X_1, Y_1. $T_{Д2}$ - час реєстрації дульної хвилі в координаті X_2, Y_2. $T_{Д3}$ - час реєстрації дульної хвилі в координаті X_3, Y_3.

Запропонований метод виконується в такій послідовності [121].

Крок 1. На вогневій позиції розміщують гармату 1, метеостанцію 2, розрахунковий блок 3. Визначають координати гармати 1 (X_0, Y_0), отримують координати цілі ($X_ц$, $Y_ц$) 7. Координати гармати 1 і цілі вводять в розрахунковий блок 3.

Крок 2. Уздовж лінії напрямок стрільби 10 від гармати 1 на передбачувану табличну відстань 9, коли снаряд втратить надзвукову швидкість, розміщують три вимірювальних мікрофона або три групи вимірювальних мікрофонів 4, 5, 6, зокрема вимірювальний мікрофон (або мікрофони) і комутуючу апаратуру, що пов'язує три вимірювальних мікрофони або три групи вимірювальних мікрофонів 4, 5 і 6 з розрахунковим блоком 3. Місце розміщення визначають з огляду на однакові відстані від гармати 1 до першої групи L_1, відстані між групами L_2, L_3 і від останньої групи до кордону 9 за умови втрати снарядом надзвукової швидкості L_4 з похибкою не більше 50% від будь-якої максимальної відстані (L_1, L_2, L_3, L_4) по лінії напрямку стрільби.

Крок 3. Визначають координати трьох груп вимірювальних мікрофонів 4,5,6, що перебувають на лінії стрільби (X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3).

Крок 4. Всі вимірювальні мікрофони або групи вимірювальних мікрофонів 4, 5, 6 через комутуюче обладнання з'єднують з розрахунковим блоком 3, синхронізують за часом між собою і вводять метеодані з метеостанції 2 про стан надземного пласта атмосфери.

Крок 5. Здійснюють постріл в напрямку цілі 7 за заданими координатами цілі 7 ($X_ц$, $Y_ц$), що встановлюються механізмами керування стрільбою на гарматі 1, водночас снаряд летить по траєкторії 8. Траєкторія польоту – це уявна

лінія, де знаходився снаряд від моменту часу і місця його вильоту з гармати 1 до моменту часу і місця його зіткнення з ціллю 7 або поверхнею. В результаті руху снаряда над лінією стрільби утворюється акустичне поле, що складається з балістичної і дульної хвиль. Обидві хвилі поширюються по лінії напрямку стрільби 10 і реєструються вимірювальними мікрофонами 4, 5, 6 або групами вимірювальних мікрофонів 4, 5, 6. Балістична хвиля рухається з надзвуковою швидкістю, що поступово знижується, дульна хвиля рухається з постійною звуковою швидкістю.

Крок 6. Кожен вимірювальний мікрофон 4, 5, 6 або група вимірювальних мікрофонів 4, 5, 6 в певний момент реєструють спочатку балістичну хвилю ($T_{Б1}$, $T_{Б2}$, $T_{Б3}$), а потім – дульну ($T_{Д1}$, $T_{Д2}$, $T_{Д3}$).

Крок 7. Визначають інтервал між часом реєстрації балістичної хвилі і часом реєстрації дульної хвилі від вимірювального мікрофона 4, 5, 6 або групи вимірювальних мікрофонів, 4,5,6, ближнього/ближньої до гармати 1 до вимірювального мікрофона 4,5,6 або групи вимірювальних мікрофонів 4,5,6, дальнього/дальньої від гармати 1.

Крок 8. За часом проходження дульної ($T_{Д1}$, $T_{Д2}$, $T_{Д3}$) і балістичної хвиль ($T_{Б1}$, $T_{Б2}$, $T_{Б3}$) через кожен вимірювальний мікрофон 4, 5, 6 або кожну групу вимірювальних мікрофонів 4, 5, 6, розміщених в реєструвальній апаратурі вимірювальних мікрофонів 4, 5 , 6, визначають швидкість балістичної хвилі (V_1, V_2, V_3,) і відповідно поточну швидкість снаряда в момент реєстрації кожним вимірювальним мікрофоном 4, 5, 6 або кожною групою вимірювальних мікрофонів 4, 5, 6 балістичної хвилі, яка фіксується над ними.

Крок 9. Визначають початкову швидкість снаряда при пострілі з гармати 1 -V_0 за таблицями стрільби для даного виду заряду.

Крок 10. Визначають інтегральний коефіцієнт опору снаряда, що летить (C_x) між двома найближчими групами реєструвальної апаратури.

Крок 11. Визначають апроксимуючі коефіцієнти траєкторії для координат розташування (за швидкістю, часом, довжиною): артилерійської гармати 1 - a_1, першого вимірювального мікрофона або першої групи вимірювальних мікрофонів з комутуючою апаратурою 4 - a_2, другого вимірювального мікрофона або другої групи вимірювальних мікрофонів з комутуючою апаратурою 5 - a_3, третього вимірювального мікрофона або третьої групи вимірювальних мікрофонів з комутуючою апаратурою 6 - a_4.

Крок 12. Визначають три апроксимуючі параболи за виміряними і визначеними параметрами.

Перша апроксимуюча парабола будується за координатами гармати 1 X_0, апроксимується коефіцієнтом траєкторії a_1 і координатами першої X_1 і другої X_2 групи мікрофонів та апроксимується коефіцієнтам траєкторії a_2, a_3. Потім за отриманою параболічною залежністю визначають координату зіткнення снаряда з поверхнею $X_{1вст}$.

Друга апроксимуюча парабола будується за координатами гармати 1 X_0, апроксимується коефіцієнтом траєкторії a_1 і координатами першої X_1 і третьої X_3 групи мікрофонів та апроксимується коефіцієнтам траєкторії a_2, a_4. Потім за отриманою параболічною залежністю визначають координату зіткнення снаряда з поверхнею $X_{2вст}$.

Третя апроксимуюча парабола будується за координатами гармати 1 X_0, апроксимується коефіцієнтом траєкторії a_1 і координатами другої X_2 і третьої X_3 групи мікрофонів та апроксимується коефіцієнтам траєкторії a_3, a_4. Потім за отриманою параболічною залежністю визначають координату зіткнення снаряда з поверхнею $X_{3вст}$.

Крок 13. Визначають координати $Y_{1вст}$, $Y_{2вст}$, $Y_{3вст}$ бічного відхилення (деривацію) за рахунок обертального руху снаряда для трьох параболічних залежностей.

Крок 14. За отриманими трьома координатами зіткнення снаряда з поверхнею ($X_{1вст}$, $Y_{1вст}$), ($X_{2вст}$, $Y_{2вст}$), ($X_{3вст}$, $Y_{3вст}$) визначають середню арифметичну величину. Отримана величина характеризує координату зіткнення снаряда з поверхнею за розглянутим способом.

4.4 Акустичні поля пострілу – основа методу реєстрації координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею

Сучасні засоби забезпечення точності артилерійської стрільби і поточного її оцінювання, способи наведення та коригування можна розділити на такі технологічні напрямки:

(і) – попередня підготовка стрільби [123, 124];

(іі) – верифікація результатів стрільби, тобто підтвердження попадання снаряда в точку прицілу або оцінка відхилення від точки прицілу [125].

Технологічний напрямок (і) забезпечує повний облік можливих похибок стрільби, зокрема систематичних, і включає:

– розвідку та визначення координат цілей;

– топогеодезичну підготовку;

– метеорологічну підготовку;

– балістичну підготовку;

– технічну підготовку;

– визначення установок для стрільби.

Незважаючи на постійне вдосконалення засобів технологічного спрямування (і) і, зокрема, застосовуваних ІТ, при пострілі можуть виникати випадкові збурення, пов'язані з такими факторами, що оцінюються з певними труднощами:

– зношеність ствола артилерійської установки, що виявилась після його останнього виміру;

– зміна температури ствола в результаті інтенсивних попередніх стрільб;

– неточна інформація про заряд і спосіб його зберігання.

Похибки стрільби внаслідок дії випадкових збурень повинні оцінюватись у процесі верифікації[108, 126].

Технологічний напрямок (ii) пов'язаний із встановленням інформаційного зворотного зв'язку між послідовними пострілами з артилерійської установки [11, 110]. Для коригування необхідне оцінювання координат розриву снаряда під час пострілу. Це суттєво ускладнює та подовжує процедуру верифікації.

Найчастіше використовувані технології напрямку (ii) на сьогоднішній день такі.

1. Оптичне спостереження, зокрема із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [127, 128]. Недоліки – демаскування процесу спостереження, уразливість засобів спостереження.

2. Визначення точки приземлення снаряда артилерійської РЛС [129, 130]. Недолік – демаскування процесу спостереження внаслідок випромінювання РЛС.

3. Обробка звукових сигналів від розривів снарядів, тобто застосування засобу звукової розвідки артилерії, а саме: «Обслуговування своєї стрільби» [131]. Недоліки – потреба великих розподілених у просторовому відношенні сенсорних систем, сильна залежність ефективності від метеоумов.

Звернімо увагу докладніше на засоби аналізу акустичних полів артилерії. При артилерійському пострілі утворюється два типи хвиль. Звуковий імпульс, породжений пороховими газами, що виходять зі ствола безпосередньо за снарядом, утворює хвилю, яку називають дульною [127]. Подібна за акустичною характеристикою хвиля виникає і при розриві снаряда.

Саме цей вид хвиль є об'єктом аналізу у звуковій розвідці артилерії [82]. Іншим типом хвиль при пострілі є повітряна ударна хвиля, що породжується рухом снаряда з надзвуковою швидкістю, і називається балістичною хвилею [54]. Балістична хвиля залишається ударною хвилею весь час, поки снаряд

продовжує рухатися із надзвуковою швидкістю, водночас сама переміщується разом із ним. Акустичний сигнал балістичної хвилі є N-подібний імпульс тривалістю 2...5 мс, енергетичний спектр її широкосмуговий та існує в частотному діапазоні від 10 Гц до 500...700 Гц. Балістична хвиля може бути зареєстрована тільки в межах конуса Маха, утвореного снарядом, що летить із надзвуковою швидкістю. Упродовж понад 100 років у звуковій розвідці артилерії балістична хвиля вважалася сигналом перешкоди. Однак у роботах [11, 53, 54, 57] було доведено, що балістична хвиля є цінним джерелом корисної інформації, зокрема про поточний рівень зношеності ствола. У цьому дослідженні пропонується розробити та дослідити перспективний метод верифікації артилерійського пострілу на основі реєстрації балістичної хвилі, утвореної снарядом, що летить траєкторією, розподіленою у просторовому відношенні системою акустичних сенсорів.

4.5 Метод верифікації пострілу

Загальний опис методу верифікації пострілу. На рис.4.2 показана схема розміщення зброї та вимірювального обладнання.

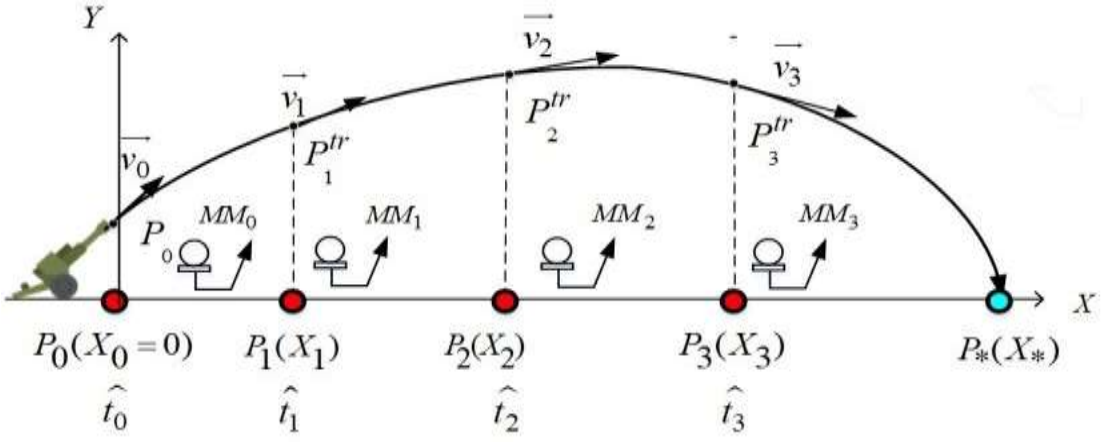


Рис.4.2. Схема розміщення зброї та вимірювального обладнання

Початок координат суміщено з вогневою позицією зброї P_0, що стріляє снарядом з початковою швидкістю $\overrightarrow{v_0}$, яка перевищує швидкість звуку. На схемі показано рух снаряда у вертикальній площині. Точка прицілу P_* розташована на горизонтальній дальності X_*. Зазначимо, що у цьому дослідженні не враховується бічне відхилення снаряда, викликане деривацією. При необхідності це може бути достатньо просто враховано відомими методами [132]. Під час польоту снаряда по балістичній траєкторії з надзвуковою швидкістю його супроводжує балістична хвиля, що спостерігається на поверхні вздовж лінії стрільби, розміщеної усередині конуса Маха. На поверхні в трьох точках спостереження з відповідними координатами $P_1(X_1), P_2(X_2), P_3(X_3)$ розташовуються комплекти вимірювальної апаратури (КВА). КВА призначений для реєстрації моментів прояву балістичної хвилі у відповідній точці $\widehat{t_i}, i = 1,2,3$, які відповідають моменту прольоту снаряда над точками спостереження. Кожен КВА містить вимірювальний мікрофон ММ, аналого-цифровий перетворювач та канал радіозв'язку. Ще один комплект КВА розташовується на вогневій позиції. Усі чотири комплекти КВА синхронізовані за часом.

Завдання досліджуваного методу верифікації пострілу з випадковими збуреннями – за зареєстрованим часом прольоту снаряда над точками спостереження оцінити координату приземлення снаряда і встановити, чи задовольняє вона необхідну точність.

Метод обробки вимірювань.

Крок 1. Для точки пострілу P_0 швидкість снаряда визначається за таблицями стрільби для даного типу снаряда та заряду (підготовка стрільби повна, можливі випадкові збурення).

Для кожної з точок P_j $(j = 1,2,3)$ на підставі даних про попередні точки P_i $(i = 0,1,2)$ виконуються такі розрахунки.

Крок 2. Ділянка траєкторії снаряда $P_i^{tr} P_j^{tr}$ апроксимується прямолінійним відрізком $P_i^{tr} P_j^{tr}$ (рис. 4.3).

Сила опору повітря, що діє на снаряд у польоті, описується квадратичною моделлю [133]:

$$R = C_x \rho \frac{v^2}{2} SM, \tag{4.1}$$

де C_x– інтегральний коефіцієнт опору,

ρ– щільність повітря,

v–швидкість снаряда,

S– площа миделевого розтину снаряда,$P_i P_j$

$M = v/c$– число Маха,

c– швидкість звуку в повітрі.

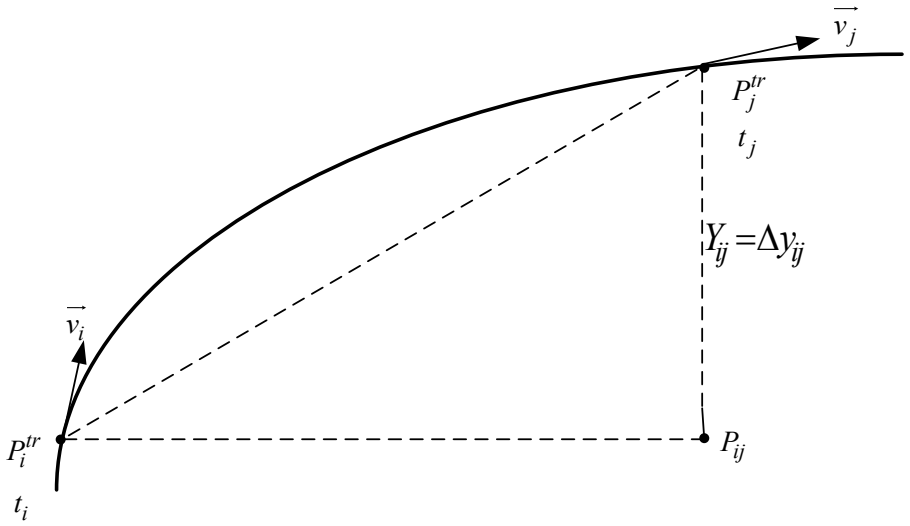


Рис. 4.3 Розрахункова ділянка траєкторії.

Вектор $\vec{R}$ направлений протилежно вектору $\vec{v}$, відповідно сила R надає снаряду негативного прискорення

$$a = R/m, \tag{4.2}$$

де m– маса снаряда.

Тоді швидкість снаряда в точці P_j^{tr}

$$v_j = v_j - C_x \rho \frac{v^2}{2} SM/m. \tag{4.3}$$

Наближена довжина відрізка траєкторії

$$\mathrm{P}_i^{tr} P_j^{tr} = v_i \Delta t_{ij} - C_x \rho \frac{v^2}{2} SM/m \Delta t_{ij}^2, \tag{4.4}$$

де $\Delta t_{ij} = t_j - t_i$.

У результаті виконання обчислювальних процедур (4.1-4.4) в прямокутному трикутнику $\mathrm{P}_i^{tr} P_j^{tr} P_{ij}$ відомі дві сторони $\mathrm{P}_i^{tr} P_j^{tr}$ и $\mathrm{P}_i^{tr} P_{ij} = \mathrm{X}_j - X_i$. Тоді фіксуємо перевищення траєкторії польоту снаряда по осі Y в точці P_j^{tr} по відношенню до точки P_i^{tr}

$$\Delta Y_{ij} = \sqrt{(\mathrm{P}_i^{tr} P_j^{tr})^2 - (\mathrm{P}_i^{tr} P_{ij})^2}. \tag{4.5}$$

Висота прольоту снаряда над точкою P_j

$$Y_j = Y_j + \Delta Y_{ij}. \tag{4.6}$$

У результаті виконання описаної обчислювальної процедури отримано точки висоти підйому траєкторії снаряда над точками вимірювань $P_1^{tr}(X_1, Y_1)$, $P_2^{tr}(X_2, Y_2)$, $P_3^{tr}(X_3, Y_3)$, зокрема для точки пострілу $P_0(X_0 = 0, Y_0 = 0)$.

Крок 3. Побудуємо апроксимуючі параболи за кожною тріадою точок:

$$(P_0, P_1^{tr}, P_2^{tr}) - Y_1 = A_1 X^2 + B_1 X,$$

$$(P_0, P_2^{tr}, P_3^{tr}) - Y_2 = A_2X^2 + B_2X, \quad (4.7)$$
$$(P_0, P_1^{tr}, P_3^{tr}) - Y_3 = A_3X^2 + B_3X\ .$$

Ще одну апроксимуючу параболу можна побудувати за чотирма точками:

$$(P_0, P_1^{tr}, P_2^{tr}, P_3^{tr}) - Y_4 = A_4X^2 + B_4X. \quad (4.8)$$

Кожна з апроксимуючих парабол є моделлю руху снаряда, що певною мірою компенсує випадкові збурення при пострілі. Точки перетину апроксимуючих парабол з поверхнею (ненульові корені парабол) $\mathrm{P}_*^1, \mathrm{P}_*^2, \mathrm{P}_*^3, \mathrm{P}_*^4$, є приблизним оцінюванням точки падіння снаряда. Середнє арифметичне точок перетину апроксимуючих парабол з поверхнею $X_*^0 = (X_*^1 + X_*^2 + X_*^3 + X_*^4)/4$** є усередненою оцінкою точки приземлення снаряда із компенсованими випадковими збуреннями.

Слід зазначити, що насправді будується більше, ніж чотири апроксимуючі параболи, але в результаті для оцінювання X_*^0 вибираються саме чотири, що регламентуються викладеним нижче алгоритмом.

Алгоритм визначення знаків ΔY_{ij}

Під час розрахунку у співвідношеннях (4.2-4.6) передбачалося, що точка j знаходиться на траєкторії вище від точки i. У реальній ситуації Y -координата точки i може бути більшою за Y -координати точки j. Це може бути зокрема, якщо точка j знаходиться на низхідній гілці траєкторії снаряда. Тому при оцінюванні ΔY_{ij} за виразом (4.5) слід враховувати як позитивні, так і негативні значення ΔY_{ij}. Відповідно для кожної точки $P_j, (j = 1,2,3)$ слід розраховувати два значення висоти прольоту снаряда над точкою P_j:

$$Y_j^+ = Y_j + \Delta Y_{ij};\ Y_j^- = Y_j + \Delta Y_{ij}. \quad (4.9)$$

Далі під час структурування апроксимуючих парабол для кожної точки $P_j, (j = 1,2,3)$, що входить в тріаду (4.7) або тетраду, (4.8) будуються дві параболи – $Y_j^+ = A_j^+ X^2 + B_j^+ X$ и $Y_j^- = A_j^- X^2 + B_j^- X, (j = 1,2,3)$. Потім по кожній із двох парабол визначається відстань від апроксимуючої точки приземлення $\Delta_j^+ \left| X_{*j}^+ - X_* \right|, (j = 1,2,3)$ і $\Delta_j^- \left| X_{*j}^- - X_* \right|, (j = 1,2,3)$. В ролі «правильної» апроксимуючої параболи вибирається парабола з меншим значенням Δ_j, $(j = 1,2,3)$.

Врахування взаєморозташування точок P_j і P_i, що забезпечує запропонований алгоритм, призводить до формування на кроці 3 описаного методу чотирьох «правильних» апроксимуючих парабол.

4.6 Імітаційне моделювання методу верифікації пострілу

Запропонований метод апробований для стрільби із гаубиці FH70 снарядом M107 калібру 155 мм. Характеристики снаряда [134]: маса 43 кг, діаметр 0,15471м, початкова швидкість (заряд повний №8) 684.3 м/с. Підготовка стрільби – повна. Для розрахунків прийняті ρ =1.2041 кг/м3, с=341,6 м/с, координата точки прицілу X_*=25000 м. Інтегральний коефіцієнт опору C_x брався з таблиць [134]. X-координати точок вимірювання: $X(P_1)$ = 4900 м,$X(P_2)$ =10000 м,$X(P_3)$ =16000 м. Часи прольоту точок вимірювання з урахуванням випадкових збурень $\hat{t_i}(i = 1,2,3)$ формувалися таким чином: в табличні часи прольоту вносились 5% випадкових збурень:

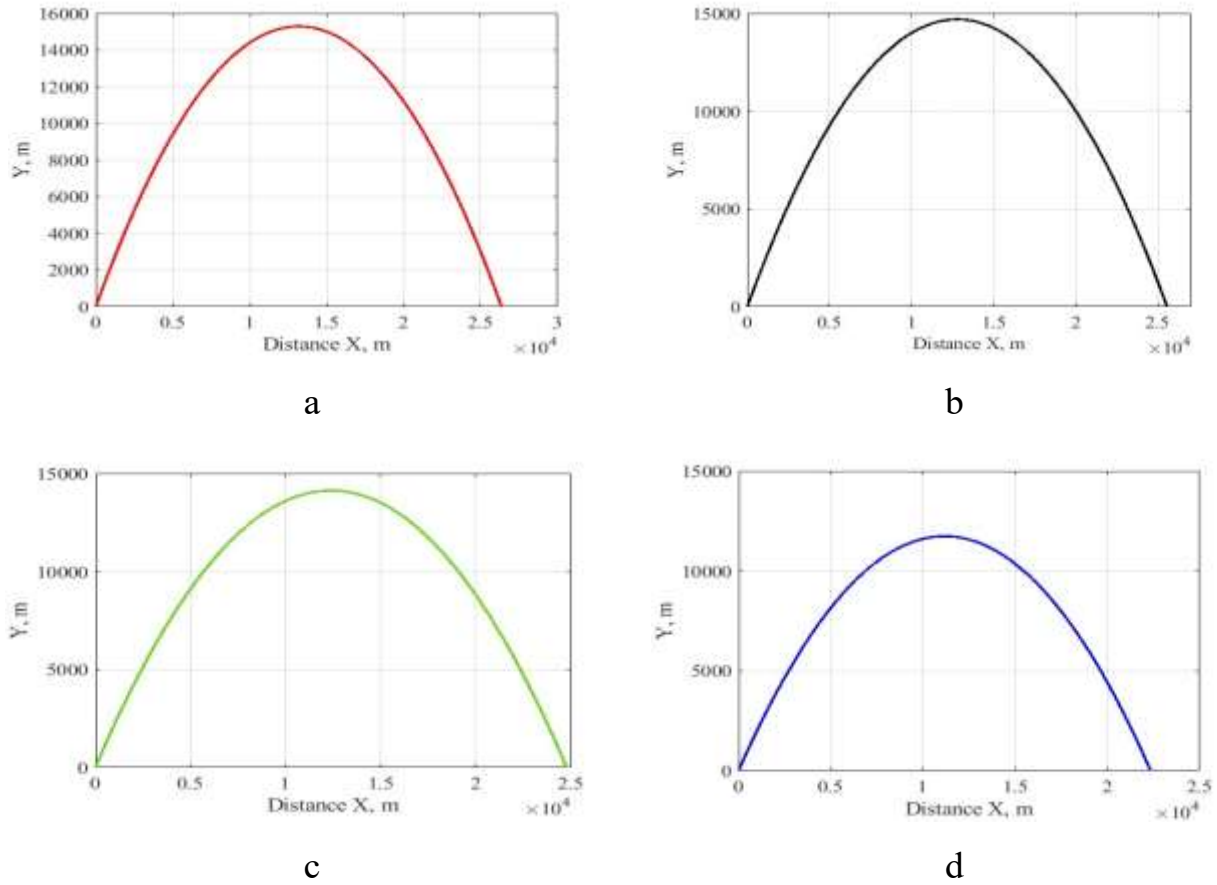
$$\hat{t_i} = t_i^{FT} + \Delta t_i, \Delta t_i \in rand[0.95\Delta t_i; 1.05\Delta t_i](i = 1,2,3).$$

Змодельовані параметри наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 − Параметри імітаційного моделювання методу верифікації пострілу

Змодельований параметр	Параметри, що відповідають точкам розміщення мікрофонів на лінії напрямку стрільби		
	1	2	3
Координата цілі за прицілом, м;	25000		
Відстань від гармати до вимірювального мікрофона, м	4900	10000	16000
Час реєстрації балістичної хвилі, с	10,5	22,2	39,7
Висота прольоту над точкою вимірювання Y_j,м	3634	6163	6686

За розробленою методикою побудовані чотири апроксимуючі параболи (рис. 4.4). Результати моделювання наведено в Таблиці 4.2.



a b

c d

Рис.4.4 Апроксимуючі параболи (побудовані: a – по точках P_0, P_1, P_2, b – по точках P_0, P_1, P_3, c – по точках P_0, P_2, P_3, d – по точках P_0, P_1, P_2, P_4).

Таблиця 4.2 − Результати моделювання методу верифікації пострілу

Результати моделювання		Апроксимуючі параболи			
		№1	№2	№3	№4
Прицільна дальність X_*, м		25000			
Коефіцієнти рівняння параболи $Y = AX^2 + BX$	A	-0,000092	-0,000090	-0,000090	-0,000088
	B	2,28	2,30	2,11	2,32
X_*^i, м		25070	25060	24610	22850
$\underline{X_*}$, м		24390			

Для наочності процесу апроксимації на рис.4.5 наведені кінцеві ділянки апроксимуючих парабол.

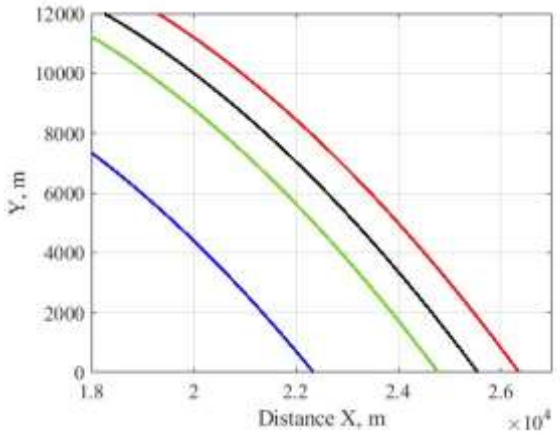


Рис. 4.5 Кінцеві ділянки апроксимуючих парабол.

Імітаційне моделювання запропонованого методу верифікації пострілу демонструє два основні результати.

1. Метод верифікації за рахунок застосування системи апроксимуючих парабол компенсує випадкові збурення з фіксацією похибки близько 0,5% від дальності стрільби.

2. Запропонований метод дозволяє провести верифікацію за одним пострілом з отриманням результатів ще до приземлення снаряда.

4.7 Порівняльний аналіз методів

Порівняльний аналіз запропонованого методу реєстрації координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею з методом компенсації випадкових збурень шляхом послідовних коригувальних пострілів дозволив виявити їх переваги й недоліки.

Для демонстрації переваг запропонованого методу було проведено модельний розрахунок стрільби на ту саму дальність з використанням програми точного розрахунку траєкторії, що базується на стандарті НАТО STANAG 4355 [135]. Модель польоту снаряда за вказаним стандартом описує снаряд як рухому матеріальну точку з 5-ма ступенями свободи. На даний момент вона вважається найточнішим описом траєкторії снаряда для великих калібрів. Повне моделювання, відповідно до [135], проводилося з використанням програмного коду Matlab, наведеного у [136]. Для створення еквівалентних умов моделювання випадкові збурення вносилися шляхом псевдовипадкової зміни початкової швидкості снаряда:

$$v_0^{dist} = v_0^{FT} + \Delta v_0, \Delta v_0 \in rand[0.975v_0^{FT}; 1.025v_0^{FT}]. \quad (4.10)$$

Після кожного пострілу оцінювалося відхилення точки падіння снаряда та здійснювалася його компенсація методом артилерійської вилки з корекцією кута прицілу на подальших пострілах. На рис. 4.6 наведено траєкторії польоту снаряда для п'яти послідовних пострілів. Результати моделювання наведено у таблиці 4.3.

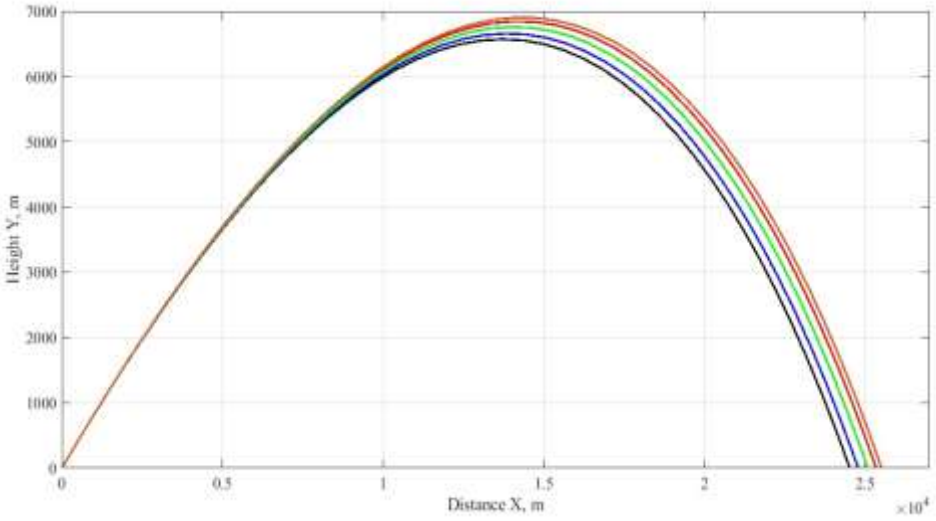


Рис. 4.6. Розрахункові балістичні траєкторії для п’яти пострілів з подальшою корекцією.

Таблиця 4.3 − Результати моделювання компенсації випадкових збурень послідовними пострілами по моделі STANAG 4355

Результати моделювання	Номери пострілів				
	№1	№2	№3	№4	№5
Прицільна дальність X_*, м	15000				
X_i, м	24550	25530	24750	25300	25120
$\underline{X_*}$, м	25120				

На рис. 4.7 наведено кінцеві ділянки балістичних траєкторій для п’яти послідовних пострілів.

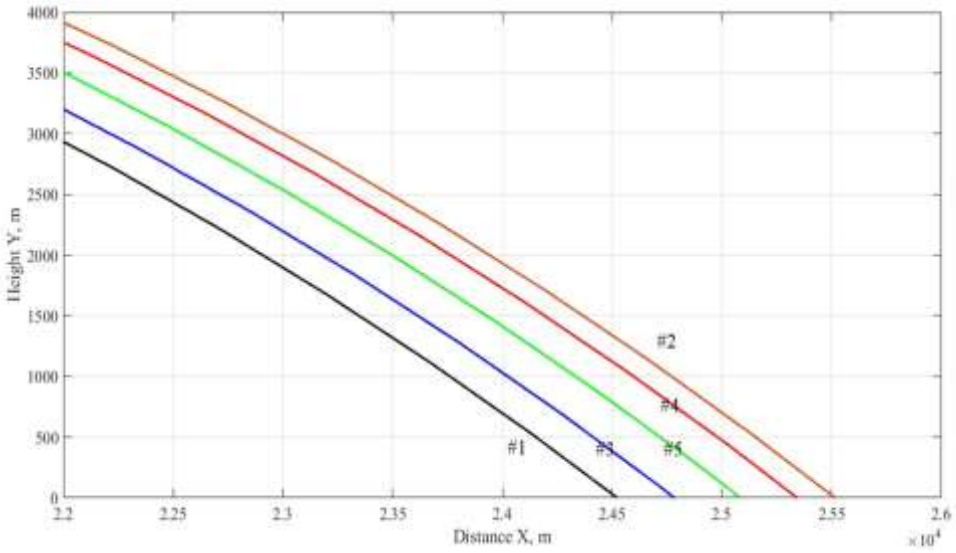


Рис.4.7 Кінцеві ділянки балістичних траєкторій для п’яти послідовних пострілів.

Результати моделювання засвідчили, що для компенсації випадкових збурень до рівня похибки 0,5% від дальності метод традиційного пристрілу потребує, як мінімум, п'яти послідовних пострілів.

Для констатації ефективності запропонованого методу верифікації пострілу проведено натурний польовий експеримент з реєстрацією реальних сигналів балістичної хвилі під час навчальної стрільби 152 мм причіпної гармати 2А36 "Гіацинт-Б". Три комплекти вимірювальної апаратури були розміщені на відстанях 5400 м, 7800 м та 10000 м від вогневої позиції. Кожен комплект включав конденсаторний мікрофон Rode NT-USB, 16-розрядний АЦП TASCAM і каналоутворювальну апаратуру радіозв'язку з вогневою позицією, на якій розміщено ще один вимірювальний комплект. Уся вимірювальна апаратура була синхронізована. У зв'язку з високим рівнем акустичних перешкод і низьким відношенням сигнал/шум сигнал балістичної хвилі реєструвався в спотвореному вигляді (рис.4.8). Визначення моменту її появи межовим методом у таких умовах значно ускладняється, тому встановлення часу реакції вимірювальних мікрофонів на балістичну хвилю здійснювалося

шляхом визначення максимуму крос-кореляційної функції сигналів у точці вимірювання та сигналу на вогневій позиції крос-кореляційної функції сигналів у точці вимірювання $s_i(t)$ та сигналу на вогневій позиції $s_0(t)$ [137]:

$$\hat{t_i} = R\ (s_i(t), s_0(t)), (i = 1,2,3). \tag{4.11}$$

Вигляд крос-кореляційної функції показано на рис. 4.9.

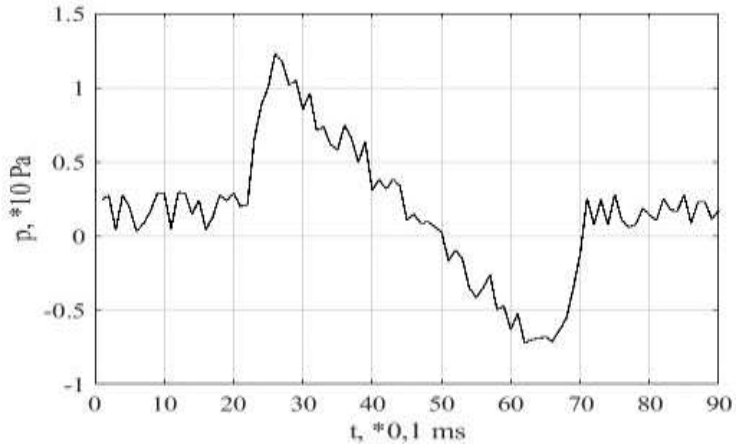


Рис.4.8 Сигнал балістичної хвилі, зареєстрований в точці вимірювання #1 [43]

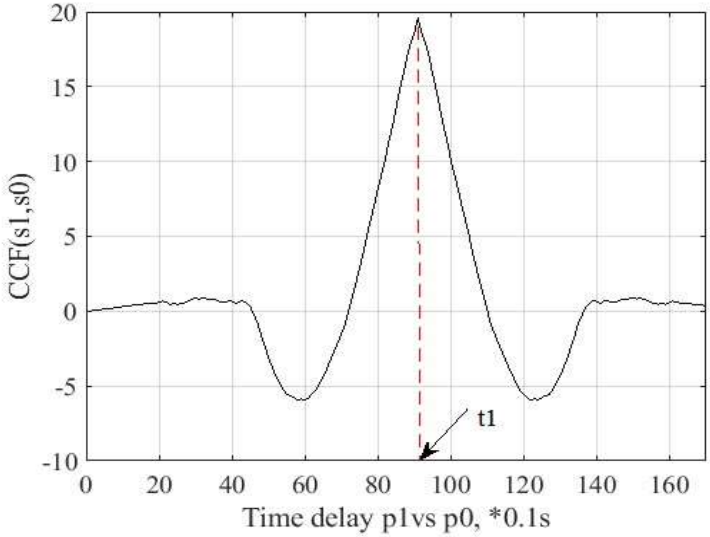


Рис.4.9. Вигляд крос-кореляційної функції сигналів у точці 1 і на вогневій позиції [43]

Результати польового експерименту наведено в табл. 4.4 та табл. 4.5. Зазначимо, що в даному випадку побудовано лише три апроксимуючі параболи за трьома точками кожна.

Таблиця 4.4 − Параметри експериментальної перевірки методу верифікації пострілу

Параметр	Параметри, що відповідають точкам розміщення мікрофонів на лінії напрямку стрільби		
	1	2	3
Координата цілі за прицілом, м;	15000		
Відстань від гармати до вимірювального мікрофона, м	5400	7800	10000
Час реєстрації балістичної хвилі, с	8,5	14,8	19,7
Висота прольоту над точкою вимірювання Y_j,м	3634	6163	6686

Таблиця 4.5 − Результати експериментальної перевірки методу верифікації пострілу

Результати моделювання		Апроксимуючі параболи		
		№1	№2	№3
Прицільна дальність X_*, м		15000		
Коефіцієнти рівняння параболи $Y = AX^2 + BX$	A	-0,000096	-0,000088	-0,000080
	B	1,32	1,28	1,19
X_*^i, м		13790	14550	15100
$\underline{X_*}$, м		14480		

У процесі польових випробувань запропонований метод забезпечив компенсацію випадкових збурень на рівні 3,5% від дальності. Цей показник

значно перевищує результат, отриманий в імітаційному експерименті. Однак, враховуючи те, що його отримано за одним пострілом, такий результат показує цілком прийнятну якість верифікації.

Звернімося до констатації переваг та недоліків запропонованого методу верифікації пострілу. Зазначений метод верифікації з параболічною апроксимацією, як показано імітаційним моделюванням та натурним експериментом, дає можливість компенсувати випадкові збурення до цілком прийнятних значень похибок стрільби вже за одним пострілом [16, 17, 18, 19].

Обчислення, що супроводжують побудову апроксимуючих парабол, досить прості і можуть бути виконані на планшеті командира артилерії. Рекомендований метод скорочує час вогневої реалізації зброї, зменшує витрати снарядів. У такий спосіб він пропонує нові можливості збереження боєздатності зброї в контрбатарейній боротьбі. Головним недоліком розробленого методу верифікації є необхідність спеціальної апаратури для реєстрації звукових полів та розміщення її вздовж лінії вогню. Однак актуальною є інформація про розробку подібної апаратури та її пілотне застосування [138, 139]. По результатам викладеного матеріалу четвертого розділу можна константувати, що вперше запропоновано метод відслідковування артилерійського пострілу при дії на нього випадкових збурень на основі реєстрації балістичної та дульної хвиль, утворених пострілом і снарядом, що дозволило здійснити верифікацію стану пострілу артилерійської гармати і визначити точку зустрічі снаряда з поверхнею на основі параболічної апроксимації його характеристик.

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження містить отримані автором самостійно нові науково обґрунтовані результати, які визначили найкращий час виконання бойової задачі артилерійською гарматою при тривалих динамічних збуреннях за рахунок удосконалення імітаційних моделей та методів керування станами для забезпечення мінімальної втрати її боєздатності. Отримані результати дозволяють зробити такі висновки.

1. На основі зовнішнього прояву пострілу та аналізу літератури виділено явище утворення сажі в порохових газах. Визначено термохімічну реакцію (диспропорціонування монооксиду вуглецю), що пояснює утворення сажі в ПГ у процесі пострілу. Зазначено умови її можливого вияву.

Визначено причину неможливості опису явища утворення сажі при використанні існуючих моделей процесів внутрішньої балістики. В її основі лежить відсутність урахування розподілу температури ПГ по довжині ствола та її зміна в процесі пострілу. Запропоновано модель, яка дозволяє оцінити такі зміни температури ПГ.

Проведено моделювання розподілу температури ПГ у просторі ствола між зарядною коморою і рухомим снарядом у модельній системі. Показано можливість зміни протяжності зони тривалості реакції Будуара-Белла (зони утворення сажі) залежно від вихідних даних. Моделювалося використання свіжого порохового заряду та деградуючого. Розглядався повний та зменшений заряд.

2. Для аналізу станів було застосовано критерій ефективності як результат розрахунку згортки показників точності, виконання, витрати снарядів за методом ідеальної точки. Показники було віднормовано до максимального їх значення. Неефективним є постріл, швидкість якого відповідає умові: $v_0<0{,}95v_{table_fire}$. Ефективним є постріл, при якому артилерійський снаряд потрапляє в коло радіусу R=1 % D з імовірністю не менше 0,5

Розробка Марківської моделі для аналізу ефективності послідовної стрільби артилерійських підрозділів є значним кроком вперед в оптимізації бойових дій. Враховуючи випадкові порушення, властиві кожному пострілу, наприклад знос компонентів пістолета та неповну інформацію про боєприпаси, модель забезпечує точніше представлення реальних сценаріїв стрільби. Це покращене розуміння дозволяє краще приймати рішення щодо часу та виконання артилерійського вогню, що зрештою покращує показники успіху місії. Крім того, адаптивний характер процесу управління, коли неефективні установки усуваються від виконання завдань, підкреслює важливість гнучкості та ефективності у військових операціях. Постійно переоцінюючи та коригуючи склад артилерійських підрозділів, що беруть участь, залежно від продуктивності, командири можуть максимізувати загальну ефективність своєї вогневої потужності, мінімізуючи втрату ресурсів. Цей підхід не тільки покращує результати на полі бою, але й відображає стратегічне зобов'язання щодо оптимізації ресурсів і оперативної досконалості в сучасній війні.

Розроблено модель керуванням бойовим застосуванням артилерійської установки. Артилерійська установка одної з протиборчих сторін повинна виконати бойове завдання, яке полягає в знищенні стаціонарної цілі n снарядами при повній підготовці стрільби з можливістю зміни вогневої позиції. Для розв'язання поставленої задачі було введено припущення про наявність вогневих позицій і пострілів n, необхідних для ураження цілі. Динаміка системи взаємодії «артилерійська установка атакуючої сторони − ціль − артилерійська установка протидіючої сторони» розглядається в процесах дій. Модель визначає зменшення боєздатності в часі за рахунок: раптових відмов, зносових відмов при проведені бойової роботи та відмов при руйнуванні протиборчою стороною при вражені. Модель враховує, що всі постріли ефективні, тобто ймовірність влучання кожного більше ніж 50%. В модель введено припущення,

що кількість вогневих позицій дорівнює кількості пострілів, необхідних для ураження цілі.

Розроблено метод пошуку рішення про стан виконання бойової задачі за рахунок введення поняття поточної структури виконання завдання, що є послідовністю кількості пострілів на кожної з вогневих позицій та номерів доріг, по яким відбувається зміна позицій. Відома кількість, вхідних параметрів і кількість змінних аргументів дозволили отримати всі можливі розв’язки прямим перебором.

Запропонований метод розрахунку моделі бойового застосування артилерійської установки включає загальний алгоритм розрахунку і спеціалізовані алгоритми. Спеціалізований алгоритм “Позиції” визначає поточну кількість снарядів, що використовуються на кожній з позицій. Спеціалізований алгоритм “Зміна позиції” визначає послідовність номерів доріг, використаних при зміні позицій з одної на іншу.

Для запропонованої тактики виконання бойового завдання артилерійською установкою «сховався і вистрілив» в подальшому необхідно найти найкращі розв’язки для можливої групи змінних аргументів при врахуванні відносної цінності артилерійської установки атакуючої сторони та цілі по який виконується бойове завдання і збитків для атакуючої сторони які виникають якщо ціль не знищується.

3. Розроблено та досліджено метод верифікації артилерійського пострілу з випадковими збуреннями. Метод заснований на реєстрації балістичної хвилі, утвореної снарядом, що летить траєкторією, яка розподілена у просторовому відношенні системою акустичних сенсорів.

Розроблений метод дає можливість верифікувати постріл ще до приземлення снаряда та його розриву. Обчислювальний імітаційний експеримент продемонстрував, що розроблений метод дозволяє суттєво обмежити час вогневої реалізації зброї та зменшити витрати снарядів при

компенсації випадкових збурень у порівнянні з традиційним пристрілом. Натурна польова перевірка підтвердила правильність основних наукових та технічних концепцій, покладених в основу дослідженого методу верифікації.

4. Наукове дослідження виконано в Національному університеті «Одеська політехніка» і є складовою частиною держбюджетної НДР за темою «Підвищення ефективності АСК спеціального призначення за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів» НДР № 224-47 (№ ДР 0122U200907). Прикладні результати наукового дослідження на національному конкурсі МО ЗСУ одержали перемогу в номінації «Кращий винахід 2023 року» у Сухопутних і Десантно-штурмових військах, що знайшло застосування в патенті України на винахід № 127193. Спосіб визначення координати зустрічі артилерійського снаряда з поверхнею.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції (Львов, 17-18 травня 2018 року). Львов: НАСВ, 2018. 389 с.

2. А.Г. Додонов, А.В. Никифоров, В.Г. Путятин. Тенденции и проблемы развития автоматизации управления военными силами. *Математичні машини і системи*, 2019. № 3. С. 3–16.

3. В. И. Слюсар. Информационные технологии в артиллерийских системах стран НАТО. *Озброєння та військова техніка* №3 (19).2018. С. 69-75.

4. Л.С. Демидко, П.Є. Трофименко, Г.В. Сорокоумов, І.С. Луговський. Напрями удосконалення автоматизованих систем управління для артилерії сухопутних військ збройних сил України. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 2(54). С.83-88. DOI: 10.30748/soivt.2018.54.11

5. Ratliff T. M. Field artillery and fire support at the operational level: An analysis of operation *Desert storm and operation Iraqi freedom* : monograf. 2017. 44 p. URL: https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1039906.pdf.

6. Bowman T. U.S. military trainers teach Afghan troops to wield artillery. National Public Radio (2016, July 5). URL: https://www.wkms.org/2016-07-05/u-s-military-trainers-teach-afghan-troops-to-wield-artillery.

7. Fox M. A. Understanding modern Russian war: Ubiquitous rocket, artillery to enable bttlefield swarming, siege warfare. *Fires Bulletin*. 2017. 107. 20–25.

8. Younglak Shim, Michael P. Atkinson, analysis of artillery shoot-and-scoot tactics. *Naval Research Logistics.* April 2018. Vol. 65, Issue 3. P. 242–274. DOI: https://doi.org/10.1002/nav.21803.

9. Brunetkin O. Maksymov M. Brunetkin V. Maksymov O. Dobrynin Y. Kuzmenko V. Gultsov P. Development of the model and the method for determining

the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4/1 (112). . P. 41–53. Indexed in SCOPUS, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239150

10. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Моделювання утворення дульного викиду як діагностичної ознаки про стан пострілу. *Science and society: modern trends in a changing world*. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Vienna, Austria, 2024. P. 184-190. URL: URL: https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-society-modern-trends-in-a-changing-world-22-24-01-2024-viden-avstriya-arhiv/.

11. Boltenkov V, Brunetkin O, Maksymova O, Kuzmenko V, Gultsov P, Demydenko V., Soloviova O. Devising a method for improving the efficiency of artillery shooting based on the Markov model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. Vol 6. № 3 (114). P. 6-17. Indexed in SCOPUS, doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245854.

12. O. Maksymova, V. Boltyonkov, P. Gultsov, O. Maksymov. Improvement of the model and method of artillery installation target damage control with minimal combat capability loss. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. Issue 2(68).Dec. 2023. 98–115. DOI: https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.1.

13. Спосіб визначення координати зустрічі артилерійського снаряда з поверхнею: патент України на винахід. № 127193; заявл. 28.04.21 ; опубл. 25.04.14, опубл. 31.05.2023, Бюл. №22.

14. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Удосконалення моделі керування бойовою здатністю артилерійської гармати. *Topical aspects of modern scientific research*. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2024. P. 256-261.

URL: https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-topical-aspects-of-modern-scientific-research-25-27-01-2024-tokio-yaponiya-arhiv/.

15. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Метод параболічної апроксімації визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з поверхнею. *Modern problems of science, education and society*. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2024. P. 324-330. URL: https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-problems-of-science-education-and-society-5-7-02-2024-kiyiv-ukrayina-arhiv/.

16. Maksymov M.V., Boltenkov V. O., Gultsov P. S., Maksymov O. M., Verification of artillery fire under the influence of random disturbances for the computer game ARMA 3. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023; Vol.6, No.4. p. 362–375. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.24.

17. Maksymova, O.B., Boltenkov, V.O., Maksymov M. V., Gultsov, P.S. Maksymov, O.M. Development and Optimization of Simulation Models and Methods for Controlling Virtual Artillery Units in Game Scenarios. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023. Vol.6, No.4, p.320–337.DOI: https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.21.

18. Спосіб визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати: пат. України на винахід. № 155822., заявл. 05.04.21 ; опубл. 24.04.24. Бюл. № 17.

19. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Удосконалення методу керування бойовою здатністтю артилерійської гармати. European congress of scientific achievements. Proceedings of the 1st International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2024. P.120- 125. URL: https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya -european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv/

20. Kopp, C. Artillery for the Army: Precision fire with mobility. *Defence Today*. 2005; 4(3): p.12–16.

21. Koba, M. Artillery strike force. Fort leavenworth, kansas: school of advanced military studie. *United States Army Command And General Staff College*. 1996. https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA324363.pdf

22. Sharp J. Lebanon: The Israel-Hamas-Hezbollah conflict. Washington, DC: Congressional research service. 2006. 43 p. URL: https://www.files.ethz.ch/isn/118864/2006-09-15_Israel_Hezbollah.pdf.

23. Miller S. W. Shoot and scoot. Armada International. August 28, 2017. URL: https://www.armadainternational.com/2017/08/shoot-scoot-artillery/.

24. Brett Tinde. FA embraces ‘hide and seek’ artillery tactics at USAREUR exercises. 08.01.2017. URL: https://www.dvidshub.net/news/243263/3-29-fa-embraces-hide-and-seek-artillery-tactics-usareur-exercises.

25. Alexander R. M. An analysis of aggregated effectiveness for indirect artillery fire on fixed targets. Master’s thesis. *Georgia Institute of Technology*. 1977. URL: https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/c7a2dd7a-3d02-4810-a9f8-ac8ba4684036/content.

26. Nadler J. & Eilbott J. Optimal sequential aim corrections for attacking a stationary point target. *Operations Research*. 1971. Vol. 19(3). P. 685–697. URL: https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/opre.19.3.685.

27. Donald R. Barr, Larry D. Piper. A model for analyzing artillery registration procedures. operations research. *Informs*. 1972. Vol. 20(5). P. 1033–1043. DOI: https://doi.org/10.1287/opre.20.5.1033.

28. Kwon O., Lee K., Park S. Targeting and scheduling problem for field artillery. *Computers & Industrial Engineering*. 1997. Vol. 33(3–4). P. 693–696. DOI: https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00224-6.

29. Cha Young-Ho, Kim Yeong-Dae. Fire scheduling for planned artillery attack operations under time-dependent destruction probabilities. *Omega. Elsevier*. 2010. Vol. 38(5). P. 383–392. DOI: https://doi.org/10.1016/j.omega.2009.10.003.

30. Shim Y. An analysis of shoot-and-scoot tactics. *Master's thesis.* Naval Postgraduate School. 2017. URL: https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1046113.pdf.

31. Temiz Y. Artillery survivability model. *Master's thesis*. Naval Postgraduate School. 2016. URL: https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD1026840.pdf.

32. Finlon M. A. Analysis of the field artillery battalion organization using a Markov chain. *Master's thesis*. Naval Postgraduate School. 1991. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/36720787.pdf.

33. Guzik D. M. Markov model for measuring artillery fire support effectiveness. *Master's thesis*. Naval Postgraduate School. 1988. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/36716303.pdf.

34. Akman, Çağlar. Multishooter Localization with Acoustic Sensors. 2017, 104 p. http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12621435/index.pdf

35. T. Mäkinen, P. Pertilä and P. Auranen, Supersonic bullet state estimation using particle filtering, 2009 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications, Kuala Lumpur, 2009, pp. 150–155, doi: 10.1109/ICSIPA.2009.5478625. DOI: 10.1109/ICSIPA.2009.5478625

36. Zhao, X. Y., Zhou, K. D., He, L., Lu, Y., Wang, J., Zheng, Q. Numerical Simulation and Experiment on Impulse Noise in a Small Caliber Rifle with Muzzle Brake. *Shock and Vibration*, 2019, 1–12. doi: https://doi.org/10.1155/ 2019/5938034

37. R.C. Maher and S.R. Shaw. Deciphering gunshot recordings. Proc. Audio Engineering Society 33rd Conference, Audio Forensics—Theory and Practice, Denver, CO, June 2008.P.1–8. http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14410

38. E.V.Rabinovich, N.Y. Filipenko, G.S. Shefel. Generalized model of seismic pulse. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018. Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018) 052025. P.1–5 doi

:10.1088/1742–6596/1015/5/052025 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/5/052025/pdf

39. Morten Huseby. Noise emission data for M109, 155 mm field howitzer. *Norwegian Defence Research Establishment* (FFI) 2007. 45 p. https://publications.ffi.no/nb/item/asset/dspace:3388/07-02530.pdf. doi:10.21236/ada299215.

40. Wilson, D. K., & White, M. J. Discrimination of Wind Noise and Sound Waves by Their Contrasting Spatial and Temporal Properties. *Acta Acustica United with Acustica*. 96(6). p. 991–1002. doi:10.3813/aaa.918362 DOI:10.3813/AAA.918362

41. Becker, G., & Güdesen, A. Passive sensing with acoustics on the battlefield. *Applied Acoustics.* 59(2). P.149–178. doi:10.1016/s0003-682x(99)0002 https://doi.org/10.1016/S0003-682X(99)00023-7

42. Olexander Brunetkin, Vitalii Kuzmenko, Olha Soloviova. Mathematical model of energy transformation processes in barrel system for determining shooting perfomance. *Published by Lviv Polytechnic National University*. JEECS. 2022. Volume 8, Number 1: p. 28 – 39. https://doi.org/10.23939/jeecs2022.01.028, (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

43. Dobrynin Ye.V., Boltenkov V.O., Kuzmenko V.V., Maksymov O.M. Development of a universal binary classifier of the state of artillery barrels by the physical fields of shots. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022. Vol.5 No.4. pp.117–134. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

44. Maksymov M. V., Kuzmenko V. V., Soloviova O. V. The model method for determining the temperature of powder gases along the barrel length. *Results of modern scientific research and development*. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Madrid, Spain. 2021. Pp. 95-99. URL: https://sci-conf.com.ua/vii-mezhdunarodnaya-

nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-results-of-modern-scientific-research-and-development-19-21-sentyabrya-2021-goda-madrid-ispaniya-arhiv/.

45. Тарахтій О. С., Кузьменко В. В. Автоматизоване діагностування пострілів артилерійської гармати на основі параметрів, які мають різну фізичну природу виникнення. *Eurasian scientific discussions*. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2022. P. 21-27. URL: https://sci-conf.com.ua/x-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-eurasianscientific-discussions-23-25-10-2022-barselona-ispaniya-arhiv/

46. Тарахтій О. С., Максимов О. М., Кузьменко В. В. Автоматизоване діагностування пострілів артилерійської гармати на основі параметрів, які виникають при розширенні порохових газів та вільного вуглецю в повітрі атмосфери. *Progressive research in the modern world*. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. BoScience Publisher. Boston, USA. 2022. P. 184-191. URL: https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-progressive-researchin-the-modern-world-2-4-11-2022-boston-ssha-arhiv/.

47. А. Ліцман, Д. Нестеров. Визначення ступеня впливу окремих факторів на частоту відмов механічного обладнання артилерійського озброєння під час його експлуатації. Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки. Том 80 № 2 (2019). С. 283-299.

48. Гончаренко П.Д. Современные средства контроля износа канала орудийного стволу. П.Д. Гончаренко, В.Л. Хайков. Збірник наукових праць. Академія військово-морських сил імені П.С. Нахімова. Випуск 1(9), 2012, С.22- 27.

49. Li, X., Mu, L., Zang, Y., & Qin, Q. Study on performance degradation and failure analysis of large caliber gun barrel. *Defense Technology*. doi:10.1016/j.dt.2019.05.008.

50. Banerjee, A., Nayak, N., Giri, D., & Bandha, K. Effect of Gun Barrel Wear on Muzzle Velocity of a typical Artillery Shell. 2019 International Conference on Range Technology (ICORT). doi:10.1109/icort46471.2019.9069641.

51. Maciąg, P., & Chałko, L. (2019). Use of sound spectral signals analysis to assess the technical condition of mechanical devices. MATEC Web of Conferences, 290, 01006, p.1–13. doi:10.1051/matecconf/201929001006.

52. Brunetkin O.,Dobrynin Y., Maksymenko A., Maksymova O., Alyokhina S. Model and method of conditional formula determination of oxygen-containing hydrocarbon fuel in combustion . *Energetika*. T. 66. Nr. 1. 2020 P. 1–11.

53. E. Dobrynin, M. Maksymov, V. Boltenkov. Development of a Method for Determining the Wear of Artillery Barrels by Acoustic Fields of Shots. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 3, No 5 (105). 2020, p.6–18. doi.org/10.15587/1729–4061.2020.206114

54. Dobrynin Y., Volkov V., Maksymov M., Boltenkov V. The Development of Physical Models for Acoustic Wave Formation at the Artillery Shot and Study of Possibilities for Separate Registration of Various Types Waves. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 4, No 5 (106). 2020. p.6 – 15.

55. Dobrynin Y., Brunetkin O., Maksymov M., Maksymov O. Constructing a method for solving the Riccati equations to describe objects parameters in an analytical form. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 3, No 4 (105). 2020. p.20–26. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.205107

56. Dobrynin Ye., Davydov V. Simulation Model of the Information Technology for the Technical Diagnosis of Impulse Heat Machine. *Праці Одеського*

політехнічного університету. 2020. Вип. 2(61). С. 95-103. DOI: 10.15276/opu.2.61.2020.11

57. Dobrynin Ye.V., Boltenkov V.O., Maksymov M.V. Information Technology for Automated Assessment of the Artillery Barrels Wear Based on SVM Classifier. *Applied Aspects of Information Technology.* 2020. Vol.3 No.3, pp. 117- 134

58. Добринін Є. В. Максимов М. В., Болтьонков В. О. Оцінка зносу артилерійських стволів за акустичними сигналами пострілів. Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції «Метрологія та вимірювальна техніка» (МЕТРОЛОГІЯ – 2020), Харьків, 2020 С. 45-51, Режим доступу: http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=mvt2020&L=74

59. Добринін Є. В. Використання результатів прямих вимірювань акустичних полів пострілу для оперативного діагностування стану гарматного стволу. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції “Спільні дії військових формувань на правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи”. Одеса, 2020. С.269-270. Режим доступу: http://vaodessa.mil.gov.ua/images/docs/conference/2020/10.09/Збірник20тез20доповідей.pdf

60. Добринін Є., Максимов М., Болтьонков В. Автоматизована система контролю зносу артилерійських стволів за акустичними полями пострілів. Матеріали XV міжнародної конференції "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2020)", м. Вінниця: ВНТУ, 8-10 жовтня 2020 р. С.53-59. http://ir.lib.vntu.edu.ua//handle/123456789/30660.

61. Добринін Є. В, Болтьонков В. О., Максимов М. В. Інформаційна технологія автоматизованої оцінки зносу артилерійських стволів на основі аналізу акустичних полів пострілу. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології і автоматизація – 2020», м. Одеса, 22-23 жовтня 2020 р. Тези доповідей. – Одеса: ОНАПТ. 2020. С. 87-94

62. Живучесть нарезных и гладких стволов при использовании боеприпасов послегарантийных сроков хранения / О.Б. Анипко, Ю.М. Бусяк, П.Д. Гончаренко, В.Л. Хайков. Севастополь: Академия ВМС им. П.С. Нахимова. 2012. 208 с.

63. Хайков В. Л. Развитие методов инструментального контроля и визуализации состояния каналов стволов артиллерийских орудий. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 3(7). С. 52-56. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpt_2013_3_7_14.

64. Аніпко О.Б., Хайков В.Л. Дефекти виробництва й старіння як основні фактори можливої ненормальної дії артилерійських боєприпасів. *Інтегровані технології та енергозбереження.* №2. 2011. С. 80-95.

65. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительных сроков хранения. Харьков.: Изд-во академии внутр. войск МВД Украины. 2010. 130 с.

66. Hanshan Li, Zhiyong Lei. The Apply on Photoelectric Detection Target and its Development in Exterior Ballistic Test System. *Procedia Engineering*. Volume 15. 2011. P. 1451-1455, doi:org/10.1016/j.proeng.2011.08.269.

67. Zhang Rong, Zhang Yi, Zhou Jikun, Huang Haiying Research on the Artillery Shell Motion Parameters Automatic Detection Technology Based on Image Processing. *Procedia Computer Science* 52, 2015. 1171–1178, doi:10.1016/j.procs.2015.05.154

68. Ryan Decker, Joseph Donini, William Gardner, Jobin John, Walter Koenig. Mass asymmetry and tricyclic wobble motion assessment using automated launch video analysis. *Defence Technology* Vol. 12, Issue 2, April 2016, P. 113-116, https://doi.org/10.1016/j.dt.2015.11.005

69. R. Decker, M. Duca, S. Measurement of bullet impact conditions using automated in-flight photography system. *Defence Technology.* 2017.Vol. № 13. P 288-294, https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.04.004

70. В.Є. Житник, В.М. Петренко, П.Є.Трофименко, В.І. Грідін. Урахування умов вильоту снаряда із каналу стволу за допомогою балістичної станції. *Системи озброєння і військова техніка*. 2011. № 2(26). С. 49–52.

71. Pinezich, J. D., Heller, J., & Lu, T. Ballistic Projectile Tracking Using CW Doppler Radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*ю 2010. 46(3). 1302–1311.
doi:10.1109/taes.2010.5545190 DOI: 10.1109/TAES.2010.5545190

72. Ka, M. H., Vazhenin, N. A., Baskakov, A. I., & Oh, C. G. Analysis of power performance of a muzzle velocity radar. In 2005 Fifth International Conference on Information, Communications and Signal Processing. 2005. pp. 218-223. doi:10.1109/icics.2005.1689038 DOI: 10.1109/ICICS.2005.1689038

73. Ю.І. Бударецький. Спосіб підвищення ефективності стрільби з гармат зі значним зносом каналу стволу. *Системи озброєння і військова техніка*. 2015. № 2(42). С. 7–9.

74. Jain, J., Soni, S., & Sharma, D. Determination of Wear Rate Equation and Estimation of Residual Life of 155mm Autofrettaged Gun Barrel. *The International Journal of Multiphysics.* 2011. 5(1), p.1–8. doi:10.1260/1750-9548.5.1.1 DOI: http://dx.doi.org/10.1260/1750-9548.5.1.1

75. Б.З. Цибуляк. Деградація параметрів стволів артилерійського озброєння в процесі експлуатації. *Військово–технічний збірник*. №14. 2016. С.121-126.

76. Robert Jankovych and Stanislav Beer. T–72 tank barrel bore wear. *International journal of mechanics.* 2011. Issue 4. Volume 5. p. 353–360. http://www.naun.org/main/NAUN/mechanics/17-292.pdf

77. Zheng, D., Tan, H., & Zhou, F. A design of endoscopic imaging system for hyper long pipeline based on wheeled pipe robot. Advances in Materials, Machinery, Electronics I AIP Conf. Proc. 2017. 1820, 060001–1–060001–10; doi: 10.1063/1.49773 https://doi.org/10.1063/1.4977316

78. Kibum Suh. A design on robot system for artillery barrel inspection. *International Journal of Pure and Applied Mathematics. Mathematics*. 2018. Vol. 118. No. 19. 1835–1844. https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4977316

79. Chang, H., Wu, Y.–C., & Tsung, T.–T. Characteristics and measurement of supersonic projectile shock waves by a 32-microphone ring array. Review of Scientific Instruments. 2011. 82(8). 084902. doi:10.1063/1.3622044 https://doi.org/10.1063/1.3622044

80. Guo S., Ma Q., Zhou X., Shao R. () Acoustic Recognition of Artillery Projectiles by SVM. In: Qian Z., Cao L., Su W., Wang T., Yang H. (eds) *Recent Advances in Computer Science and Information Engineering*. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2012. vol. 124. Pp. 345–351. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-25781-0_52 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-25781-0_52

81. Dagallier, A., Cheinet, S., Cosnefroy, M., Rickert, W., Weßling, T., Wey, P., & Juvé, D. Long-range acoustic localization of artillery shots using distributed synchronous acoustic sensors. The Journal of the Acoustical Society of America. 2019. 146(6). 4860–4872. doi:10.1121/1.5138927. https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.5138927

82. Damarla, Thyagaraju. Battlefield Acoustics. *Springer International Publishing Switzerland*. 2015. 262 p. doi:10.1007/978-3-319-16036-8 DOI: 10.1007/978-3-319-16036-8

83. Brunetkin O., Maksymova O., Trishyn F. Development of the method for reducing a model to the nondimensionalized form. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, ISSN 1729-3774, 2018, 3/4 (93), pp. 26-33, DOI: 10.15587/1729-4061.2018.132562

84. Serebryakov M. E. (1962). Vnutrennyaya ballistika stvol'nyh sistem i porohovyh raket. Moscow. 702 p

85. Carlucci D.E., Jacobson S.S. (2008). Ballistics : theory and design of guns and ammunition. *Taylor & Francis Group*. 2008. pp. 502. ISBN-13: 978-1-4200-6618-0; ISBN-10: 1-4200-6618-8; http://www.taylorandfrancis.com

86. Rashad M.M., Zhang X.B., Elsadek H. (2013). Numerical simulation of interior ballistics for large caliber guided projectile naval gun. *Journal of Engineering and Applied Science* Vol. 60. № 2. 2013. pp.163-176. https://www.researchgate.net/publication/264786882

87. Jang J., Oh S., Roh T. (2016). Development of three-dimensional numerical model for combustion-flow in interior ballistics. Journal of Mechanical Science and Technology. Vol 30. 2016, pp. 1631-1637. DOI:10.1007/S12206-016-0319-Y

88. Cheng C., Zhang X. (2013). Modeling of Interior Ballistic Gas-Solid Flow Using a Coupled Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method. ASME.J. Appl. Mech. 2013. 80(3): 031403. https://doi.org/10.1115/1.4023313

89. Li P., Zhang X. Numerical research on adverse effect of muzzle flow formed by muzzle brake considering secondary combustion. *Defence Technology*. 2020, ISSN 2214-9147. https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.06.019.

90. Steward B.J., Bauer K.W., Perram G.P. (2012). Remote discrimination of large-caliber gun firing signatures. J. Appl. Rem. Sens. 6(1) 063607, 2012. https://doi.org/10.1117/1.JRS.6.063607

91. Steward B.J., Gross K.C., Perram G.P. Reduction of optically observed artillery blast wave trajectories using low dimensionality models. Proc. SPIE 8020, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications VIII, 80200D. 2011. https://doi.org/10.1117/12.883524

92. Li X., Mu L., Zang Y., Qin Q. Study on performance degradation and failure analysis of machine gun barrel, Defence Technology. Volume 16. Issue 2. 2020. Pages 362-373. ISSN 2214-9147. https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.05.008.

93. Kriukov O., Melnikov R., Bilenko O., Zozulia A., Herasimov S., Borysenko M., Pavlii V., Khmelevskiy S., Abramov D., & Sivak V. Modeling of the process of the shot based on the numerical solution of the equations of internal ballistics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1/5 (97). P.40–46. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155357

94. Rout K.R., Gil M.V., Chen D. Highly selective CO removal by sorption enhanced Boudouard reaction for hydrogen production. *Catalysis Science & Technology*. 2019. Vol. 9, Issue 15, p. 4100–4107. doi: 10.1039/c9cy00851a

95. Krylova A.Y. Products of the Fischer-Tropsch synthesis. Solid Fuel Chem. 2014. 48, p. 22–35. https://doi.org/10.3103/S0361521914010030

96. Kogler M., Köock E.-M., Klöotzer B., Schachinger T., Wallisch W., Henn R., Huck C.H., Hejny C., Penner C. High-temperature carbon deposition on oxide surfaces by CO disproportionation. *J. Phys*. 2016Chem. C 3(120), 1795–1807. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b12210

97. Mianowski A., Robak Z., Tomaszewicz M. et al. (2012). The Boudouard–Bell reaction analysis under high pressure conditions. *J Therm Anal Calorim*. 2012. 110, p. 93–102. https://doi.org/10.1007/s10973-012-2334-2

98. Brunetkin O., Maksymov M. V., Maksymenko A., Maksymov M. M. (2019). Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4/6 (100). P. 25–31 DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176422

99. Burnham A.K., Fried L.E. Kinetics of PBX9404 aging. UCRL-CONF-224391. 7th aging, compatibility and stockpile stewardship conference. Los Alamos, NM, USA. 26-28 September 28 2006. 6 p. https://www.osti.gov/biblio/894349-kinetics-pbx9404-aging

100. Anipko O.B., Khaykov V.L. Methods analysis for assessment of propellant charges as a part of the artillery ammunition monitoring system Integrated

Technologies and Energy Conservation. *NTU "KhPI"*, 3, 2012. pp. 60–71. http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/2199

101. Alemasov V.E., Glushko V. Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products = Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoistva produktov sgoraniya : translated from Russian [by R. Kondor, and Ch. Nisenbaum], Jerusalem : Israel Program for Scientific Translations, 1974-1976. https://searchworks.stanford.edu/view/892711

102. Rusyaka I.G., Tenenevb V.A. Modeling of ballistics of an artillery shot taking into account the spatial distribution of parameters and backpressure. *Computer research and modeling*. 2020. Vol. 12. № 5 p. 1123-1147 https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-5-1123-1147

103. Головченко О., Іщенко О., Линок Н. Здобуті уроки ведення бойових дій артилерійськими підрозділами в ході збройного конфлікту на сході України за аспектом живучості в 2014–2015 роках. *Воєнно-історичний вісник*. 39(1).с. 82–96. https://doi.org/10.33099/2707-1383-2021-39-1-82-96.

104. Слісар, П. Удосконалена методика визначення ймовірності досягнення потрібного ефекту координації вогневого ураження противника в операції. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*. 2(75). С. 40–46. https://doi.org/10.33099/2304-2745/2022-2-75/40-46.

105. Algorithmic Game Theory / Eds. Nisan N., Roughgarden T., Tardos E., and Vazirani V. N.Y.: *Cambridge University Press*, 2009. 776 p.

106. Alessio Ishizaka, Philippe Nemery. Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software John Wiley & Sons, 2013. DOI:10.1002/9781118644898

107. Zavadskas E. K., Antuchevičienė J., & Kapliński O. Multi–Criteria Decision Making in Civil Engineering: Part I A StateOfTheArt Survey. Engineering Structures and Technologies. 7(3). 2016. P. 103–113. doi:10.3846/2029882x.2015.1143204

108. Засоби підготовки та управління вогнем артилерії / В. М. Петренко, М. М. Ляпа, А. І. Приходько та ін. Суми : Сумський державний університет, 2015. 458 с.

109. Анипко О.Б., В.Л. Хайков Анализ методов оценки состояния пороховых зарядов как элемент системы мониторинга артиллерийских боеприпасов. *Интегрированные технологии и энергосбережение*. НТУ "ХПИ". №3 2012. С. 60–71. http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/2199

110. Alan R. Washburn. Notes on Firing Theory. *Naval Postgraduate School Monterey*. California, 2002. 37 p. https://www.researchgate.net/publication/238621088_Notes_on_Firing_Theory

111. Maksimova, O. B., Davydov, V. O. & Babych, S. V. Optimization of control of heat supply systems of urban districts. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. Vol. 48 Issue 4: 69–89. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i4.70

112. Maksimova, O. B., Davydov, V.O. & Babych S.V. Control of heat supply system with structural changeable hardware. International Scientific Technical Journal "*Problems of Control and Informatics*". 2014. Vol.46 Issue 6: 37–48. https://www.dl.begellhouse.com/ru/journals/2b6239406278e43e,70d6314d580a7ecc,7ac2cf012121cbad.html

113. Артиллерийская звукова разведка. Учебник, под редакцией Л. А. Холохоленко. Москва. Военное Издательство. 1993. с. 392

114. Спосіб визначення зношення дула і зарядної камори артилерійської гармати: пат. на винахід. № 126356., заявл. 03.02.21; опубл. 21.09.22, Бюл. №38.

115. Linfang Qian, Guangsong Chen, Minghao Tong, Jinsong Tang, General design principle of artillery for firing accuracy. *Defence Technology*. Volume 18. Issue 12. 2022. Pages 2125-2140. https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.09.001.

116. Mady, M., Khalil, M., & Yehia, M. Modelling and production of artillery firing-tables: case-study. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1507(8), 082043. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1507/8/082043

117. Mostafa Khalil. Study on modeling and production inaccuracies for artillery firing. *Archive of mechanical engineering*. 2022. Vol. 69. No. 1, pp. 165–183. DOI: 10.24425/ame.2021.139802

118. I. Petlyuk, Y. Shchavinsky. Use of simulation modeling systems for determination of appropriate characteristics of prospective artillery weapons. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*. 2021. № 14. p. 11-22. https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.1.11-22

119. Y. Sun, S. Zhang, G. Lu, J. Zhao, J. Tian and J. Xue, Research on a Simulation Algorithm for Artillery Firepower Assignment According to Region. 2022 *3rd International Conference on Computer Science and Management Technology* (ICCSMT). Shanghai. China. 2022. pp. 353-356, doi: 10.1109/ICCSMT58129.2022.00082.

120. Nikola S. Maneva, Jugoslav Z. Achkoskib, Drage T. Petreskic, Milan Lj. Gocićd, Dejan D. Rančiće. Smart field artillery information system: model development with an emphasis on collisions in single sign-on. *Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier.* 2017. Vol 45. p/442-443

121. John Q. Bolton. The More Things Change … Russia's War in Ukraine Mirrors the Past as Much as It Shows the Future. *Military Review*/ July 2023/ p.1-14. https://www.armyupress.army.mil/Journals/Military-Review/Online-Exclusive/2023-OLE/The-More-Things-Change/

122. Shevtsov, R. An improved mathematical model of fire damage to enemy artillery units by missile forces and artillery in operations. *Social Development and Security*. 2023. 13(1). p/13-22. https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.1.2

123. S. M. Sviderok, U. V. Shabatura, A. O. Prokopenko. Technique of the fire correction of artillery systems according to modern requiremernts to the data

preparation for shooting. *Military Technical Collection*/ 2016/ № 14/ p. 99-103. https://doi.org/10.33577/2312-4458.14.2016.99-103

124. Swietochowski N. Rules of artillery employment in combat operations.*Scientific Journal of the Military University of Land Forces*. 2019/ Volume 51/Number 2(192)/ P. 280-293 DOI: 10.5604/01.3001.0013.2599

125. Krzyzanowski S. How to assess the accuracy of artillery fire. *Scientific Journal of the Military University Of Land Forces*. 2018. vol. 50. no. 1 (187), p. 25-39, http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0011.7355

126. Karel Šilinger, Kateřina Brabcová, Ladislav Potužák. Assessment of Possibility to Conduct Fire for Effect without Adjust Fire according to Observational Distance of a Target in Artillery Automated Fire Control Systems. *International Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2019.1:103-108.

127. Valentina Bartulović, Zvonko Trzun, Matija Hoić. Use of Unmanned Aerial Vehicles in Support of Artillery Operations. Strategos. 2023. 7(1). P.71-92. https://www.researchgate.net/publication/372657457_Use_of_Unmanned_Aerial_Vehicles_in_Support_of_Artillery_Operations

128. Laurean-Georgel Oprean. Artillery and drone action issues in the war in Ukraine. Scientific Bulletin Vol. 2023. XXVIII. No. 1(55). P.73-78. DOI: 10.2478/bsaft-2023-0008

129. Khudov, H., Yuzova, I., Lisohorskyi, B., Solomonenko, Y., Mykus, S., Irkha, A., Onishchuk, V., Sukonko, S., Semiv, G., & Bondarenko, S. Development of methods for determining the coordinates of firing positions of roving mortars by a network of counter-battery radars. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2021. № 3. 140-150. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001821

130. M. Brzozowski, M. Pakowski, M. Nowakowski, M. Myszka and M. Michalczewski. Radars with the function of detecting and tracking artillery shells - selected methods of field testing. 2019 IEEE 5th International Workshop on

Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Turin, Italy. 2019. pp. 429-434, doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869656.

131. R. Kochan et al., Theoretical Error of Bearing Method in Artillery Sound Ranging. 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: *Technology and Applications* (IDAACS), Metz, France. 2019. pp. 615-619, doi: 10.1109/IDAACS.2019.8924450.

132. Журавльов, О.О & Орлов, С.В & Шуляков, С.О. Математична модель траєкторії польоту снаряда далекобійної артилерійської системи. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. С. 62-68. 10.30748/soivt.2020.63.09.584-587Calculation. Military Operations Research, 27(3), 77–94. https://www.jstor.org/stable/27166357

133. Antonio Corvo. Comment on projectile motion with quadratic drag using an inverse velocity expansion. *Am. J. Phys*. 90, 2022. p.861–864 https://doi.org/10.1119/5.0097411

134. M.E. Wessam, Z.H. Chen. Firing Precision Evaluation For Unguided Artillery Projectile. *Proceedings of the 2015 International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering*. 2015, Atlantis Press. 584-587. https://doi.org/10.2991/aiie-15.2015.156

135. STANAG 4355 The Lieske modified point mass and five degrees of freedom trajectory models - AOP-4355 EDITION A. (No enabled versions). Washington DC, United States: United States Department of Defense, 2022. https://publishers.standardstech.com/content/military-dod-stanag-4355. Accessed: 2023-11-14

136. Aldoegre, M. Comparison between trajectory models for firing table application. *North-West University, Potchefstroom*. 2019. https://5dok.net/document/7q08x49y-comparison-between-trajectory-models-for-firing-table-application.html

137. Olivier Le Bot, Cedric Gervaise, Jerome I. Mars. Time-Difference-of-Arrival Estimation Based on Cross Recurrence Plots, with Application to Underwater Acoustic Signals. Charles L. Webber, Jr.; Cornel Ioana; Norbert Marwan. *Recurrence Plots and Their Quantifications: Expanding Horizons*. 180, Springer. 2016. pp 265-288. Springer Proceedings in Physics, 978-3-319-29921-1. ff10.1007/978-3- 319-29922-8_14ff. ffhal-01343668f https://hal.science/hal-01343668/document

138. Мухін Д. Нова українська система артрозвідки «БАРАК». *SPEKA*. 08.06.23. https://speka.media/v-ukrayini-testuyut-novu-sistemu-artrozvidki-barak-pozeyv

139. Мандровська О. "Чує" дрони і ракети: як система FENEK захищає інфраструктуру України. *Фокус*. 16.11.23. https://focus.ua/uk/digital/606501-slyshit-drony-i-rakety-kak-sistema-fenek-zashishaet-infrastrukturu-ukrainy-video

ДОДАТОК А

Документи про впровадження результатів дослідження

Україна
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КОД ЄДРПОУ 43861328

пр.Шевченка, 1, м.Одеса, 65044
Україна
тел. +38 048 7223474
факс. +38 048 7221992
E-mail: mail@op.edu.ua

17.04.2024 № 197/47-06
на № _____

ДОВІДКА
про використання результатів дисертаційної роботи
Гульцова Павла Семеновича
представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Гульцова П. С. «Автоматизоване керування станами об'єктів які рухаються вільною траєкторією при динамічних збуреннях» використовуються Національним університетом «Одеська політехніка» при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» в Інституті штучного інтелекту та робототехніки (ІШР) на кафедрі «Програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій» при викладанні наступних дисциплін:

- Автоматизація виробничих процесів;
- Моделювання процесів і систем;
- Сучасні системи керування;
- Оптимальні та адаптивні системи управління.

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Перший проректор Сергій НЕСТЕРЕНКО

Вик. Максимов М.В.
тел. 705-83-71

Україна
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КОД ЄДРПОУ 43861328

пр.Шевченка, 1, м.Одеса, 65044
Україна
тел. +38 048 7223474
факс. +38 048 7221992
E-mail: mail@op.edu.ua

17.04.2024 № 496/47-06
на №

ДОВІДКА
про використання результатів дисертаційної роботи
Гульцова Павла Семеновича
представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Надана довідка затверджує, що дисертаційне дослідження Гульцова П. С. «Автоматизоване керування станами об'єктів які рухаються вільною траєкторією при динамічних збуреннях» виконане відповідно до планів, затверджених Міністерством освіти і науки України, і є складовою частиною держбюджетних НДР за темами: «Розробка моделі та методу математичного забезпечення автоматизованих систем керування, які використовують паливо змінного складу для зменшення енергоємності виробництва», НДР № 206-47, (№ ДР 0122U000566) і «Підвищення ефективності АСК спеціального призначення за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів» НДР № 224-47 (№0122U200907).

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Проректор Дмитро ДМИТРИШИН

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ • НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» • 43861328

Вик. Максимов М. В.
тел. 705-83-71

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualize of free carbon at shot, Brunetkin O. Maksymov M. Brunetkin V. Maksymov O. Dobrynin Y. Kuzmenko V. Gultsov P.. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4/1 (112). . P. 41–53. Indexed in SCOPUS, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.239150

2. Boltenkov V, Brunetkin O, Maksymova O, Kuzmenko V, Gultsov P, Demydenko V., Soloviova O. Devising a method for improving the efficiency of artillery shooting based on the Markov model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol 6. № 3 (114). P. 6-7. Indexed in SCOPUS, doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245854.

3. Maksymov M.V., Boltenkov V. O., Gultsov P. S., Maksymov O. M. Verification of artillery fire under the influence of random disturbances for the computer game ARMA 3. *Applied Aspects of Information Technology*. 2023. Vol.6. No.4: p. 362–375. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.24. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

4. Maksymova O.B., Boltenkov V.O., Maksymov M. V., Gultsov P.S. Maksymov O.M. Development and Optimization of Simulation Models and Methods for Controlling Virtual Artillery Units in Game Scenarios. *Herald of Advanced Information Technology*. 2023. Vol.6. No.4. p. 320–337. DOI: https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.21. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»)

5. Maksymova O., Boltyonkov V., Gultsov P., Maksymov O. Improvement of the model and method of artillery installation target damage control with minimal combat capability loss. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. Issue 2(68). Dec. 2023. P. 98–115. DOI: https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.1.

6. Спосіб визначення координати зустрічі артилерійського снаряда з поверхнею: патент України на винахід. № 127193; заявл. 28.04.21 ; опубл. 31.05.2023. Бюл. №22.

7. Спосіб визначення енергетичної ефективності артилерійської гармати: пат. України на винахід. № 155822., заявл. 05.04.21 ; опубл. 24.04.24. Бюл. № 17.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Удосконалення моделі керування бойовою здатністю артилерійської гармати. *Topical aspects of modern scientific research*: Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2024. P. 256-261. URL: https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-topical-aspects-of-modern-scientific-research-25-27-01-2024-tokio-yaponiya-arhiv/.

9. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Удосконалення методу керування бойовою здатністтю артилерійської гармати. *European congress of scientific achievements*: Proceedings of the 1st International scientific and practical conference. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2024. P. 120-125. URL: https://sci-conf.com.ua/i-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-congress-of-scientific-achievements-29-31-01-2024-barselona-ispaniya-arhiv/.

10. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Моделювання утворення дульного викиду як діагностичної ознаки про стан пострілу. *Science and society: modern trends in a changing world*. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Vienna, Austria. 2024. P. 184-190. URL: URL: https://sci-conf.com.ua/ii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-society-modern-trends-in-a-changing-world-22-24-01-2024-viden-avstriya-arhiv/.

11. Тарахтій О. С., Гульцов П. С., Максимов О. М. Метод параболічної апроксімації визначення координати зіткнення артилерійського снаряда з

поверхнею. *Modern problems of science, education and society:* Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2024. P. 324-330. URL: https://sci-conf.com.ua/xii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-problems-of-science-education-and-society-5-7-02-2024-kiyiv-ukrayina-arhiv/.