

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 уможлиблюється 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 снаряда. 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 уможлиблюється 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 наявністю 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, одновимірні 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-різницевого 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 здатністю 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: <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 апроксимації 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>