

Дослідження впливу боєприпасів кінетичної дії 14,5 мм на броньову перешкоду з додатковим бронюванням

Study of the impact 14,5 mm kinetic action ammunition on the armored obstacle with additional armor

Володимир Дачковський * 1 A

*Corresponding author: к.техн.н., доцент, професор кафедри технічного забезпечення, e-mail: 1903vova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1480-5021

Тимур Куртсеітов ^{2 A}

д. техн. н., професор, начальник кафедри, e-mail: kurttimur@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6478-6469

Віктор Гудима ^{3 A}

к. техн.н., доцент кафедри технічного забезпечення, e-mail: viktor.gud77@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4722-0601

Ксенія Єргідзей ^{4 A}

к. пед. н., заступник начальника центру, e-mail: ergidzey@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4634-133X

Ірина Новікова ^{5 A}

старший науковий співробітник науково-дослідного відділу, e-mail: irina_nov@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4854-0682

Volodymyr Dachkovskiy * 1 A

*Corresponding author: Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Professor of the Department, e-mail: 1903vova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1480-5021

Tymur Kurtseitov ^{2 A}

Doctor of technical sciences, professor, head of the department, e-mail: kurttimur@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6478-6469

Viktor Hudyma ^{3 A}

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department, e-mail: viktor.gud77@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4722-0601

Kseniia Yerhidzei ^{4 A}

Candidate of Pedagogical Science, deputy head of the center, e-mail: ergidzey@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4634-133X

Iryna Novikova ^{5 A}

Senior researcher of the research department, e-mail: irina_nov@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4854-0682

^A Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, м. Київ, Україна

^A National Defence University of Ukraine named Ivan Chernyakhovskiy, Kyiv, Ukraine

Received: December 1, 2022 | Revised: December 18, 2022 | Accepted: December 31, 2022

DOI: 10.33445/sds.2022.12.6.6

Мета роботи: розглянути основні підходи до оцінювання рівня стійкості броньової перешкоди та побудувати на основі експериментальних даних математичну модель впливу кінетичної енергії кулі 14,5 мм на корпус ББМ з додатковою броньовою перешкодою

Дизайн/Метод/Підхід дослідження: для реалізації мети дослідження було проведено лабораторне експериментальне випробування основної броні корпусу бойових броньованих машин із встановленим додатковим бронюванням з метою отримання статистичних даних у відповідності до вибраного плану експериментального дослідження.

Результати дослідження: у статті на основі статистичних даних отриманих під час проведення експериментального дослідження розроблено математичну модель впливу засобів ураження 14,5 мм на корпус бойових броньованих машин з додатковим бронюванням, що дає можливість визначити оптимальну товщину додаткового бронювання та відстань додаткового бронювання до основної броні в залежності від кута нахилу елементів корпусу бойових броньованих машин.

Теоретична цінність дослідження: для оцінювання відносних властивостей корпусу бойових броньованих машин з додатковим бронюванням до уражаючої енергії засобів ураження використано експериментально-статистичний метод математичного моделювання процесу впливу енергії засобів ураження, при якому експеримент розглядається як основне джерело інформації про процес, а методи теорії ймовірності та математичної статистики – основним засобом обробки результатів експерименту.

Purpose: to consider the main approaches to assessing the level of stability of the armor barrier and to build a mathematical model of the effect of the kinetic energy of a 14.5 mm bullet on the hull of an armored combat vehicle with an additional armor barrier based on experimental data.

Design/Method/Approach: to implement the purpose of the study, a laboratory experimental test of the main armor of the hull of armored combat vehicles with additional armor installed was carried out in order to obtain statistical data in accordance with the selected experimental research plan.

Findings: the article on the basis of statistical data obtained during the experimental study developed a mathematical model of the impact of 14.5 mm weapons on the hull of armored combat vehicles with additional armor, which makes it possible to determine the optimal thickness of additional armor and the distance of additional armor to the main armor depending on the angle of inclination of the hull elements of armored combat vehicles.

Theoretical implications: to assess the relative properties of the hull of armored combat vehicles with additional armor to the damaging energy of the destructive means used experimental-statistical method of mathematical modeling of the process of influence of the energy of the destructive means, in which the experiment is considered as the main source of information about the process, and the methods of probability theory and mathematical statistics - the main means of processing the results of the experiment.

Practical implications: the developed mathematical model of the impact of 14.5 mm munitions on the hull of armored combat vehicles with additional armor makes it possible to assess

Практична цінність дослідження: розроблена математична модель впливу засобів ураження 14,5 мм на корпус бойових броньованих машин з додатковим бронюванням дає можливість оцінити рівень захищеності бойових броньованих машин на етапі їх модернізації або проектування.

Цінність дослідження: цінність дослідження полягає у визначенні оптимальних параметрів додаткового бронювання для підвищення рівня захищеності бойових броньованих машин.

Обмеження дослідження: обмеження дослідження полягає у тому що математична модель враховує кут зустрічі засобу ураження із корпусом бойових броньованих машин із встановленим додатковим бронюванням, відстань від додаткового бронювання до корпусу, товщину додаткового бронювання.

Тип статті: практичний.

the level of protection of armored combat vehicles at the stage of their modernization or design.

Originality/Value: the value of the study is to determine the optimal parameters of additional armor to increase the level of protection of armored combat vehicles.

Research limitations/Future research: the limitation of the study is that the mathematical model takes into account the angle of the meeting of the means of destruction with the hull of armored combat vehicles with installed additional armor, the distance from the additional armor to the hull, the thickness of the additional armor.

Papertype: practical.

Ключові слова: бойові броньовані машини, броньована перешкода, експериментальне дослідження, засоби ураження, математична модель, оптимізація.

Key words: armored combat vehicles, armored obstacle, experimental study, means of destruction, mathematical model, optimization.

1. Вступ

Досвід збройних конфліктів останніх десятиріч і сучасна війна російської федерації проти України засвідчує, що суттєві втрати особового складу, озброєння та військової техніки (ОВТ) військові частини несуть не тільки у ході прямих бойових зіткнень, але й під час нападу із засідок та укриттів, пересуванні у колонах та конвоюванні. Залучення традиційних бойових броньованих машин (ББМ) типу БМП або БТР для захисту від атак із застосуванням засобів ураження (ЗУ) кінетичної дії (КД) противника показало низький рівень захищеності та недостатню ефективність їх використання на полі бою. Низький рівень захищеності, в свою чергу, суттєво впливає на прийняття оперативних рішень щодо бойового застосування військ (сил).

Одним із найбільш ефективних способів ураження особового складу та бойової техніки є застосування боєприпасів КД. Отже, ЗУ КД є важливою складовою сучасних військ. За таких умов виникає потреба щодо забезпечення достатнього рівня захищеності ББМ від відповідних ЗУ.

Актуальність піднятого проблемного питання підтверджується досвідом застосування військових частин (підрозділів) Збройних Сил України у сучасній війні з російською федерацією та досвідом виконання бойових завдань в операції Об'єднаних сил (ООС) (Антитерористичній операції (АТО)) [1-4].

2. Теоретичні основи дослідження

На даний час на озброєнні Збройних Сил України знаходиться велика кількість, як сучасних, так і застарілих ББМ. Аналіз бойового застосування таких зразків ББМ в ООС вказує на те, що вони мають значні технічні недоліки. Основними з них є: недостатня мобільність, низька бойова ефективність та недостатній рівень захищеності, що не відповідає сучасним вимогам, які висуваються до захищеності від кінетичних ЗУ.

Про низьку захищеність ББМ від кінетичних ЗУ свідчить велика кількість ББМ, які втратили працездатність, або були безповоротно знищені стрілецькою зброєю противника [5]. Дані випадки, на жаль, продовжують мати місце і на даний час.

Відповідно до цього, для забезпечення захищеності зразків ОВТ від ЗУ за останній час запропоновано різноманітні способи та засоби захисту, доречність застосування яких потребує підтвердження експериментальними дослідженнями [6, 7].

3. Постановка проблеми

Дослідженню питань впливу ЗУ на броньову перешкоду та підвищення рівня їх захищеності присвячена ціла низка робіт, як вітчизняних так і закордонних вчених, зокрема глибоке

опрацювання цієї проблеми відображене у публікації [6], у якій для оцінювання відносних властивостей захисного екрану до уражаючої енергії ЗУ проведено експериментальне дослідження, яке дозволило перевірити висунуту гіпотезу щодо застосування декількох слоїв матеріалів в захисних екранах для захисту ББМ від ЗУ, які під дією кінетичної енергії руйнують броньову перешкоду. На основі отриманих даних під час експериментального дослідження побудовано математичну модель, яка описує імпульс пробиття захисного екрану. У роботі [7] досліджено вплив ударної хвилі на базові колісні платформи. Для перевірки базових колісних платформ на стійкість до ударної хвилі запропонована методика експериментального дослідження. На основі експериментальних даних, отриманих під час лабораторного дослідження та побудовано математичну модель впливу ударної хвилі на базові колісні платформи. В роботі [8-10] проведено аналіз розвитку ББМ, які запропоновані вітчизняним оборонно-промисловим комплексом України та визначені основні тенденції щодо їх розвитку, а у публікації [11] запропоновано методику визначення характеристик живучості зразка ОВТ, що дає змогу визначати показники довговічності та відтворюваності зразків ОВТ, визначаючи тим самим живучість окремого зразка ОВТ або групи машин однакового цільового призначення. Аналізу застосування захисних пристроїв під час ведення бойових дій, які виготовляються екіпажами зразків ОВТ присвячена робота [12]. Окремі аспекти даної проблематики викладені у роботі [13-14], яка присвячена аналізу тенденцій розвитку ОВТ Сухопутних військ, а саме шляхам підвищення їх захищеності від ЗУ. Розглянуто напрями розвитку та основні конструктивні особливості ОВТ що забезпечують захист від ЗУ. У публікації [15] проведено порівняння розрахункових критерії броньової стійкості різних захисних матеріалів (броньової сталі, кераміки, біметалу (сталь-алюміній)).

Підхід для оцінювання результатів впливу уламків елементів зовнішнього бронювання на внутрішнє обладнання ББМ за допомогою математичного моделювання процесів розльоту дії уламків на внутрішні агрегати зразків ОВТ запропоновано в роботі [16]. У літературному джерелі [17] визначено числову модель процесу пробиття захисних керамічних елементів з різною конструкцією підтверджено ефективність розроблених захисних керамічних елементів для захисту ББМ. Але в даній роботі не визначено як засіб ураження втрачає енергетичні характеристики при пробитті броньової перешкоди. В роботі [18] запропонована модель кінцевих елементів, яка ґрунтується на даних, отриманих в результаті динамічних і статичних випробувань матеріалів, для прогнозування реакції і поведінки відмов гібридних пластин при малих швидкостях ударного навантаження. Під час даного дослідження враховували вплив швидкості ударника, кут його падіння, але не враховувалась відстань між додатковою перешкодою та основною перешкодою і товщина додаткової перешкоди. Публікація [19], присвячена дослідженню з підвищенню рівня захищеності автомобілів багатоцільового призначення. В роботі розглянуто множину варіантів технічних рішень та приведено результати спостереження щодо уразливих ділянок стрілецькою зброєю, але не визначено, як саме підвищити рівень захищеності від засобів ураження. У джерелі [20] запропонована методика обґрунтування рівня захищеності бойових колісних машин, що базується на визначенні кількості влучень у зразок під час його обстрілу з декількох засобів ураження. У публікації [21] розглянуто постановку завдання експериментального дослідження боєприпасів і програми випробувань для стрілецької зброї.

Але в даних працях не визначено, як засіб ураження буде втрачати кінетичну енергію в залежності від кута зустрічі ЗУ із броньовою перешкодою, γ , град; відстані додаткової броньової перешкоди до основної броні ББМ, l , см та товщини додаткової броньової перешкоди, h , мм, а також вплив ЗУ на броньову перешкоду ББМ в залежності від факторів, що впливають на процес пробиття додаткового захисту.

4. *Методологія дослідження*

Тому, метою даної статті є викладення основних підходів до оцінювання рівня стійкості броньової перешкоди та побудова на основі експериментальних даних математичної моделі впливу кінетичної енергії кулі 14,5 мм на корпус ББМ з додатковою броньовою перешкодою.

5. *Результати*

Під час проведення експериментальних досліджень для розрахунку моделі стійкості ББМ до кінетичних ЗУ, а саме кулі 14,5 мм, були отримано емпіричні дані про поведінку багатьох елементів, критичних до впливу ЗУ елементів зразка.

Такі дослідження вимагають значної витрати часу і коштів, тому при вивченні такого роду явищ використовують стохастичний підхід, при якому абстрагуються від ряду явищ, які відбуваються в системі. У даному випадку застосовано експериментально-статистичні методи досліджень, при яких реальні процеси розглядаються, як процеси ймовірності, а сам об'єкт дослідження представляється у вигляді кібернетичної системи, що досліджується за допомогою математичного моделювання [22].

Для розрахунку моделі в процесі експерименту було накопичено інформацію про значення відгуку, який досліджується в обраній області факторного простору. Із проведеного експерименту впливає можливість побудувати математичну модель з метою однозначного визначення значень показників x (вхідних факторів, впливів) і y (вихідні показники, відгук) [23-24].

Зазначена модель є поліноміальною у вигляді відрізка ряду Тейлора, що досить добре описує функцію відгуку локальної площини факторного простору і зручна для застосування, завдяки універсальності і порівняльній простоті методів її побудови на основі експериментальних даних [25].

Таким чином, в основу дослідження покладений експериментально-статистичний метод математичного моделювання процесу впливу кінетичної енергії ЗУ на корпус ББМ з броньовою перешкодою, при якому експеримент розглядається як основне джерело інформації про процес, а методи теорії ймовірності та математичної статистики – основним засобом обробки результатів експерименту [26].

Слід зазначити, що спланований експеримент може бути успішним тільки за низки умов. Перш за все, об'єкт дослідження повинен бути керованим, тобто повинна бути можливість однозначного встановлення зазначених факторів в обраній області і однозначного визначення відповідних їм відгуків. Крім того, вихідні показники (відгуки) повинні бути кількісними і підлягати вимірюванню при будь-якому можливому поєднанні обраних рівнів факторів. Фактори повинні бути незалежні один від одного, однозначні і сумісні. Досліджуваний процес має здійснюватись у всій області обраного факторного простору, тобто у всьому діапазоні зміни обраних факторів. Крім того, об'єкт дослідження повинен задовольняти вимогу відтворюваності при багаторазовому повторенні одного і того ж досліду, а його відгуки повинні мати розкид, що не перевищує деякої заданої величини [6].

В дослідженні змінними прийняті наступні фактори: γ – кут зустрічі ЗУ із броньовою перешкодою, град.; h – товщина броньової перешкоди, мм, l – відстань від додаткової броньової перешкоди до основної броні ББМ, мм.

В якості параметрів оптимізації прийнятий відстань відхилення маятника. Основні рівні та інтервали варіювання факторів обрані на основі апріорної інформації та приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Рівні та інтервали варіювання факторів

Фактори	Кодоване значення	Інтервали варіювання	Рівні факторів		
			Основний 0	Верхній +1	Нижній -1
γ – кут зустрічі засобу ураження із броньовою перешкодою, град.	x_1	10	20	30	10
h – товщина додаткової броньової перешкоди, мм	x_2	5	10	15	5
l – відстань від додаткової броньової перешкоди до основної броні ББМ, мм.	x_3	50	100	150	50

Дослідні зразки у відповідності до заданих умов на яких проводилось дослідження наведено на рис. 1



Рисунок 1 – Дослідні зразки, на яких проводилось дослідження та лабораторне обладнання

Для отримання моделі процесу у вигляді поліному другого ступеня використано не композиційний план другого порядку, який представлено в табл. 2.

Як слідує з таблиці, обрана матриця планування задовольняє загальним властивостям матриць планування, що дозволяє швидко розрахувати цільову функцію:

- симетричність відносно нульового рівня, тобто алгебраїчна сума елементів стовпця кожного фактора, дорівнює нулю;
- сума квадратів елементів стовпця кожного із факторів дорівнює кількості дослідів (властивість нормування);
- добуток будь-яких двох різних вектор-стовпців факторів дорівнює нулю;
- дисперсії передбачених значень параметра оптимізації однакові на рівних відстанях від нульового рівня (властивість ротатабельності матриці планування) [27].

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту

Номер досліджу	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y_1
1	+	+	+	0	+	0	0	+	+	0	125
2	+	+	-	0	-	0	0	+	+	0	99
3	+	-	+	0	-	0	0	+	+	0	75
4	+	-	-	0	+	0	0	+	+	0	65
5	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85
6	+	+	0	+	0	+	0	+	0	+	156
7	+	+	0	-	0	-	0	+	0	+	110
8	+	-	0	+	0	-	0	+	0	+	114
9	+	-	0	-	0	+	0	+	0	+	60
10	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95
11	+	0	+	+	0	0	+	0	+	+	111
12	+	0	+	-	0	0	-	0	+	+	70
13	+	0	-	+	0	0	-	0	+	+	98
14	+	0	-	-	0	0	+	0	+	+	82
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105

За результатами дослідів, поставлених згідно розглянутим планом, рівняння регресії запишемо у вигляді

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (1)$$

Коефіцієнти рівняння регресії (1) можуть визначатись за допомогою методу найменших квадратів, який є одним з базових методів регресійного аналізу для оцінки невідомих параметрів регресійних моделей за вибірковими даними.

Коефіцієнти рівняння знаходимо за виразами [7, 23]:

$$b_0 = \frac{1}{3} \sum_{u=1}^3 y_{0u}; \quad (2)$$

$$b_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} y_j; \quad (3)$$

$$b_{il} = \frac{1}{4} 15 \sum_{j=1}^{15} x_{ij} x_{lj} y_j; \quad (4)$$

$$b_{ii} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{16} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{6} \sum_{u=1}^3 y_{0u}. \quad (5)$$

Коефіцієнти рівняння становлять

$$b_0 = 95, b_1 = 22, b_2 = 4,625, b_3 = 19,625, b_{12} = 4, b_{13} = -2, b_{23} = 6,25, \\ b_{11} = 7,875, b_{22} = -11,875, b_{33} = 7,125$$

Дисперсію $s^2\{y_a\}$ параметра оптимізації знаходимо за результатами дослідів в центрі плану. Для розрахунку дисперсії складаємо табл. 3.

Таблиця 3 – Допоміжна таблиця для розрахунку дисперсії $s^2\{y_a\}$

Номер дослідів в центрі плану	y	\bar{y}	$y - \bar{y}$	$(y - \bar{y})^2$
5	85	95	-10	100
10	95		0	0
15	105		10	100

$$S_E = (y_5 - \bar{y}_{5,10,15})^2 + (y_{10} - \bar{y}_{5,10,15})^2 + (y_{15} - \bar{y}_{5,10,15})^2 = 200 \quad (6)$$

$$s^2\{y_a\} = \frac{S_E}{n_0 - 1} = 100, \quad (7)$$

де $n_0 = 3$ – число дослідів в центрі плану.

Дисперсія коефіцієнтів рівняння регресії для y_a буде становити:

$$s^2\{b_0\} = \frac{1}{3} s_y^2 = 24,82606 \quad (8)$$

$$s^2\{b_i\} = \frac{1}{8} s_y^2 = 15,2028 \quad (9)$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{1}{4} s_y^2 = 21,5 \quad (10)$$

$$s^2\{b_{ii}\} = \frac{13}{48} s_y^2 = 22,37791 \quad (11)$$

Згідно рівняння регресії всі коефіцієнти перераховуємо з використанням метода найменших квадратів. Для цього складаємо систему нормальних рівнянь

$$15b_0 + 0b_1 + 0b_2 + 0b_3 + 0b_{12} + 0b_{13} + 0b_{23} + 8b_{11} + 8b_{22} + 8b_{33} = 1450$$

$$0b_0 + 8b_1 + 0b_2 + 0b_3 + 0b_{12} + 0b_{13} + 0b_{23} + 0b_{11} + 0b_{22} + 0b_{33} = 176$$

$$0b_0 + 0b_1 + 8b_2 + 0b_3 + 0b_{12} + 0b_{13} + 0b_{23} + 0b_{11} + 0b_{22} + 0b_{33} = 37$$

$$0b_0 + 0b_1 + 0b_2 + 8b_3 + 0b_{12} + 0b_{13} + 0b_{23} + 0b_{11} + 0b_{22} + 0b_{33} = 157$$

$$0b_0 + 0b_1 + 0b_2 + 0b_3 + 4b_{12} + 0b_{13} + 0b_{23} + 0b_{11} + 0b_{22} + 0b_{33} = 16$$

$$0b_0 + 0b_1 + 0b_2 + 0b_3 + 0b_{12} + 4b_{13} + 0b_{23} + 0b_{11} + 0b_{22} + 0b_{33} = -8$$

$$0b_0 + 0b_1 + 0b_2 + 0b_3 + 0b_{12} + 0b_{13} + 4b_{23} + 0b_{11} + 0b_{22} + 0b_{33} = 25$$

$$8b_0 + 0b_1 + 0b_2 + 0b_3 + 0b_{12} + 0b_{13} + 0b_{23} + 8b_{11} + 4b_{22} + 4b_{33} = 804$$

$$8b_0 + 0b_1 + 0b_2 + 0b_3 + 0b_{12} + 0b_{13} + 0b_{23} + 4b_{11} + 8b_{22} + 4b_{33} = 725$$

$$8b_0 + 0b_1 + 0b_2 + 0b_3 + 0b_{12} + 0b_{13} + 0b_{23} + 4b_{11} + 4b_{22} + 8b_{33} = 801$$

Після розрахунку даної системи рівнянь отримуємо наступні коефіцієнти:

$$b_0 = 87,69231, b_1 = 22, b_2 = 4,625, b_3 = 19,625, b_{12} = 4, b_{13} = -2, b_{23} = 6,25,$$

$$b_{11} = 8,788462, b_{22} = -11,875, b_{33} = 8,038462$$

Отримане в результаті ротатабельного планування рівняння регресії запишемо у вигляді:

$$y = 87,692 + 22x_1 + 4,625x_2 + 19,625x_3 + 4x_1x_2 - 2x_1x_3 + 6,25x_2x_3 + 8,788x_1^2 - 11,875x_2^2 + 8,038x_3^2 \quad (13)$$

Адекватність отриманої моделі перевіряємо згідно з F – критерієм (критерій Фішера).

Для визначення дисперсії $s_{ад}^2$ адекватності обчислюємо суму S_R квадратів відхилень розрахункових значень \hat{y}_a функції відгуку від експериментальних \hat{y}_a у всіх точках плану (табл. 4). Розрахункове значення \hat{y}_a визначаємо згідно виразу (13).

Таблиця 4 – Допоміжна таблиця для розрахунку суми квадратів відхилень розрахункових значень S_R

Номер досліджу	\hat{y}_a	\hat{y}_a	$\hat{y}_a - y_a$	$(\hat{y}_a - y_a)^2$
1	125	122,5385	2,461538	6,059171598
2	99	105,2885	-6,28846	39,54474852
3	75	70,53846	4,461538	19,90532544
4	65	69,28846	-4,28846	18,39090237
5	85	95	-10	100
6	156	151,4519	4,548077	20,6850037
7	110	116,2019	-6,20192	38,46384985
8	114	111,4519	2,548077	6,492696006
9	60	68,20192	-8,20192	67,27154216
10	95	95	0	0
11	111	115,1635	-4,16346	17,33441198
12	70	76,41346	-6,41346	41,13248891
13	98	106,4135	-8,41346	70,78633506
14	82	66,66346	15,33654	235,209412
15	105	95	10	100

$$S_R = \sum_{j=1}^{15} (\hat{y}_a - y_a)^2 = 781,276 \quad (14)$$

Число ступенів свободи визначаємо за формулою:

$$f = N - k' - (n_0 - 1) = 10, \quad (15)$$

де k' – число статистично значущих коефіцієнтів моделі;

N – загальна кількість дослідів;

n_0 – загальна кількість дослідів в центрі плану.

Знаходимо дисперсію адекватності:

$$s_{ад}^2 = \frac{S_R - S_E}{f} = 193,758629 \quad (16)$$

де k' – число статистично значущих коефіцієнтів моделі;

N – загальна кількість дослідів;

n_0 – загальна кількість дослідів в центрі плану;

S_R – сума квадратів відхилень розрахункових \hat{y}_a значень функції відгуку від експериментальних \hat{y}_a у всіх точках плану;

S_E – сума квадратів відхилень розрахункових \hat{y}_a значень функції відгуку від експериментальних \hat{y}_a у центрі плану.

Знаходимо розрахункове значення F – критерію:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s^2\{y_a\}} = 1,93758629 < F_T \quad (17)$$

де $s_{ад}^2$ – дисперсія адекватності;
 s_y^2 – дисперсія параметра оптимізації.

Таким чином математична модель у якій за s_y^2 приймається – $s^2\{y_a\} = 193,758629$, значення критерію $F_p = 1,93758629$. Табличне значення F_T – критерію при 5%-му рівні значущості, зокрема степенів свободи для чисельника 9 і для знаменника 2 дорівнює 19,39.

Отже, отримана математична модель (13) адекватна при 5% рівні значущості, так як $F_p < F_T$.

За необхідності можна провести перехід від кодованих (x_1, x_2, x_3) до натуральних значень (γ, h, l) факторів у відповідності із умовами експерименту (табл. 1) за формулами

$$x_1 = \frac{\gamma-20}{10}; x_2 = \frac{h-10}{5}; x_3 = \frac{l-100}{50}. \quad (18)$$

Використовуючи математичну модель (13) можна побудувати контурні криві відгуку y_a , що наведені на рис. 3, 4, 5.

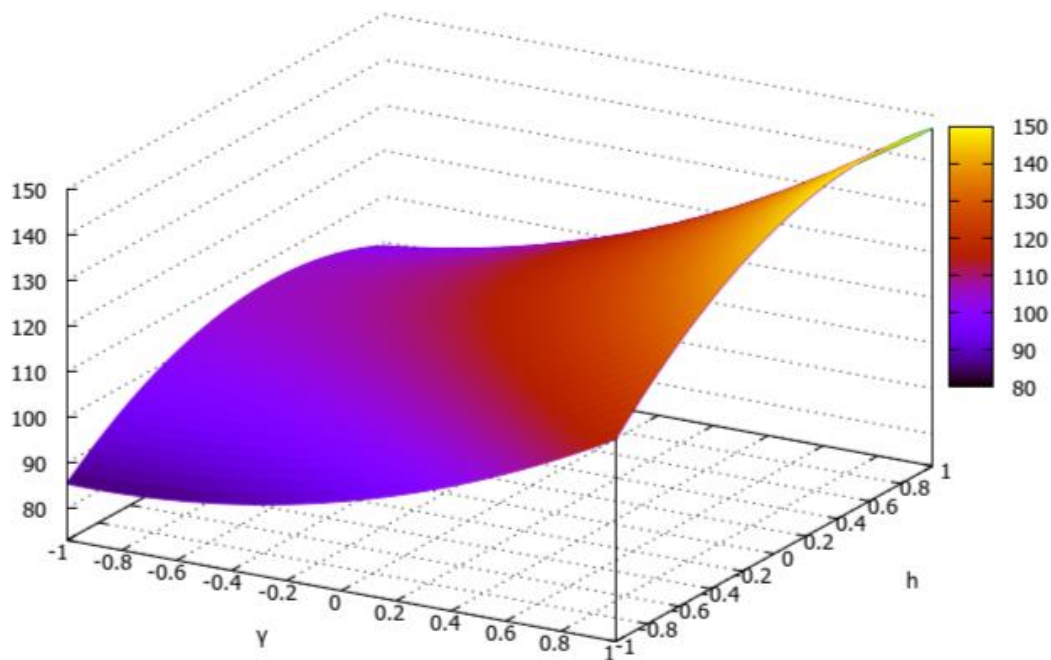


Рисунок 3 – Характеристика впливу кінетичної енергії засобів ураження на пробиття основної броні з додатковим бронюванням в залежності від кута нахилу та товщини додаткового бронювання при фіксованій відстані додаткового бронювання до основної броні на рівні 1.

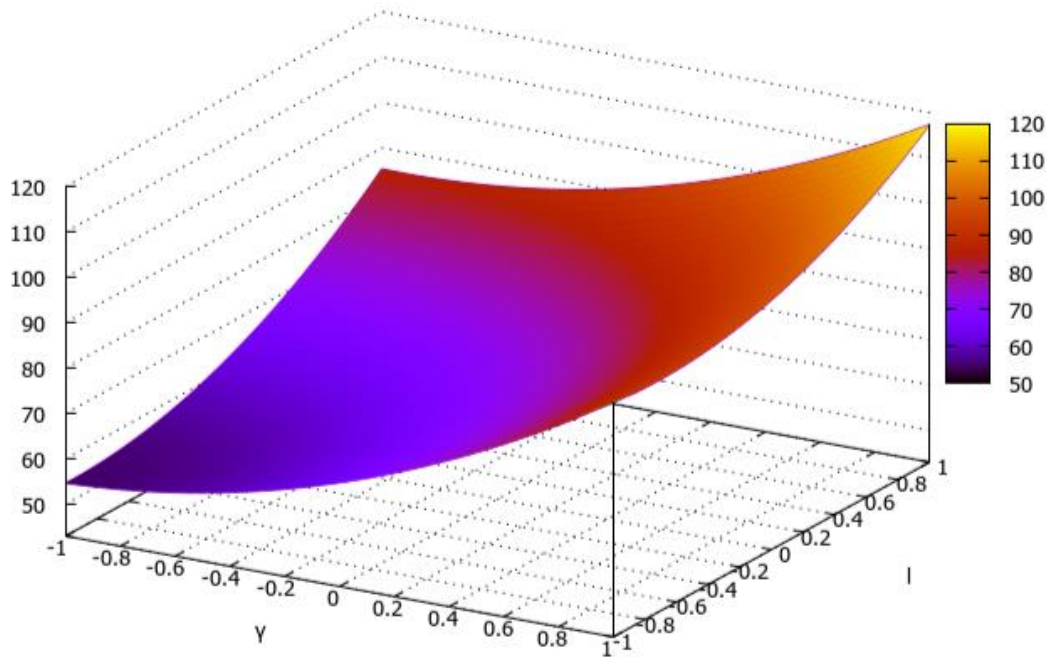


Рисунок 4 – Характеристика впливу кінетичної енергії засобів ураження на пробиття основної броні з додатковим бронюванням в залежності від кута нахилу та відстані додаткового бронювання до основної броні при фіксованій товщині додаткового бронювання на рівні -1

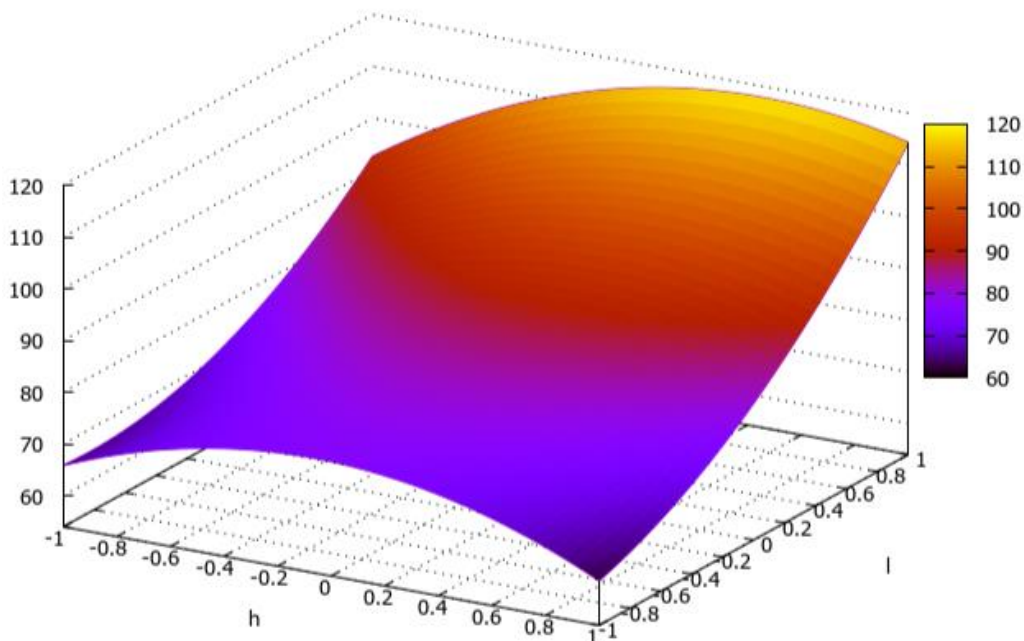


Рисунок 5 – Характеристика впливу кінетичної енергії засобів ураження на пробиття основної броні з додатковим бронюванням в залежності від товщини додаткового бронювання та відстані додаткового бронювання до основної броні при фіксованому куті нахилу на рівні 0.

6. Обговорення

Наукова новизна результатів дослідження та їх практичне значення підтримані у ході дискусії між науково-педагогічними працівниками кафедри технічного забезпечення Національного університету оборони України серед яких: Яльницький О.Д. – кандидат технічних наук, доцент; Овчаренко І.В. – кандидат військових наук, доцент.

7. Висновки

Таким чином, отримана математична модель впливу засобів ураження 14,5 мм на броньову перешкоду з додатковим бронюванням дає можливість визначити оптимальну товщину додаткового бронювання та відстань додаткового бронювання до основної броні в залежності від кута нахилу елементів корпусу ББМ. Слід також зазначити, що застосування захисної додаткової броньової перешкоди дасть можливість знизити дію кінетичних ЗУ на корпус ББМ та підвищити живучість ББМ на полі бою.

В подальшому, необхідно розробити методику порівняльної оцінки живучості ББМ з додатковим бронюванням та без додаткового бронювання.

8. Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

9. Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Аналіз бойових дій в районі Іловайська після вторгнення російських військ 24-29 серпня 2014 року. URL: <http://www.mil.gov.ua/news/2015/10/19/analiz-illovausk--14354/>. (дата звернення: 20.04.2022).
2. Аналіз бойових дій на сході України в ході зимової кампанії 2014–2015 років. URL: <http://www.mil.gov.ua/news/2015/12/23/analiz-bojovih-dij-na-shodi-ukraini-v-hodi-zimovoi-kampanii-2014--2015-rokiv--16785/>. (дата звернення: 20.04.2022).
3. Аналіз Генерального штабу ЗС України щодо бойових дій на Дебальцевському плацдармі з 27 січня до 18 лютого 2015 року. URL: <http://www.mil.gov.ua/analitichni-materiali/analiz-generalnogo-shtabu-zsu-shhodo-bojovih-dij-na-debalczevskomu-placzdarmi-z-27-sichnya-do-18-lyutogo-2015-roku.html>.
4. Аналіз ведення АТО та наслідків вторгнення РФ в Україну у серпні-вересні 2014 року. URL: <https://www.slideshare.net/tsnua/2014-51587585>.
5. Втрати Збройних Сил України у бронетехніці під час АТО у 2014-2016

References

1. Analysis of hostilities in the Ilovaisk region after the invasion of Russian troops on August 24-29, 2014. Available from: <http://www.mil.gov.ua/news/2015/10/19/analiz-illovausk--14354/>
2. Analysis of hostilities in eastern Ukraine during the winter campaign of 2014–2015. Available from: <http://www.mil.gov.ua/news/2015/12/23/analiz-bojovih-dij-na-shodi-ukraini-v-hodi-zimovoi-kampanii-2014--2015-rokiv--16785/>. (date of application: 19.05.2022).
3. Analysis of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine regarding combat operations at the Debaltseve bridgehead from January 27 to February 18, 2015. Available from: <http://www.mil.gov.ua/analitichni-materiali/analiz-generalnogo-shtabu-zsu-shhodo-bojovih-dij-na-debalczevskomu-placzdarmi-z-27-sichnya-do-18-lyutogo-2015-roku.html>. (date of application: 19.05.2022).
4. Analysis of anti-terrorist operation and the consequences of the Russian invasion of Ukraine in August-September 2014. Available from: <https://www.slideshare.net/tsnua/2014-51587585>. (date of application: 19.05.2022).
5. Losses of the Armed Forces of Ukraine in armored

- роках. URL: https://defence-ua.com/army_and_war/vtrati_zbrojnih_sil_ukrajini_u_bronetehnitsi_pid_chas_ato_u_2014_2016_rokah_vpereshe_o_priljudnena_detalna_ofitsijna_statistika-181.html.
6. Дачковський В.О., Даценко І.П., Коцюруба В.І., Яльницький О.Д., Голда О.Л., Неділько О.М., Сиротенко А.М. Експериментальне дослідження впливу засобів ураження на захисні екрани бойових броньованих машин. *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн.* Київ: КНУБА, 2020. Вип. 104. С. 117-135.
 7. Куртсейтов Т. Л., Дачковський В. О., Кізяк Я. О., Угринович О. І. Експериментальне дослідження стійкості базових колісних платформ до впливу вибухонебезпечних предметів. *Natural, Mathematical and Technical science NaMaTech.* 2018, Held in Budapest on 16th of December 2018. DOI: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2018-186VI22-15>.
 8. Дачковський В. О., Овчаренко І. В. Аналіз розвитку бойових броньованих машин. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони.* 2016. № 2(26) С. 127–132. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sitsbo_2016_2_24
 9. З заводу у бій: нова бойова машина піхоти "Кевлар-Е" передана Збройним Силам. URL: https://defence-ua.com/news/z_zavodu_u_bij_nova_bojova_mashina_pihoti_kevlar_e_vid_kompaniji_ukrinmash_peredana_zbrojni_m_silam-6243.html
 10. Зброя української перемоги: турецькі MRAP Kirpi. URL: <https://root-nation.com/ua/articles-ua/weapons-ua/ua-bronemashini-mrap-kirpi/>
 11. Dachkovskiy V.O. Method of determination of survival characteristics of weapons and military equipment. *Social development & Security.* 2020. №10(1), С. 18-24. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.1.3>
 - vehicles during the anti-terrorist operation in 2014-2016. Available from : https://defence-ua.com/army_and_war/vtrati_zbrojnih_sil_ukrajini_u_bronetehnitsi_pid_chas_ato_u_2014_2016_rokah_vpereshe_opriljudnena_detalna_ofitsijna_statistika-181.html. (date of application: 19.05.2022).
 6. Dachkovskiy, V., Datsenko, I., Kotsiuruba, V., Yalnytskyi, O., Holda, O., Nedilko, O. & Syrotenko, A. (2020). Eksperymental'ne doslidzhennya vplyvu zasobiv urazhennya na zakhysni ekrany boyovykh bron'ovanykh mashyn [Experimental study of the effect of means of destruction on the protective screens of armored combat vehicles]. *Resistance of materials and theory of structures: scientific and technical, team* Issue 104, 117-135. (in Ukrainian).
 7. Kurtseitov, T., Dachkovskiy, V., Kiziak, Y. & Uhrynovych, O. (2018). Experimental study of the resistance of basic wheel platforms to the effects of explosive objects. *Natural, Mathematical and Technical science NaMaTech.* Held in Budapest on 16th of December 2018. DOI: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2018-186VI22-15>. (in Ukrainian).
 8. Dachkovskiy, V., & Ovcharenko, I. (2016). Analiz rozvytku boyovykh bron'ovanykh mashyn [Analysis of the development of combat armored vehicles]. *Modern information technologies in the field of security and defense*, 2(26), 127 – 132. (in Ukrainian). Available from : http://nbuv.gov.ua/UJRN/sitsbo_2016_2_24
 9. From the factory to the battle: the new infantry fighting vehicle "Kevlar-E" was handed over to the Armed Forces. Available from : https://defence-ua.com/news/z_zavodu_u_bij_nova_bojova_mashina_pihoti_kevlar_e_vid_kompaniji_ukrinmash_peredana_zbrojnim_silam-6243.html (date of application: 17.11.2022).
 10. Weapons of Ukrainian victory: Turkish MRAP Kirpi. Available from : <https://root-nation.com/ua/articles-ua/weapons-ua/ua-bronemashini-mrap-kirpi/> (date of application: 17.11.2022).

12. Брель М.П. Анализ применения нестандартных защитных устройств для боевых бронированных машин. *Сборник научных статей военной академии Республики Беларусь*. 2018. № 34. С. 127-134.
13. Лисий М., Мисик А., Дачковський В. Горбачова Я., Напрямки розвитку озброєння та військової техніки щодо підвищення рівня захищеності: зб. наук. праць Національної академії Державної прикордонної служби України Серія: військові та технічні науки. 2019. № 3 (87). С. 411-428. DOI: <https://doi.org/10.32453/3.V81i3.483>
14. Керамічний щит для бронетехніки. URL : <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/news/Pages/View.aspx?MessageID=3926>
15. Загорянський В.Г. Обоснование применимости биметалла сталь-алюминий по расчетным критериям противопульной бронестойкости. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія: машинобудування*. Кременчуг. № 3 (75). 2015. С. 37-41.
16. Dachkovskiy V. Horbachova Y, Modeling of the behind armor action of fragments of armor obstacle on elements of combat armored vehicles. *Political Science and Security Studies Journal*. 2021. № 2(1). P. 26-32. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4646156>
17. Майстренко А.Л., Куш В.І., Кулич В.Г., Нешпор О.В., Бісик С.П. Підвищення захисту бойових броньованих машин від ураження 12,7-мм кулями Б-32. *Озброєння та військова техніка*. Київ, 2017. № 1(13). С. 18 – 23. DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.1\(13\).18-23](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.1(13).18-23).
18. Zhang Yiben, Sun Lingyu, Li Lijun, Wang Taikun, Shen Le Experimental and numerical investigations on low-velocity impact response of high strength steel/composite hybrid plate. *International Journal of Impact Engineering*. 2019. Vol. 123. P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/>
11. Dachkovskiy V.O. Method of determination of survival characteristics of weapons and military equipment. *Social development & Security*. 2020. №10(1), p. 18 – 24. (in Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.1.3>
12. Brel M.P. Analysis of the use of non-standard protective devices for armored combat vehicles. Collection of scientific articles of the military academy of the Republic of Belarus. 2018. № 34. p. 127-134. (in Belarus).
13. Lysyi, M., Mysyk A., Dachkovskiy, V. & Horbachova, Y., (2019). Napryamky rozvytku ozbroynnya ta viys'kovoyi tekhniki shchodo pidvyshchennya rivnya zakhyshchenosti [Areas of development of armaments and military equipment to increase the level of security]. Collection of scientific works of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Military and Technical Sciences, 81 (3), 391-408. (in Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.32453/3.V81i3.483>
14. Ceramic shield for armored vehicles. Available from : <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/news/Pages/View.aspx?MessageID=3926> (date of application: 17.11.2022).
15. Zagoryansky V.G. Justification of the applicability of steel-aluminum bimetal according to the calculation criteria of bulletproof armor resistance. *Bulletin of NTUU "KPI". Series: mechanical engineering*. Kremenchug. № 3 (75). 2015. p. 37-41.
16. Dachkovskiy V. Horbachova Y, Modeling of the behind armor action of fragments of armor obstacle on elements of combat armored vehicles. *Political Science and Security Studies Journal*. 2021. № 2(1). P. 26-32. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4646156>
17. Maistrenko A. L., Kush V. I., Kulych V. G., Neshpor O. V., Bisik S. P. Increasing the protection of combat armored vehicles against damage by 12.7-mm B-32 bullets. *Armament and military equipment*. Kyiv, 2017. № 1(13). p. 18–23. DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.1\(13\).18-23](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2017.1(13).18-23)

- j.ijimpeng.2018.08.015
19. Костюк В.В., Русіло П.О., Калінін О.М., Будяну Р.Г., Варванець Ю.В. Оцінка підвищення рівня захищеності автомобілів багатоцільового призначення. *Вісник НТУ«ХПІ»*, 2014, №14(1057). С. 1–9.
 20. Голуб В.А. Методика обґрунтування рівня захищеності бойових колісних машин. *Системи озброєння і військова техніка. Київ*, 2013. № 3 (35). С.9-12.
 21. Антипко О.Б., Бирюков И.Ю., Сыщук С.И., Щепцов А.В. Постановка задачи экспериментального исследования составного боеприпаса и программа испытаний для стрелкового оружия. *Система озброєння і військова техніка*, 2016. № 1 (45). С.10-13.
 22. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. Москва: Атомиздат, 1978. 232 с.
 23. Барабашчук В.И., Креденцер Б.П., Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике. Київ: Техника, 1984. 200 с.
 24. Лавренчик В. Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
 25. Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 257 с. ISBN 5-321-00319-X
 26. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. Москва: Машиностроение, 1981. 184 с.
 27. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента (пер. с англ. под ред. Лецкого Э.К., Марковой Е.В.). Москва: Мир, 1981. 520 с.
 18. Zhang Yiben, Sun Lingyu, Li Lijun, Wang Taikun, Shen Le Experimental and numerical investigations on low-velocity impact response of high strength steel/composite hybrid plate. *International. Journal of Impact Engineering*. 2019. Vol. 123. P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.015>
 19. Kostyuk V.V., Rusilo P.O., Kalinin O.M., Budyanu R.G., Varvanets Yu.V. Assessment of increasing the level of security of multi-purpose vehicles. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2014, №14(1057). p. 1-9.
 20. Golub V.A. Methodology for substantiating the level of protection of combat wheeled vehicles. *Weapon systems and military equipment*. Kyiv, 2013. № 3 (35). p.9-12.
 21. Antipko O.B., Biryukov I.Yu., Syshchuk S.I., Scheptsov A.V. Statement of the problem of an experimental study of a composite ammunition and a test program for small arms. *Recovery system and military equipment*, 2016. № 1 (45). p.10-13.
 22. Zazhigaev L.S., Kishyan A.A., Romanikov Yu.I. Methods for planning and processing the results of a physical experiment. Moscow: Atomizdat, 1978. 232 p.
 23. Barabashchuk V.I., Kredentser B.P., Miroshnichenko V.I. Planning an experiment in technology. Kiev: Technique, 1984. 200 p.
 24. Lavrenchik V.N., Setting up a physical experiment and statistical processing of its results. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 272 p.
 25. Spirin N.A., Lavrov V.V. Methods for planning and processing the results of an engineering experiment. Ekaterinburg: GOU VPO USTU-UPI, 2004. 257 p. ISBN 5-321-00319-X.
 26. Spiridonov AA Planning an experiment in the study of technological processes. Moscow: Engineering, 1981. 184 p.
 27. Johnson N., Lyon F. Statistics and experiment planning in engineering and science: Methods of experiment planning (translated from English, edited by Letsky E.K., Markova E.V.). Moscow: Mir, 1981. 520 p.