Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»

> Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

БОЛЮБАШ ЄВГЕН СЕРГІЙОВИЧ

УДК 629.76/.78

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ РОЗДІЛЕННЯ РАКЕТНО-КОСМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПІРОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ

Спеціальність 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Є.С. Болюбаш

Науковий керівник:

Логвиненко Анатолій Іванович, кандидат технічних наук

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Болюбаш С.С. Удосконалення системи розділення ракетно-космічних елементів за допомогою піротехнічних пристроїв. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка у галузі знань 13 – Механічна інженерія. – ДП «КБ «Південне», Дніпро, 2025.

В умовах зростаючого обсягу космічних запусків та посилення конкуренції на ринку космічних послуг, особлива увага приділяється зниженню вартості запусків, зменшенню маси ракетних систем та космічних апаратів, а також забезпеченню високого рівня безпеки. У цьому контексті важливу роль відіграють системи розділення, які повинні бути легкими, ефективними та надійними.

Серед систем розділення, що використовуються в ракетно-космічній техніці, актуальним є питання розробки нових, більш ефективних та надійних систем. Сучасні вимоги до безпеки та охорони навколишнього середовища висувають жорсткі вимоги до надійності ракет-носіїв та зменшення наслідків аварійних ситуацій. У зв'язку з цим сучасні ракети-носії мають оснащуватися ефективними системами розділення та системами безпеки. Перспективними виконавчими елементами в цих системах є лінійні кумулятивні заряди: вони легкі, ефективні, надійно перерізають аварійних ситуацій.

Проєктування систем розділення на основі лінійних кумулятивних зарядів є складним завданням. Ефективність дії лінійних кумулятивних зарядів, зокрема глибина проникнення кумулятивного струменя, критично залежить від низки параметрів, ключовими з яких при використанні зарядів нормованого ряду є типорозмір (діаметр) лінійного кумулятивного заряду та фокусна відстань. Відхилення від оптимальної (раціональної) фокусної відстані призводить до зниження ефективності лінійного кумулятивного заряду, що вимагає використання лінійних кумулятивних зарядів більшого типорозміру. Це, в свою чергу, зумовлює збільшення маси конструкції, посилення ударно-хвильових навантажень, зростання вартості та загальне зниження ефективності системи.

Під час польоту ракета-носій зазнає значних теплових і механічних навантажень. Для захисту конструктивних елементів від високих температур і аеродинамічних впливів широко використовують багатошарові конструкції (перешкоди), де перший (силовий) шар є металевим (наприклад, зі сплаву 2219), а наступні складаються з спеціальних захисних покриттів у вигляді композиційних матеріалів. При розділенні таких перешкод процес проникнення кумулятивного струменю ускладнюється через послідовну взаємодію струменя з різнорідними матеріалами, кожен з яких має специфічні фізико-механічні характеристики та особливості руйнування. Тому для оптимізації конструкцій і підвищення їхньої ефективності виникає нагальна необхідність у дослідженні проєктних параметрів лінійного кумулятивного заряду саме для таких типових для ракетно-космічної техніки багатошарових перешкод.

У дисертаційній роботі виконано комплексний аналіз сучасного стану виконавчих елементів систем розділення, зокрема лінійних кумулятивних зарядів з напівциліндричною кумулятивною виїмкою, що дозволило виявити основні науково-технічні проблеми. Існуючі методики та математичні моделі недостатньо точно описують процес формування та проникнення кумулятивного струменя лінійного кумулятивного заряду, в тому числі вітчизняного виробництва у якого кумулятивна виїмка напівциліндричної форми, що ускладнює оптимізацію цих параметрів.

Проєктування ефективних систем розділення ракетно-космічних елементів, що використовують лінійні кумулятивні заряди для розділення багатошарових перешкод, є складним науково-технічним завданням. Визначення оптимальних проєктних параметрів виконавчого елементу – типорозміру та фокусної відстані – для забезпечення ефективного проникнення в багатошарову перешкоду обумовлене залежністю цього процесу від багатьох факторів, включаючи характеристики матеріалів кумулятивної виїмки та шарів перешкоди, геометричні розміри кумулятивного струменю і кумулятивної виїмки, тип і кількість вибухової речовини, фокусну відстань, а також технологічний рівень виробництва лінійного кумулятивного заряду.

Таким чином, проєктування ефективних систем розділення, шляхом підвищення ефективності системи розділення, що досягається визначенням раціонального типорозміру лінійного кумулятивного заряду та раціональної фокусної відстані для перерізання багатошарової перешкоди, у якої перший шар з алюмінієвого сплаву марки 2219, а два наступні з композиційного багатофункціонального покриття є актуальною та своєчасною науковою задачею.

У роботі вперше розроблено методику експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення кумулятивного струменя лінійного кумулятивного заряду в перешкоду, яка відрізняється від наявних тим, що лінійний кумулятивний заряд встановлюється під малим кутом (1-2°) до перешкоди, що дозволяє дослідити квазінеперервний характер проникнення кумулятивного струменю при змінній фокусній відстані в заданому інтервалі.

Отримав розвиток розрахунок оптимальної фокусної відстані лінійного кумулятивного заряду на основі квадратичної апроксимації, який вперше реалізовано в алгоритмі визначення цього параметра, що дозволило підвищити точність розрахунку.

Вперше розроблено математичну модель залежності глибини проникнення кумулятивного струменю від фокусної відстані лінійного кумулятивного заряду діаметром 5 мм з напівциліндричною кумулятивною виїмкою діаметром 2,3 мм, висотою корпусу лінійного кумулятивного заряду 4,3 мм наповненого гексогеном 0,0115 кг/м у перешкоду зі сплаву 2219 в діапазоні фокусних відстаней від 4,1 до 6,9 мм, що дозволило визначити оптимальну (4,86 мм) і раціональну (5,0 мм) фокусні відстані.

Улосконалено розрахунок глибини проникнення кумулятивного струменю лінійного кумулятивного заряду 3 напівциліндричною кумулятивною виїмкою в перешкоди складної геометричної форми шляхом інтеграції гідродинамічного підходу 3 новими напівемпіричними коефіцієнтами, що враховують вплив фокусної відстані (k_F), технологічних факторів (k_т) та інших фізичних ефектів (k), що відповідає особливостям проникнення кумулятивного струменю лінійного кумулятивного заряду з напівциліндричною кумулятивною виїмкою.

Вперше розроблено методику визначення раціонального типорозміру лінійного кумулятивного заряду, яка базується на порівнянні значення глибини проникнення кумулятивного струменю (з врахуванням впливу фокусної відстані) з еквівалентною товщиною багатошарової перешкоди і включає етап експериментального підтвердження, що дозволяє виконувати гарантоване розділення багатошарових перешкод елементів ракетно-космічної техніки.

Вперше розроблено математичну модель для розрахунку еквівалентної товщини багатошарової перешкоди ($S_{e\kappa \theta}$) стосовно дії кумулятивного струменю лінійного кумулятивного заряду, що враховує товщину, густину та міцність матеріалів кожного шару, а також інтегрує двофазний (гідродинамічний та міцнісний) характер взаємодії через вагові коефіцієнти, що дозволяє скоротити об'єм експериментальної перевірки розділення багатошарових перешкод елементів ракетно-космічної техніки.

Дістало подальшого розвитку уявлення про вплив фокусної відстані лінійного кумулятивного заряду та сукупності технологічних факторів (точність виготовлення, неоднорідність вибухової речовини тощо) на процес проникнення кумулятивного струменю лінійного кумулятивного заряду з напівциліндричною кумулятивною виїмкою, що дозволило встановити особливості пошарового розділення визначеної перешкоди.

На основі отриманих результатів розроблено методики, алгоритм та математичні моделі, які дозволяють на етапах проєктування обґрунтовано визначати раціональні параметри (фокусну відстань, типорозмір) лінійного кумулятивного заряду для систем розділення ракетно-космічної техніки, скорочуючи терміни та вартість проєктно-конструкторських робіт i експериментального відпрацювання внаслідок підвищення точності розрахунків та зменшення обсягу необхідних натурних випробувань.

Отримано конкретні, експериментально підтверджені проєктні параметри (раціональна фокусна відстань 5,0 мм, раціональний типорозмір (діаметр) 5 мм) для ефективного розділення багатошарової перешкоди, у якої 2219, перший шар 3i сплаву а два наступні 3 композиційного багатофункціонального покриття, що безпосередньо використовуються при розробці корпусного відсіку нової розробки (оцінка ймовірності безвідмовної роботи $P(t) \ge 0,99995$ за методом Босса).

Визначені на основі розроблених методик проєктні параметри лінійного кумулятивного заряду дозволили підвищити ефективність системи розділення: зменшено діаметр лінійного кумулятивного заряду на 28,6%, масу вибухової речовини на 56%, підвищено розрахункову приведену ефективність лінійного кумулятивного заряду на 126%, знижено його погонну масу на 0,057 кг/м, що безпосередньо сприяє збільшенню маси корисного навантаження та загальної надійності ракети-носія.

Розроблено універсальні дослідні конструкції (установки) та удосконалено підходи до проведення експериментів з лінійним кумулятивним зарядом, які можуть бути використані конструкторськими та науковими підрозділами для подальших досліджень і відпрацювання піротехнічних систем розділення для нових матеріалів та конструкцій.

Результати роботи, включаючи методики, математичні моделі та напівемпіричні залежності, знайшли практичне використання у виробничому процесі ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля (м. Дніпро) при проєктуванні та

розробці робочої конструкторської документації на систему розділення корпусного відсіку нової розробки та систему автоматичного припинення польоту, а також використовуються у навчальному процесі в аспірантурі підприємства (підтверджено актами впровадження).

Межі застосування – ЛКЗ з напівциліндричною КВ діаметром від 4,3 до 8 мм на перешкодах з алюмінієвого сплаву марки 2219 або АМг6 (напівнескінченної товщини) та багатошарових, у яких перший шар з алюмінієвого сплаву (марки 2219 або АМг6) має товщину, меншу за глибину проникнення КС в аналогічну напівнескінченну перешкоду, а наступні шари виконані з композиційних матеріалів (густиною від 340 до 1800 кг/м³, межею міцності на розрив від 0,8 до 474 МПа). Застосовність моделі та методики встановлена для товщин багатошарової перешкоди: s_1 до 5 мм, s_2 до 5 мм, s_3 до 8 мм.

Ключові слова: лінійний кумулятивний заряд, моделювання, детонація, експериментальні дані, композиційний матеріал, багатофункціональне покриття, канал заряду, критичний діаметр детонації, модель руйнування, механічні властивості, міцність, напруження, товщина шарів, мікроструктура, дислокація.

ABSTRACT

Boliubash Ye.S. Improvement of the separation system of rocket-space elements using pyrotechnic devices. – Qualifying scientific work as a manuscript

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 134 – Aviation and Space Rocket Engineering in the field of knowledge 13 – Mechanical Engineering. – Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, 2025.

Amidst the growing volume of space launches and increasing competition in the space services market, particular attention is paid to reducing launch costs, decreasing the mass of rocket systems and spacecraft, and ensuring a high level of safety. In this context, separation systems play an important role, as they must be lightweight, effective, and reliable.

Among the separation systems used in rocket and space technology, the development of new, more effective and reliable systems is a relevant issue. Modern safety and environmental protection requirements impose stringent demands on the reliability of launch vehicles and the mitigation of consequences in emergency situations. In this regard, modern launch vehicles must be equipped with effective separation systems and safety systems. Linear shaped charges are promising executive elements in these systems: they are lightweight, effective, reliably cut the emergency launch vehicle into smaller fragments, and contribute to reducing the consequences of emergency situations.

The design of separation systems based on linear shaped charges is a complex task. The effectiveness of linear shaped charges, in particular the penetration depth of the cumulative jet, critically depends on a number of parameters, the key of which when using charges of a standardized series are the size (diameter) of the linear shaped charge and the stand-off distance. Deviations from the optimal (rational) stand-off distance lead to a decrease in the effectiveness of the linear shaped charge, which requires the use of charges of a larger size. This, in turn, leads to an increase in the structural mass, intensification of shock-wave loads, increase in cost, and overall decrease in system efficiency.

During flight, the launch vehicle is subjected to significant thermal and mechanical loads. Multilayer structures (barriers) are widely used to protect structural elements from high temperatures and aerodynamic effects, where the first (power) layer is metallic (e.g., made of alloy 2219), and subsequent layers consist of special protective coatings in the form of composite materials. When separating such barriers, the shaped charge jet penetration process is complicated by the sequential interaction of the jet with dissimilar materials, each having specific physical and mechanical characteristics and fracture peculiarities. Therefore, for optimizing structures and increasing their effectiveness, there is an urgent need to study the design parameters of the linear shaped charge specifically for such multilayer barriers typical for rocket and space technology.

In the dissertation work, a comprehensive analysis of the current state of executive elements of separation systems, particularly linear shaped charges with a semi-cylindrical cumulative liner, was conducted, which allowed identifying the main scientific and technical problems. Existing methodologies and mathematical models do not sufficiently accurately describe the process of formation and penetration of a shaped charge jet of a linear shaped charge, including those of domestic production with a semi-cylindrical cumulative liner, which complicates the optimization of these parameters.

Designing effective separation systems for rocket and space technology elements using linear shaped charges for separating multilayer barriers is a complex scientific and technical task. Determining the optimal design parameters of the executive element – size and stand-off distance – to ensure effective penetration into a multilayer barrier is conditioned by the dependence of this process on many factors, including the characteristics of the cumulative liner material and barrier layers, geometric dimensions of the shaped charge jet and cumulative liner, type and amount of explosive material, stand-off distance, as well as the technological level of linear shaped charge production.

Thus, designing effective separation systems by increasing the effectiveness of the separation system, achieved by determining the rational size of the linear shaped charge and the rational stand-off distance for cutting a multilayer barrier where the first layer is made of aluminum alloy grade 2219 and the next two layers are made of a composite multifunctional coating, is a relevant and timely scientific task.

In this work, an experimental methodology for determining stand-off distance and penetration depth of a shaped charge jet of a linear shaped charge into a barrier is developed for the first time. This methodology differs from existing ones in that the linear shaped charge is placed at a small angle $(1-2^\circ)$ to the barrier, which allows studying the quasi-continuous nature of shaped charge jet penetration at varying stand-off distance within a given interval.

The calculation of the optimal stand-off distance for a linear shaped charge has been advanced based on quadratic approximation, which has been implemented for the first time in an algorithm for determining this parameter, allowing for increased calculation accuracy.

For the first time, a mathematical model of the dependence of shaped charge jet penetration depth on stand-off distance for a linear shaped charge with a diameter of 5 mm, a semi-cylindrical cumulative liner with a diameter of 2.3 mm, a linear shaped charge body height of 4.3 mm filled with hexogen 0.0115 kg/m, into a barrier made of alloy 2219 in the stand-off distance range from 4.1 to 6.9 mm, has been developed, which allowed determining the optimal (4.86 mm) and rational (5.0 mm) stand-off distances

The calculation of penetration depth of a shaped charge jet of a linear shaped charge with a semi-cylindrical cumulative liner into barriers of complex geometric shape has been improved by integrating the hydrodynamic approach with new semi-empirical coefficients that take into account the influence of stand-off distance (k_F), technological factors (k_T), and other physical effects (k), which corresponds to the

peculiarities of penetration of a shaped charge jet of a linear shaped charge with a semi-cylindrical cumulative liner.

For the first time, a methodology for determining the rational size of a linear shaped charge has been developed, which is based on comparing the value of the shaped charge jet penetration depth (taking into account the influence of stand-off distance) with the equivalent thickness of a multilayer barrier and includes an experimental confirmation stage, which allows performing guaranteed separation of multilayer barriers of rocket and space technology elements

For the first time, a mathematical model for calculating the equivalent thickness of a multilayer barrier ($S_{e_{KB}}$) with respect to the action of a shaped charge jet of a linear shaped charge has been developed, which takes into account the thickness, density, and strength of each layer's materials, and also integrates the two-phase (hydrodynamic and strength) nature of interaction through weighting factors, which allows reducing the volume of experimental verification of separation of multilayer barriers of rocket and space technology elements.

The understanding of the influence of the stand-off distance of a linear shaped charge and the set of technological factors (manufacturing accuracy, heterogeneity of the explosive, etc.) on the process of penetration of a shaped charge jet of a linear shaped charge with a semi-cylindrical cumulative liner has been further developed, which allowed establishing the peculiarities of layer-by-layer separation of a defined barrier.

Based on the obtained results, methodologies, an algorithm, and mathematical models have been developed, which allow for substantiated determination of rational design parameters (stand-off distance, size) of a linear shaped charge for separation systems of rocket and space technology at the design stages, reducing the time and cost of design and development work and experimental verification due to increased calculation accuracy and reduced volume of necessary full-scale tests.

Specific, experimentally confirmed design parameters (rational stand-off distance 5.0 mm, rational size (diameter) 5 mm) have been obtained for the

effective separation of a multilayer barrier where the first layer is made of alloy 2219 and the next two layers are made of a composite multifunctional coating. These parameters are directly used in the development of a new design bulkhead (reliability assessment $P(t) \ge 0.99995$ by Boss's method).

The design parameters of the linear shaped charge determined based on the developed methodologies allowed increasing the effectiveness of the separation system: the diameter of the linear shaped charge was reduced by 28.6 %, the mass of explosive material by 56 %, the calculated specific effectiveness of the linear shaped charge was increased by 126 %, its linear mass was reduced by 0.057 kg/m, which directly contributes to increasing the payload mass and the overall reliability of the launch vehicle.

Universal experimental setups (installations) have been developed and approaches to conducting experiments with linear shaped charges have been improved, which can be used by design and scientific departments for further research and development of pyrotechnic separation systems for new materials and structures.

The results of this work, including the methodologies, mathematical models, and semi-empirical relationships, have found practical use in the production process of the Yuzhnoye State Design Office named after M.K. Yangel (Dnipro) in the design and development of working design documentation for the separation system of a new bulkhead and the flight termination system, and are also used in the educational process in the postgraduate study of the enterprise (as confirmed by implementation acts).

Application limits – LSCs with a semi-cylindrical cumulative liner with a diameter from 4.3 to 8 mm on barriers made of aluminum alloy grade 2219 or AMg6 (semi-infinite thickness) and multilayer barriers, in which the first layer made of aluminum alloy (grade 2219 or AMg6) has a thickness less than the penetration depth of the SCJ into an analogous semi-infinite barrier, and subsequent layers are made of composite materials (with a density from 340 to 1800 kg/m³,

ultimate tensile strength from 0.8 to 474 MPa). The applicability of the model and methodology is established for multilayer barrier thicknesses: s_1 up to 5 mm, s_2 up to 5 mm and s_3 up to 8 mm.

Keywords: linear shaped charge, modeling, detonation, experimental data, composite material, multifunctional coating, charge channel, critical detonation diameter, fracture model, mechanical properties, strength, stress, thickness of layers, microstructure, dislocation.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

Статті, опубліковані в періодичних виданнях, проіндексованих у базах Scopus ma/aбo Web of Science або включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України:

1. **Boliubash Y.** Experimental determination of the focal distance of the cumulative pyrotechnic device of the separation system of the launch vehicle. *Tehnički glasnik. Technical Journal.* 2025. Vol. 19, No. 1. P. 142-148. URL: <u>https://doi.org/10.31803/tg-20240516182956</u> (Індексована: *Web of Science Core Collection (Emerging Sources Citation Index - ESCI); Scopus; EBSCOhost Academic Search Complete; EBSCOhost – One Belt, One Road Reference Source Product; ERIH PLUS etc.* Імпакт-фактор журналу: JIF(2023) = 0.7 (Q3)), [in English].

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

2. Дружинина О. А., Болюбаш Е. С. Термодеформационные процессы (усадка) в металле при проведении сварочных работ при изготовлении корпусных отсеков. Вісник дніпровського університету. № 4 том 26. Серія: Ракетно-космічна техніка. Дніпро, 2018. Вип. 21. С. 27-33. URL: <u>https://doi.org/10.15421/451806</u> (Індексована Ulrichsweb (Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Index Copernicus, CrossRef, Vernadsky National Library of Ukraine, ResearchBible), [in Russian].

3. Болюбаш Є.С. Експериментальне дослідження працездатності піротехнічних пристроїв системи розділення ракет-носіїв. *Космічна техніка*. *Ракетне озброєння. Space Technology. Missile Armaments*. Дніпро, 2024. Вип. № 1. С. 121-128. URL: <u>https://doi.org/10.33136/stma2024.01.121</u> (Індексована *Crossref, Google, Ouci, Duckduckgo)*, [in Ukrainian].

4. Болюбаш Є.С. Формування ефективної фокусної відстані піротехнічних пристроїв систем розділення (відділення) ракети-носія. Огляд

літератури. Вісник Дніпровського університету. Journal of Rocket-Space Technology. №4, Т.33, Серія: Ракетно-космічна техніка. Дніпро, 2024. Вип. 28. C. 26-37. URL: <u>https://doi.org/10.15421/452421</u> (Індексована Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Index Copernicus, CrossRef, Vernadsky National Library of Ukraine, ResearchBible), [in Ukrainian].

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Дружинина О. А., Болюбаш Е. С. Термодеформационные процессы (усадка) в металле при проведении сварочных работ при изготовлении корпусных отсеков. Збірник тез: ХХ міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», 11-13 квітня 2018 року. Дніпро, 2018. С. 202.

6. Болюбаш Є.С. Кумулятивний ефект та його використання для розділення ракетно-космічних елементів за допомогою піротехнічних пристроїв. Збірник доповідей. Матеріали XVII Наукових читань «Дніпровська орбіта — 2022» (26-28 жовтня). Дніпро, 2022. С. 10-15.

7. **Boliubash Y.** Section of a sheet metal by a shaped charge jet of a pyrotechnical device in rocket and space technology. *All-Ukrainian scientific and technical conference «Наука і металургія» 22-24 november. Ukrainian State University of Science and Technology of the MES of Ukraine.* Dnipro, 2022. P. 65-66.

8. Болюбаш Є.С. Методологія визначення зазорів між елементами піротехнічних пристроїв системи розділення відсіку корисного навантаження ракет-носіїв. Збірник матеріалів. Молодь: наука та інновації: матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року. Дніпро : НТУ «ДП», 2022. С. 422-423.

9. Болюбаш Є.С. Зменшення зони можливого падіння аварійних РН за рахунок використання систем розділення ракетно-космічних елементів

оснащених піротехнічними пристроями. *XXV Міжнародна молодіжна* науково-практична конференція «Людина і космос»: Збірник тез. Дніпро, 2023. С. 229.

10. Болюбаш Є.С. Методика дослідження глибини проникнення кумулятивного струменя піротехнічного пристрою системи розділення ракетиносія. *Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. «Наука і металургія», м. Дніпро, 14-16 лис. 2023 р.* Дніпро, 2023. С. 77.

11. Lohvynenko A., **Boliubash Y**. Using pyrotechnic devices in the development of separation systems for rocket and space technologies. *75th International Astronautical Congress*. Milan, 2024. IAC-24,C2,IP,7,x83209. 1 p.

12. Болюбаш Є.С. Вплив фокусної відстані встановлення кумулятивного піротехнічного пристрою на розділення елементу конструкції ракети-носія. XXVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Збірник тез. Дніпро, 2024. С. 240-241.

13. Болюбаш Є.С. Використання лінійних кумулятивних зарядів для систем розділення в ракетно-космічній техніці. Збірник доповідей. Матеріали XIX Наукових читань «Дніпровська орбіта — 2024» (23-25 жовтня). Дніпро, 2024. С. 16-21.

14. **Boliubash Y**., Lohvynenko A. Using pyrotechnic devices in the development of separation systems for rocket and space technologies. *75th International Astronautical Congress*. Milan, 2024. IAC-24,C2,IP,7,x83209. 9 p.

15. Болюбаш Є.С. Визначення глибини проникнення кумулятивного струменю в перешкоду змінної товщини. *Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф.* «*Наука і металургія», м. Дніпро, 19-20 лис. 2024 р.* Дніпро, 2024. С. 47.

АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	8
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	.14
3MICT	.17
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	.21
ВСТУП	.22
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ВИКОНАВЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ РОЗДІЛЕННЯ	Я.
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	.33
1.1 Виконавчі елементи систем розділення	.33
1.2 Загальний огляд кумулятивних зарядів	37
1.2.1 Основні поняття	.38
1.2.2 Формування кумулятивного струменя	.38
1.3 Лінійний кумулятивний заряд та його використання в РКТ	.40
1.4 Ефективність та надійність при проєктуванні СР на ЛКЗ	.49
1.5 Аналіз сучасного стану досліджень ЛКЗ	.57
1.5.1 Складність аналізу літератури	.57
1.5.2 Особливості формування та проникнення КС ЛКЗ	.58
1.6 Постановка задачі	.62
Висновки за розділом 1	.64
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ	.66
2.1 Матеріали	.66
2.2 Методи досліджень	.73
2.2.1 Моделювання взаємозв'язку між глибиною проникнення	i
фокусною відстанню	.73
2.2.2 Планування та проведення експерименту	.76
2.2.3 Метод регресійного аналізу екстремумів нелінійних функцій	.82
2.2.4. Оцінка впливу термічного розширення конструкції в польоті н	Ha
величину фокусної відстані	.84

3MICT

2.3. Розроблені та використані методи
2.3.1 Методика експериментального визначення фокусної відстані та
глибини проникнення КС в перешкоду
2.3.2 Алгоритм визначення оптимальної фокусної відстані
Висновки за розділом 296
РОЗДІЛ З. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФОКУСНОЇ
ВІДСТАНІ І ГЛИБИНИ ПРОНИКНЕННЯ КС
3.1 Теоретичне дослідження визначення глибини проникнення КС в
перешкоду
3.2 Теоретичне дослідження фокусної відстані ЛКЗ112
3.3 Розробка дослідної конструкції120
3.4 Обгрунтування об'єму експериментальних досліджень
Висновки за розділом 3
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ФОКУСНОЇ
ВІДСТАНІ І ГЛИБИНИ ПРОНИКНЕННЯ КС ЛКЗ НА
НАПІВНЕСКІНЧЕННІЙ ПЕРЕШКОДІ
4.1 Верифікація методики експериментального визначення фокусної
відстані та глибини проникнення КС
4.1.1 Об'єкт дослідження
4.1.2 Результати випробувань та їх аналіз
4.1.3 Верифікація метолики експериментального визначення фокусної
відстані та глибини проникнення КС в перешколу
4.2. Експериментальне визначення залежності глибини проникнення КС віл
фокусної відстані та оптимальних параметрів на перешколі зі сплаву
марки 2219
4 2 1 Об'скт послілжения 141
4.2.7 Do CKI дослідження 141
фокусног відстані

4.2.4 Визначення оптимальної і раціональної фокусної відстані146
4.2.5 Визначення впливу фокусної відстані на глибину проникнення КС
ЛКЗ148
4.2.6 Оцінка адекватності математичної моделі
4.3. Експериментальне дослідження глибини проникнення кумулятивного
струменю при паралельному розташуванні ЛКЗ153
4.3.1 Об'єкт дослідження154
4.3.2 Результати випробувань та їх аналіз154
4.3.3 Оцінка впливу технологічних факторів через визначення нижньої
толерантної межі глибини проникнення159
4.4. Визначення коефіцієнта корекції для розрахунку глибини проникнення
КС162
4.5 Розширення меж застосування отриманих результатів165
4.5.1. Аналіз підходу на основі відносних параметрів165
4.5.2. Прогнозування параметрів для ЛКЗ інших діаметрів для
сплаву 2219168
4.5.3. Прогнозування параметрів для ЛКЗ інших діаметрів для
сплаву АМг6169
Висновки за розділом 4169
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗДІЛЕННЯ БАГАТОШАРОВОЇ ПЕРЕШКОДИ
ЛІНІЙНИМ КУМУЛЯТИВНИМ ЗАРЯДОМ172
5.1 Постановка задачі дослідження прорізання багатошарової перешкоди
ЛКЗ для забезпечення її розділення172
5.2. Аналіз механізму руйнування перешкоди179
5.3 Визначення еквівалентної товщини багатошарової перешкоди183
5.4 Методика визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для гарантованого
розділення багатошарової перешкоди186
5.5. Верифікація методики визначення раціонального типорозміру ЛКЗ189

19

5.6. Визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для багатошарової
перешкоди на основі розробленої методики195
5.6.1. Попередня оцінка раціонального типорозміру ЛКЗ
розрахунковим способом195
5.6.2. Експериментальне підтвердження раціонального типорозміру
ЛКЗ197
5.6.3 Випробування на макеті корпусного відсіку нової розробки202
Висновки за розділом 5
ВИСНОВКИ
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ
ДОДАТОК А
ДОДАТОК Б
ДОДАТОК В
ДОДАТОК Г
ДОДАТОК Д

20

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- БФП багатофункціональне покриття
- ВКЗ вісьоциліндричний кумулятивний заряд
- ВР вибухова речовина
- ДК Дослідна конструкція
- КЗ кумулятивний заряд
- КС кумулятивний струмінь
- КВ кумулятивна виїмка
- ЛКЗ лінійний кумулятивний заряд
- ПД продукти детонації
- ПДЗ подовжений детонаційний заряд
- ПКМ полімерний композиційний матеріал
- РКТ ракетно-космічна техніка
- РН ракета-носій
- САПР система автоматизованого проєктування
- СР система розділення

ВСТУП

Актуальність теми. Ракетно-космічна техніка (РКТ) відіграє ключову роль у дослідженні космосу, запуску супутників, навігації, дистанційного зондування Землі тощо. Світовий ринок космічних запусків за останні 10 років зріс майже втричі: за 2024 рік було здійснено 259 космічних запусків, проти 92 в 2014 році. Однак, незважаючи на технологічний прогрес, проблема надійності залишається гострою: в середньому близько 5,1% запусків за цей період завершувалися частковою або повною невдачею (аварією) [1–3]. При прогнозованому зростанні інтенсивності запусків в 2028 році (за умови збереження поточної тенденції) очікується до 600 запусків на рік, що може призвести до близько 30 аварій щорічно та пов'язано з значними економічними втратами, ризиками для людей та інфраструктури, а також негативних екологічних наслідків. При цьому викликом також є посилення конкуренції на ринку космічних запусків, такими виробниками як SpaceX, Rocket Lab, Arianespace, CASC, MHI, JAXA тощо.

В таких умовах жорсткої конкуренції, для забезпечення конкурентних переваг, вирішального значення набуває пошук шляхів подальшого зниження вартості запусків, максимального зменшення маси ракетних систем і космічних апаратів, при одночасному забезпеченні найвищого рівня надійності та безпеки польотів. У цьому контексті особливе значення мають такі підсистеми ракети-носія (PH), як системи розділення (CP) ступенів та системи аварійного припинення польоту, які повинні бути легкими, ефективними, надійними, дешевими та технологічними.

Серед існуючих систем розділення в РКТ використовуються механічні (пружинні, пневматичні) та піротехнічні системи. Механічні системи часто характеризуються більшою масою, габаритами, меншою швидкодією та більшою складністю, що обмежує їх застосування в умовах жорстких масових та компонувальних обмежень. Піротехнічні СР, навпаки, відрізняються високою енергетичною щільністю, швидкодією, компактністю та відносною простотою конструкції. У якості виконавчих елементів піротехнічних СР використовуються точкові пристрої (розривні болти, пірозамки) та лінійні пристрої розділення.

Точкові піротехнічні пристрої мають низку недоліків: кількість елементів у стику обмежена, оскільки їх збільшення знижує загальну надійність системи; збільшується маса стикувальних елементів конструкції (наприклад, шпангоутів) для розміщення точкових кріплень; точковий принцип дії може зумовлювати різноімпульсність при спрацюванні та зменшує точність розділення великогабаритних конструкцій.

Лінійні пристрої розділення забезпечують більш рівномірне силове навантаження на стик та розділення по всій його довжині, що дозволяє оптимізувати конструкцію та зменшити її масу. Одним з найбільш ефективних типів лінійних пристроїв є лінійний кумулятивний заряд (ЛКЗ). Дані пристрої є перспективними для проєктування систем розділення ступенів ракети, систем аварійного припинення польоту та в деяких системах космічних апаратів.

Попри свою високу ефективність і переваги, застосування СР на основі ЛКЗ має певні особливості та обмеження, пов'язані з впливом продуктів детонації, ударною хвилею та утворенням уламків. Тому проєктування систем розділення на основі ЛКЗ є складним комплексним завданням, яке вимагає глибокої наукової основи та ретельного експериментального відпрацювання.

Важливою умовою успішного виконання процесу розділення є надійне функціонування системи, адже відмова спрацювання хоча б одного з елементів або неправильний вибір проєктних параметрів ЛКЗ може призвести до аварійних ситуацій. Таким чином, важливою задачею при проєктуванні СР на основі ЛКЗ є обґрунтований вибір їх оптимальних (раціональних) параметрів, що забезпечують ефективне і надійне розділення елементів конструкції.

ЛКЗ забезпечують ефективне розділення елементів конструкції ракети, шляхом перерізання перешкоди кумулятивним струменем (КС). Проникнення КС в перешкоду є складним динамічним процесом, що залежить від багатьох факторів.

В ракетній техніці використовуються ЛКЗ нормованого ряду. Для конкретного матеріалу та товщини елементу конструкції, основними параметрами, якими можна варіювати при проєктуванні для оптимізації процесу розділення, є фокусна відстань та типорозмір (діаметр) ЛКЗ.

Відхилення від оптимальної фокусної відстані ЛКЗ призводить до зниження ефективності, а це в свою чергу вимагає збільшення його діаметру для гарантованого розділення перешкоди. Останнє тягне за собою збільшення маси конструкції, збільшення витрат матеріалів, збільшення величини вібраційних навантажень на конструкцію, а також здорожчання виробу в цілому.

Таким чином основними проєктними параметрами дослідження яких забезпечує підвищення ефективності СР, є визначення раціонального типорозміру ЛКЗ та раціональної фокусної відстані для конкретної перешкоди.

Алюмінієві сплави, зокрема високоміцний сплав 2219, широко застосовуються у виробництві РН завдяки оптимальному поєднанню малої маси, достатньої міцності та технологічності. Цей сплав активно використовується в проєктуванні нових виробів, оскільки його властивості сприяють підвищенню масової ефективності ракетно-космічної техніки.

Під час польоту РН зазнає значних теплових і механічних навантажень. Для захисту конструктивних елементів від високих температур і аеродинамічних впливів широко використовують багатошарові конструкції (перешкоди), де перший (силовий) шар є металевим (наприклад, зі сплаву 2219), а наступні складаються з спеціальних захисних покриттів у вигляді композиційних матеріалів. При розділенні таких перешкод процес проникнення КС ускладнюється через послідовну взаємодію струменя з різнорідними матеріалами, кожен з яких має специфічні фізико-механічні характеристики та особливості руйнування. Тому для оптимізації конструкцій і підвищення їхньої ефективності виникає нагальна необхідність у дослідженні проєктних параметрів ЛКЗ саме для таких типових для РКТ багатошарових перешкод.

В умовах сучасного розвитку космічних програм, у тому числі в Україні, задача науково обґрунтованого встановлення проєктних параметрів ЛКЗ (фокусної відстані та необхідного типорозміру для забезпечення гарантованої глибини проникнення КС в конкретні конструкційні матеріали, такі як сплав 2219 та багатошарові структури з композиційних матеріалів), вивчення закономірності зміни глибини проникнення КС в залежності від величини фокусної відстані ЛКЗ та розробка методик експериментального визначення даних параметрів є важливою та актуальною науково-практичною задачею.

Розробка методик і моделей розрахунку параметрів ЛКЗ дозволить:

- 1. Підвищити точність проєктування систем розділення;
- 2. Зменшити масу та габарити конструкцій;
- 3. Скоротити витрати на проєктування і експериментальне відпрацювання;

4. Забезпечити високу надійність і ефективність піротехнічних систем розділення в умовах реальної експлуатації РКТ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу дисертаційного дослідження покладено узагальнені результати, отримані автором у процесі виконання науково-дослідних робіт в ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля у межах наступних тематичних планів:

1. «Концепція Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2021-2025 роки» схвалено розпорядженням кабінету Міністрів України від 13 січня 2021 р. №15-р.;

2. «Стратегія космічної діяльності України на період до 2022 року», затверджена Наказом Державного космічного агентства України № 100 від 21.05.2015;

3. Програми і проєкти Державного підприємства «Конструкторське

бюро «Південне ім. М.К. Янгеля».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності піротехнічної системи розділення шляхом визначення раціонального типорозміру лінійного кумулятивного заряду та раціональної фокусної відстані.

Для досягнення поставленої у дисертаційній роботі сформульовано наступні завдання дослідження:

 – розробити та верифікувати методику експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення кумулятивного струменя в перешкоду, включаючи алгоритм визначення оптимальної фокусної відстані;

 – розробити математичну модель залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані для ЛКЗ у перешкоду зі сплаву 2219 та визначити оптимальну і раціональну фокусні відстані;

уточнити математичну модель розрахунку глибини проникнення КС ЛКЗ
шляхом інтеграції експериментально визначених коефіцієнтів впливу
фокусної відстані, технологічних факторів та інших фізичних ефектів;

 розробити та верифікувати методику визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для гарантованого розділення багатошарової перешкоди, включаючи розробку математичної моделі розрахунку її еквівалентної товщини;

 визначити раціональний типорозмір ЛКЗ для розділення багатошарової перешкоди, що складається з одного шару зі сплаву марки 2219 та двох шарів композиційного багатофункціонального покриття.

Об'єкт дослідження – процес проникнення кумулятивного струменю лінійного кумулятивного заряду з напівциліндричною кумулятивною виїмкою в перешкоду в системах розділення ракетно-космічних елементів.

Предмет дослідження – ефективні проєктно-конструкторські рішення, залежності глибини ЩО досягаються встановленням проникнення кумулятивного струменю від фокусної відстані і визначенням раціонального типорозміру лінійного кумулятивного заряду 3 напівциліндричною кумулятивною виїмкою для розділення багатошарової перешкоди, де перший шар з алюмінієвого сплаву марки 2219, а два наступні з композиційного покриття в системах розділення ракетно-космічних елементів.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та вирішення завдань дослідження застосовано комплексний підхід, що включає теоретичні та експериментальні методи дослідження.

Теоретичні методи, такі як аналіз, синтез, порівняння і узагальнення результатів, використовувалися для систематизації існуючих знань про фокусну відстань і глибину проникнення КС ЛКЗ; при розробці нових методик експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС в перешкоду; визначення раціонального типорозміру (діаметра) ЛКЗ для гарантованого розділення багатошарової перешкоди. Методи математичної статистики та регресійного аналізу (зокрема, апроксимація поліномом другого ступеня) для встановлення функціональної залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані та обробки масивів експериментальних даних. Методи оптимізації (аналітичне знаходження екстремуму квадратичної функції) для визначення оптимальної фокусної відстані за експериментальними даними. Статистичний аналіз (розрахунок нижньої межі одностороннього толерантного інтервалу) для кількісної оцінки впливу технологічних факторів на гарантовану глибину проникнення КС.

Експериментальні методи включали натурний фізичний експеримент, який здійснювався для:

визначення залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані
в напівнескінченну перешкоду (сплави 2219, АМг6) за розробленою методикою встановлення ЛКЗ під малим кутом (1-2°);

– визначення глибини проникнення КС в однорідну напівнескінченну перешкоду при паралельному розташуванні ЛКЗ;

 визначення факту прорізання багатошарових перешкод для верифікації методики розрахунку раціонального типорозміру ЛКЗ.

При проведенні експериментальних досліджень використовувались методики планування експерименту [4], та стандартні методи обробки результатів вимірювань [5].

Використання наведених методів дослідження забезпечує достовірність отриманих результатів, досягнення поставленої мети та вирішення завдань, визначених у роботі.

Наукова новизна отриманих результатів досліджень полягає в тому, що:

1. Вперше розроблено методику експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення кумулятивного струменя ЛКЗ в перешкоду, яка відрізняється від наявних тим, що ЛКЗ встановлюється під малим кутом (1-2°) до перешкоди, що дозволяє дослідити квазінеперервний характер проникнення КС при змінній фокусній відстані в заданому інтервалі.

2. Отримав розвиток розрахунок оптимальної фокусної відстані ЛКЗ на основі квадратичної апроксимації, який вперше реалізовано в алгоритмі визначення цього параметра, що дозволило підвищити точність розрахунку.

3. Вперше розроблено математичну модель залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані ЛКЗ діаметром 5 MM 3 напівциліндричною КВ діаметром 2,3 мм, висотою корпусу ЛКЗ 4,3 мм наповненого гексогеном 0,0115 кг/м у перешкоду зі сплаву 2219 в діапазоні фокусних відстаней від 4,1 до 6,9 мм, що дозволило визначити оптимальну $(F_{opt} = 4,86 \text{ мм})$ і раціональну $(F_{pau} = 5,0 \text{ мм})$ фокусні відстані.

4. Удосконалено розрахунок глибини проникнення КС ЛКЗ з напівциліндричною КВ в перешкоди складної геометричної форми шляхом

інтеграції гідродинамічного підходу з новими напівемпіричними коефіцієнтами, що враховують вплив фокусної відстані (k_F), технологічних факторів (k_T) та інших фізичних ефектів (k), що відповідає особливостям проникнення КС ЛКЗ з напівциліндричною КВ.

5. Вперше розроблено методику визначення раціонального типорозміру ЛКЗ, яка базується на порівнянні значення глибини проникнення КС (з врахуванням впливу фокусної відстані) з еквівалентною товщиною багатошарової перешкоди і включає етап експериментального підтвердження, що дозволяє виконувати гарантоване розділення багатошарових перешкод елементів РКТ.

6. Вперше розроблено математичну модель для розрахунку еквівалентної товщини багатошарової перешкоди ($S_{e\kappa 6}$) стосовно дії КС ЛКЗ, що враховує товщину, густину та міцність матеріалів кожного шару, а також інтегрує двофазний (гідродинамічний та міцнісний) характер взаємодії через вагові коефіцієнти, що дозволяє скоротити об'єм експериментальної перевірки розділення багатошарових перешкод елементів РКТ.

7. Дістало подальшого розвитку уявлення про вплив фокусної відстані ЛКЗ та сукупності технологічних факторів (точність виготовлення, неоднорідність ВР тощо) на процес проникнення КС ЛКЗ з напівциліндричною КВ, що дозволило встановити особливості пошарового розділення визначеної перешкоди.

Практичне значення отриманих результатів є таким:

1. Розроблено методики, алгоритм та математичні моделі, які дозволяють на етапах проєктування обґрунтовано визначати раціональні параметри (фокусну відстань, типорозмір) ЛКЗ для систем розділення РКТ, скорочуючи терміни та вартість проєктно-конструкторських робіт і експериментального відпрацювання внаслідок підвищення точності розрахунків та зменшення обсягу необхідних натурних випробувань.

2. Отримано конкретні, експериментально підтверджені проєктні параметри (раціональна фокусна відстань $F_{pay} = 5,0$ мм, раціональний типорозмір ЛКЗ D = 5 мм) для ефективного розділення багатошарової перешкоди, у якої перший шар зі сплаву 2219, а два наступні з композиційного БФП, що безпосередньо використовуються при розробці корпусного відсіку нової розробки (оцінка ймовірності безвідмовної роботи $P(t) \ge 0,99995$ за методом Босса).

3. Визначені на основі розроблених методик проєктні параметри ЛКЗ дозволили підвищити ефективність системи розділення: зменшено діаметр ЛКЗ на 28,6 %, масу ВР на 56 %, підвищено розрахункову приведену ефективність ЛКЗ на 126 %, знижено погонну масу ЛКЗ (~ 0,057 кг/м), що безпосередньо сприяє збільшенню маси корисного навантаження та загальної надійності ракети-носія.

4. Розроблено універсальні дослідні конструкції (установки) та удосконалено підходи до проведення експериментів з ЛКЗ, які можуть бути використані конструкторськими та науковими підрозділами для подальших досліджень і відпрацювання піротехнічних систем розділення для нових матеріалів та конструкцій.

5. Результати роботи, включаючи методики, математичні моделі та напівемпіричні залежності, знайшли практичне використання у виробничому процесі ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля (м. Дніпро) при проєктуванні та розробці робочої конструкторської документації на систему розділення корпусного відсіку нової розробки та систему автоматичного припинення польоту, а також використовуються у навчальному процесі в аспірантурі підприємства (підтверджено актами впровадження (додаток А)).

Особистий внесок здобувача полягає: у проведені критичного аналізу основних існуючих конструкцій ЛКЗ і СР оснащених ЛКЗ; теоретичному аналізі існуючих математичних моделей розрахунку глибини проникнення КС;

теоретичному аналізі формування ефективної фокусної відстані ЛКЗ; в розробці нової методики експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС в перешкоду; алгоритму визначення оптимальної фокусної відстані; в розробці дослідної конструкції; в участі у проведені всіх експериментальних досліджень; в обробці і подальшому аналізі отриманих експериментальних даних; визначенні залежності глибини проникнення КС в перешкоду від значення фокусної відстані, визначені оптимальної і раціональної фокусної відстані, розрахунку впливу технологічних факторів на глибину проникнення КС; розробці нової методики визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для гарантованого розділення багатошарової перешкоди.

За підсумками проведених досліджень опубліковано 15 наукових робіт, серед яких 1 стаття [6] у закордонному виданні, що індексується в наукометричних базах Web of Science Core Collection; Scopus; EBSCOhost Academic Search Complete; EBSCOhost – One Belt, One Road Reference Source Product; ERIH PLUS etc.; 3 статті [7–9] у фахових виданнях України, включених до наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Index Copernicus, CrossRef, Vernadsky National Library of Ukraine, ResearchBible, Ouci. Без співавторства виконано 3 статті [6,8,9]. У матеріалах наукових конференцій і збірниках тез доповідей опубліковано 11 праць [1,2,10–18].

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [7] – розробка концепції статті, визначення величини усадки матеріалу, зумовленої деформаціями та залишковими напруженнями після зварювання корпусного відсіку, формулювання висновків; [11] – автору належить ідея та розробка структури тез; [2,18] – автор виконав основну частину роботи з написання тексту тез та доповіді; співавтором здійснено уточнення структури та узгодження поданого матеріалу.

Усі етапи дослідження, включаючи аналіз та узагальнення теоретичних і експериментальних результатів, а також формулювання висновків і

рекомендацій, винесених на захист, виконані здобувачем самостійно. Текст дисертаційної роботи написано автором особисто.

Апробація результатів дисертації

Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідалися й ХХ Міжнародній молодіжній науково-практичній обговорювалися на: конференції «Людина і космос» (м. Дніпро, 2018р.), Всеукраїнській науковотехнічній конференції «Наука і металургія-2022» (м. Дніпро, 2022р.), XVII Наукових читаннях «Дніпровська орбіта-2022» (м. Дніпро, 2022p.), X Міжнародній науково-технічній конференції «Молодь: наука та інновації» (м. Дніпро, 2022р.), XXV Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і космос» (м. Дніпро, 2023р.), Всеукраїнській науковотехнічній конференції «Наука і металургія-2023» (м. Дніпро, 2023р.), XXVI Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і космос» (м. Дніпро, 2024р.), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Наука і металургія-2024» (м. Дніпро, 2024р.).

Структура та обсяг дисертації

Дисертація включає вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список використаних джерел, що налічує 141 найменуваня, та 5 додатків. Загальний обсяг роботи становить 236 сторінок. У роботі представлено 87 рисунків і 36 таблиць.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ВИКОНАВЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ РОЗДІЛЕННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Виконавчі елементи систем розділення

Ракетно-космічна техніка відіграє ключову роль у дослідженні космосу, запуску супутників та інших важливих місіях. Одним із найбільш критичних етапів у функціонуванні РКТ є процес розділення. Для цього використовуються системи, які забезпечують процес розділення ступенів ракети-носія та інших елементів конструкції [19,20].

Ці системи призначені для відділення та відведення з траєкторії виведення відпрацьованих ступенів РН, відокремлення корисного вантажу, скидання пасивних мас, що виконали своє функціональне призначення, розриву зв'язків конструкції утримання ракети на пусковому столі, а також для аварійного припинення польоту [1,2,6,8,19,21,22]. Конструктивні елементи РН, що розділяються в польоті, наведено на Рис. 1.1.



Рис. 1.1. Конструктивні елементи РН, що розділяються в польоті: 1 – перший ступінь, 2 – перехідний відсік; 3 – другий ступінь; 4 – головний обтічник; 5 – корисний вантаж

Процес розділення не обмежується лише фізичним розривом силових зв'язків, важливо також забезпечити безударну розбіжність відокремлених елементів конструкції на безпечну відстань [20]. Цей процес можна умовно поділити на два основні етапи:

- розрив силових зв'язків;
- процес створення імпульсу відділення.

Для реалізації цих етапів використовуються механічні, пневматичні, піротехнічні пристрої або їх комбінації.

Розрив силових зв'язків забезпечують такі виконавчі елементи, як механічні, пневматичні та піротехнічні замки, піроболти, піротехнічні пристрої лінійної дії тощо (Рис. 1.2, Рис. 1.3).



Рис. 1.2. Піротехнічні виконавчі елементи розриву силових зв'язків [20]: а – піроболт; б, в – лінійний кумулятивний заряд



Рис. 1.3. Механічні виконавчі елементи розриву силових зв'язків [20]: а – важільно-кулачковий замок; б – кульковий замок

Для надання імпульсу відділення частинам, що розділяються застосовуються піротехнічні, пневматичні або пружинні штовхачі, порохові реактивні двигуни малої тяги, газореактивні системи, ЛКЗ та подовжені детонаційні заряди (ПДЗ), системи аеродинамічного гальмування, створення тиску у внутрішній порожнині відсіків тощо (Рис. 1.4).



Рис. 1.4. Виконавчі елементи для надання імпульсу (скомпоновано з [20]): а – піроштовхач; б – пружинний штовхач; в – газореактивна система

Виконавчі елементи систем розділення умовно поділяються на три функціональні групи (Рис. 1.5):

1. Механічні (механічні замки, пружинні штовхачі тощо) [20,23]. Переваги – висока надійність. Недоліки – складність конструкції, значна маса, та об'єм, високий рівень споживання електроенергії.

2. Пневматичні та піротехнічні точкової дії (замки, штовхачі, піроболти) [20,24]. Переваги – спрощена конструкція. Недоліки – необхідність великої кількості піроболтів при високих навантаженнях, що збільшує масу конструкції та знижує ефективність виробу;

3. Піротехнічні лінійної дії (ЛКЗ, ПДЗ) [20]. Переваги – зменшення маси, висока ефективність, можливість розділення по суцільній оболонці. Недоліки – потреба у додаткових заходах безпеки через високу енергію вибухового перетворення, складність проєктування.



Рис. 1.5. Функціональні групи виконавчих елементів СР

На ракетах більше поширення одержали піротехнічні пристрої розриву зв'язків [20].

Системи розділення першої та другої груп належать до систем точкової дії, що зумовлює деяку розбіжність імпульсів при спрацюванні та може зменшувати точність розділення. Більшість СР, що застосовувалися протягом тривалого часу, були побудовані на піромеханічних принципах, поєднуючи енергію хімічної реакції піротехнічних зарядів із потенціальною енергією механічних пристроїв. В основному конструкція СР складалася з кількох автономних пірозамків з пружинними штовхачами. Наприклад, імовірність безвідмовної роботи системи з чотирьох пірозамків становила лише 0,999, тоді як сучасні вимоги сягають 0,9999 [23] і вище. Для розділення стулок головного обтічника широко використовуються механічні замки з системою тяг (Рис. 1.3*а*).

Перспективними є лінійні системи, які дозволяють досягти рівномірного навантаження у стику, зменшити вагу СР та забезпечити високу ефективність розділення, особливо для конструкцій з композиційних матеріалів. Наприклад, перспективними для розкриття стулок обтічника є конструкції Orbital Sciences
Corporation [25], а для розділення ступенів і в системах аварійного припинення польоту – ЛКЗ [1,26].

Додатковою перевагою ЛКЗ є надання тілам, що розділяються, відносної лінійної та кутової швидкості, що частково зменшує масу систем створення імпульсу відділення, які використовуються в поєднанні [19].

Зі зростанням кількості космічних запусків і конкуренції на ринку космічних послуг особливу увагу приділяють зниженню вартості запусків, зменшенню маси ракетних систем і підвищенню рівня безпеки. Зниження ваги конструкцій СР також відповідає вимогам стандарту ISO 24113 щодо зменшення космічного сміття та наслідків аварійних ситуацій [2,18,23,27].

Для обгрунтованого вибору варіанту виконавчого елементу СР необхідно враховувати комплекс критеріїв, включаючи масу, надійність, складність конструкції, вартість, безпеку. Одним з підходів до комплексної оцінки є метод лінійного згортання частинних критеріїв [20,28,29]. Застосування цього методу дозволяє врахувати вагомість кожного критерію та отримати інтегральну оцінку для порівняння різних варіантів виконавчих елементів. Детальний опис цього методу та аналіз розглянутих вище функціональних груп виконавчих елементів СР наведено в Додатку Б, згідно з яким визначено, що перспективним напрямом є використання піротехнічних СР лінійної дії, зокрема ЛКЗ.

1.2 Загальний огляд кумулятивних зарядів

Великий вклад в дослідження кумулятивних зарядів (КЗ) зробили Баум Ф.А., Лаврентьєв М. О., Станюкович К.П., Шехтер Б.І., Петушков В.Г., Орленко Л.П., Джеймс Л.С. [30-36]. Дослідження КЗ стосовно ракетної техніки відображено В роботах Колесникова К.С., Козлова В.И.. Кокушкина В.В. Єфанова В.В. [19,23,37]. Сучасні дослідження проводять Толкунов І.О., Гошовський С.В., Ю.І., Войтенко Закусило P.B., Смирнов О.М. та інші [38–41].

Для розуміння процесів, що відбуваються при спрацюванні ЛКЗ розглянемо деякі основні поняття.

1.2.1 Основні поняття

Детонація – це вибух, що поширюється з постійною та максимально можливою для даної ВР швидкістю, що перевищує швидкість звуку в цій речовині [32]. Детонація є процесом вибухового перетворення, зумовленим проходженням ударної хвилі по ВР, та протікає з постійною (для даної ВР і її стану) надзвуковою швидкістю (1200-9000 м/с) [41].

Ініціювання – запуск вибухового перетворення шляхом передачі енергії (механічним, тепловим, електричним, хімічним чи вибуховим методом) [41].

Кумуляція – концентрація енергії в заданому напрямку [32–34].

Кумулятивний ефект (ефект Монро) – посилення дії вибуху шляхом його концентрації вздовж вісі заряду у заданому напрямку, за допомогою кумулятивної виїмки [12,32,34,42].

Режим кумуляції – це сукупність умов формування та дії КС, що визначають його характеристики (швидкість, форму, щільність та енергію) і залежать від геометричних параметрів КВ і типу ВР.

Бризантність – здатність вибухової речовини подрібнювати матеріали; залежить від швидкості детонації. Бризантні ВР не вибухають від полум'я або удару, що є дуже важливим для безпеки їх виробництва та застосування [41,43].

1.2.2 Формування кумулятивного струменя

Кумулятивні заряди поділяються на дві групи (Рис. 1.6) [9]:

1. Вісьосиметричні кумулятивні заряди (ВКЗ) – призначені для пробивання отворів;

2. Плоско-симетричні (ЛКЗ) – призначені для перерізання перешкод.



Рис. 1.6. Загальний вигляд КЗ [36]: а – ВКЗ; б – ЛКЗ; 1 – ВР; 2 – КВ; 3 – оболонка КЗ; 4 – детонатор

Модель формування КС базується на теорії гідродинаміки нестисливої рідини [31,32,36,44], в основу якої покладено розгляд конічного виливу рідини (Рис. 1.7): конічний потік, що сходиться в точці (*J*), утворює на вісі *АА*′ два потоки, які розходяться в протилежних напрямках [9,31,45].



Рис. 1.7. Модель формування КС [45]

В результаті експериментальних і теоретичних досліджень було встановлено, що посилення кумулятивного ефекту за наявності КВ пов'язане з перерозподілом енергії між продуктами вибуху та матеріалом КВ і переходом частини металу КВ в КС. Основна частина енергії «перекачується» у тонкий шар металу, який формує КС [32,34].

Процес формування КС для ВСЗ схематично наведено на Рис. 1.8, Рис. 1.9.



Рис. 1.8. Формування КС ВКЗ з напівсферичною КВ [32]: а – через 6 мкс після вибуху; б – через 8 мкс; в – через 12 мкс; г – через 24 мкс



Рис. 1.9. Формування КС при обтисканні металевої конічної КВ ВКЗ [34]

Фронт детонаційної хвилі (2) в заряді ВР (3) поширюється від детонатора (1) зі швидкістю детонації *D* (Рис. 1.9). Продукти детонації, що утворюються, взаємодіють з КВ (4). При послідовному згортанні КВ утворюється пест (5) і КС (6). Для конічних мідних КВ ВКЗ в КС переходить в середньому 10 – 20 % маси КВ, швидкість головних ділянок КС становить 9000 – 1000 м/с, а хвостових 2000 – 2500 м/с [13,34].

1.3 Лінійний кумулятивний заряд та його використання в РКТ

Лінійний кумулятивний заряд (Рис. 1.10) – це суцільний заряд вибухової речовини, укладеної у довгу безшовну металеву оболонку з кумулятивною виїмкою у вигляді перевернутої літери «U» (напівциліндрична форма, розповсюджена в Україні) або «V» (клиноподібна форма, розповсюджена в США), що дозволяє металевій оболонці та вибуховій речовині, що міститься в ній, під час детонації створювати рівномірну лінійну дію різання кумулятивним струменем у заданому напрямку для прорізання перешкод [6,12,14,18,30,42,46].



Рис. 1.10. Модель ЛКЗ, що використовується в досліджені [12]: 1 – кумулятивна виїмка, 2 – бризантна ВР; 3 – оболонка ЛКЗ

ЛКЗ є виконавчим елементом в піротехнічних СР лінійної дії [31], складається з наступних основних частин:

- вибухової речовини – основного складового елемента ЛКЗ, що детонуючи швидко та з великим тиском діє на кумулятивну виїмку ЛКЗ, завдяки чому матеріал КВ формує кумулятивний струмінь. Використовуються високобризантні ВР [17,18,30,31,47];

- оболонки ЛКЗ – являє собою корпус, що вміщує ВР. Разом з ВР представляє з себе канал заряду по якому проходить детонація. В Україні як правило виготовляється з міді або алюмінію, в США – з міді, алюмінію або свинцю [17,18,30,31];

- кумулятивної виїмки – частини оболонки ЛКЗ, сформованої у вигляді виїмки напівциліндричної, клиноподібної або іншої форми, що забезпечує спрямоване поширення КС в заданому напрямку [17,18,31,32].

В Україні ЛКЗ виготовляють, зокрема, в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [31,48]; в США – в Ensign-Bickford Aerospace &

Defense Company (м. Сімсбері, штат Коннектикут [49]) та Pacific Scientific Energy Materials Company (м. Чандлер, штат Аризона [50] тощо.

Кумулятивний струмінь (іноді «кумулятивний ніж») – це спрямований потік високошвидкісних частинок металу оболонки ЛКЗ та продуктів детонації ВР, що утворюється під час детонації внаслідок згортання КВ. Основну масу КС складає матеріал КВ [16,23].

У джерелах інформації для опису процесу проникнення КС у перешкоду використовуються такі терміни: проникнення, прорізання, перерізання, розрізання, пробивання. В цій дисертації для опису дії ЛКЗ на перешкоди використовуються терміни *проникнення* і *прорізання (перерізання)*, а для *вісьосиметричних кумулятивних зарядів – пробивання*.

У випадку, коли товщина перешкоди більша за енергетичні можливості КС, використовується термін *проникнення* (*L*) КС у перешкоду, коли менша – *прорізання* або *перерізання* (що є синонімом).

Відмінність між прорізанням та пробиванням пояснюється принципом дії КЗ: для лінійних зарядів матеріал перешкоди прорізається КС вздовж лінії, а вісьосиметричних пробивається з утворенням отвору.

Таким чином, під **прорізанням** ($L_{np.}$) розуміється процес створення КС довгого і вузького прорізу в матеріалі перешкоди вздовж лінії заряду, що може призвести як до часткового надрізу, так і до повного розділення конструкції, в тому числі з утворенням відколу на тильній поверхні.

Перерізання – це завершена стадія прорізання, коли матеріал повністю розділяється на дві частини. Метою перерізання є розділення конструкції.

Пробивання – це процес, коли КС проходить крізь матеріал, утворюючи наскрізний отвір або глибоке заглиблення, що є характерним для вісьосиметричних кумулятивних зарядів (КЗ).

Схематично, відмінності між визначеннями наведено на Рис. 1.11.



Рис. 1.11. Схема дії КС на перешкоду в залежності від її товщини:
а – напівнескінченна перешкода; б – перешкода кінцевої товщини; *L* – проникнення КС з утворенням каверни; *L_{np.}* – наскрізне прорізання КС; *ε* – відносна глибина відколу на тильній стороні перешкоди

Перешкода напівнескінченної товщини – це умовне теоретичне поняття, яке використовується у випадках, коли товщина перешкоди суттєво перевищує очікувану глибину проникнення КС. За таких умов тильна поверхня не впливає на характер проникнення, а взаємодія розглядається так, ніби матеріал перешкоди продовжується необмежено вглиб (на основі [31,36,51].

Перешкода кінцевої товщини – це перешкода, товщина якої є меншою або порівнянною з очікуваною глибиною проникнення КС ЛКЗ. У таких умовах струмінь може повністю прорізати матеріал, а процес руйнування залежить не лише від глибини проникнення, але й від впливу тильної поверхні. Зокрема, характерним є відкольний ефект, зумовлений взаємодією ударної хвилі, що поширюється в матеріалі, та хвилі розвантаження, яка формується на тильній стороні. Така взаємодія може спричинити додаткові руйнування на зворотному боці перешкоди та фактично збільшити загальну глибину прорізання (на основі [31,36,51].

У джерелах інформації зустрічаються різні позначення ЛКЗ: LSC (linear shaped charge), УКЗ («удлиненный» КЗ), ПКЗ (подовжений КЗ), ПДЗ (подовжений детонаційний заряд) тощо. Аналіз наукових публікацій в науково-метричній базі scholar.google.com.ua за період з січня 2021 по

березень 2025 рр. показав, що термінологія «Лінійний кумулятивний заряд» є більш вживаною: пошук виконувався за пошуковим запитом «Линейный кумулятивный заряд» та «Удлиненный кумулятивный заряд», було отримано 518 та 110 пошукових результатів відповідно. Тому у цій роботі використовується позначення ЛКЗ. Це додатково відповідає термінології, поширеній в англомовному науковому середовищі та відповідає лінійному характер дії цих пристроїв.

ЛКЗ характеризуються високою ефективністю, надійністю, малим часом спрацювання, малою вагою, компактними розмірами та довговічністю. До їх особливостей також відноситься: відсутність функціональних стиків; забезпечення герметичності відсіків; проста конструкція; відсутність рухомих частин; виготовлення з недорогих матеріалів; безпека (стійкість до зовнішніх факторів та захист від несанкціонованого спрацювання); робота в режимі очікування без періодичного обслуговування; широкий спектр застосувань [12,13,19,20].

Висока ефективність ЛКЗ зумовлена поєднанням високої швидкості детонації (~ 8000 м/с) та ефекту кумуляції [13,31].

В РКТ використовують типорозміри ЛКЗ нормованого ряду, їх конструкція і характеристики вважаються близькими до оптимальними [23,37,52]. Це пояснюється залежністю, що виведена за результатами оптимізаційних робіт конструкції ЛКЗ [31]:

$$\frac{L}{l} = f\left(\frac{d_{\kappa.\theta.}}{D}, \frac{\delta_{\kappa.\theta.}}{D}, \frac{F}{D}\right),\tag{1.1}$$

де *L* – глибина проникнення КС в перешкоду;

l – довжина КС;

 $d_{\kappa. \epsilon}$ – діаметр КВ;

 $\delta_{\kappa. 6.}$ – товщина КВ;

F – фокусна відстань;

D – діаметр ЛКЗ (визначає масу ВР).

У формулі (1.1) перші два безрозмірні параметри характеризують власне ЛКЗ, а останній – його розташування відносно перешкоди [31] Тому при використанні нормованих ЛКЗ визначальними параметрами для підвищення ефективності піротехнічної СР є визначення його раціонального типорозміру та раціональної фокусної відстані.

Сфера та варіанти використання ЛКЗ в РКТ. ЛКЗ є універсальними виконавчими елементами, що мають широке застосування в РКТ. Нижче розглянемо використання ЛКЗ в РКТ більш детально [2,18].

Розділення ступенів ракет-носіїв. З [6,19,53–55] відомо, що ЛКЗ використовувались для розділення ступенів і зв'язків між ступенями в PH «Ariane-1», «Ariane-5», «PSLV», «Atlas-5/551», «2A21 2», «Saturn-1 B», «Saturn-5» (Puc. 1.12).



Рис. 1.12. Схема розділення відсіків за допомогою ЛКЗ РН «Saturn-5» [19]

Згідно [6,46] відомо, що ЛКЗ, також використовуються в конструкції систем розділення в РН «Minuteman III», «Delta IV». Також ЛКЗ застосовувались в ракетах «SS-24 Scalpel», у складі системи мінометного розділення ступенів, для поперечного розділення перехідного відсіку [56].

Відділення відсіків корисного навантаження. ЛКЗ використовувався в космічному кораблі «Gemini» між відсіками приладів і екіпажу [19]. В РН «Ariane-5» ЛКЗ застосовувався в елементах системи скидання головного обтічника (на його вертикальних та горизонтальних роз'ємах), та елементах системи відділення головної частини (на силовій оболонці зв'язку третього ступеня з конструкцією «Spelda») [19,53,54,57].

Розрив силових зв'язків конструкції ракети. ЛКЗ застосовувався в ракеті «SS-17 Spancer», у пристрої розриву механічного зв'язку між першим і

другим ступенями, де його встановлено вище технологічного міжступеневого болтового стику [56,58]. Згідно [59] відомо, що ЛКЗ використовувались в РН «Енергія» для розриву силових зв'язків бокових блоків з центральним (Рис. 1.13*а-в*). При створенні РН «Saturn-5» у конструкції ступеня S-II була застосована перша схема скидання хвостового відсіку за допомогою ЛКЗ (Рис. 1.13*г*) [53].



Рис. 1.13. Використання ЛКЗ для розриву силових зв'язків (скомпоновано з [53,59]): а, б, в – нижній пояс бокових блоків з центральним, парного блоку з центральним, вузол розділення парного блоку на моноблоки PH «Енергія» відповідно; г – хвостовий відсік ступені S-II PH «Saturn-5»

Системи аварійного припинення польоту (САПП). Згідно [42] відомо, що ЛКЗ використовувались в системах безпеки космічного човна «Challenger», для аварійного припинення польоту (Рис. 1.14).



Рис. 1.14. Розташування ЛКЗ системи безпеки на твердопаливних ракетних прискорювачах і зовнішньому баку космічного човна «Challenger» [42]

САПП капсули «SpaceX Crew Dragon» також використовувала ЛКЗ. Якщо транспортний засіб відхиляється від курсу, спрацьовують ЛКЗ системи завершення польоту, сфокусований КС прорізає корпус двигуна, знижуючи тиск згоряння одночасно руйнуючи корпус, що дозволяє швидко припинити політ і забезпечити безпеку [17,26,60].

Інші застосування. Згідно [17,61] відомо, що СР на основі ЛКЗ були застосовані для відділення механізму герметизації ампули з місячним ґрунтом космічного апарату (КА), що спускається «Місяць-16» і «Місяць-20». Комплекс систем розділення на основі ЛКЗ застосовувався для КА серії М-71 («Марс-2», «Марс-3») та серії М-73 («Марс-4» і «Марс-5»). Ці системи повинні були вирішувати такі завдання, як розділення відсіку з парашутною системою, відділення двигуна відведення парашутної системи від гальмівної рухової установки, відділення гальмівної рухової установки від апарата, що спускається, розділення захисного кожуха автоматичної марсіанської станції. Також ЛКЗ був застосований у системі розділення кришки дослідного зонда (пенетратора) КА «Марс-96» [62].



Рис. 1.15. Фрагмент СР задньої кришки впроваджуваного дослідницького зонда (пенетратора) КА «Марс-96» [62]

Згідно [46] відомо, що ЛКЗ, також використовується в винищувачібомбардувальнику F-35 Lightning II.

Таким чином підтверджується, що піротехнічні СР оснащені ЛКЗ отримали широке розповсюдження в РКТ для розділення ступенів, відсіків корисного навантаження, КА, систем безпеки тощо [2,18]. Очікується, що СР на ЛКЗ будуть використовуватися в наступних сферах: створенні нових космічних апаратів для місій на космічні планети, наприклад Марс [63]; розробці систем для видобутку ресурсів на астероїдах або Місяці [64]; проєктуванні систем безпеки нових РН з більшою вантажністю та багаторазовістю [65], що пов'язано з вимогами ISO 24113[27], оскільки негативні наслідки збільшуються зі збільшенням розмірів РН (Рис. 1.16) [18].



Рис. 1.16. Наслідки аварійних ситуацій [66,67]: а – частина РН впала та вибухнула біля житлових будинків (Китай, 2018 рік); б – уламки першого ступеню РН «Великий похід-3В» впали на житлові будинки (Китай, 2019 рік)

Зменшення ризику наземних ушкоджень під час входження космічного сміття в атмосферу Землі можливо досягти внаслідок зменшення зони можливого падіння аварійних РН, фрагментації великих частин на менші використовуючи для цього піротехнічні СР на ЛКЗ [1,18,21].

Актуальність використання СР на ЛКЗ додатково підтверджується патентами RU 2284463 C2 (2006 р.) [68], RU 23304271 C1 (2007 р.) [69], RU 2361170 C1 (2009 р.) [52], RU 2463544 C1 (2012 р.) [70], RU 2777050 C1 (2021 р.) [64].

Універсальність, висока ефективність і надійність роблять ЛКЗ важливими виконавчими елементами СР для підвищення ефективності та надійності виробу в цілому.

1.4 Ефективність та надійність при проєктуванні СР на ЛКЗ

Ефективність. При розгляді різних етапів проєктування СР на основі ЛКЗ, будуть свої критерії ефективності. Так при встановленні раціонального типорозміру ЛКЗ – це відношення корисної роботи (глибини проникнення КС), до загальної енергії вибуху (кількості ВР на одиницю об'єму); при дослідженні конкретного нормованого ЛКЗ – це фокусна відстань. Правильно визначені типорозмір ЛКЗ та фокусна відстань дозволяють максимально ефективно використовувати енергію КС, що забезпечує ефективне прорізання матеріалу перешкоди, в тому числі мінімізує ударні навантаження на елементи конструкції РН. Останнє особливо критично для системи керування [18].

Надійність. Надійність СР на ЛКЗ характеризується умовою повного прорізання перешкоди КС, залежить від правильно визначених типорозміру ЛКЗ та фокусній відстані. ЛКЗ, що встановлюються на оптимальній фокусній відстані демонструють більш стабільні результати проникнення КС в перешкоду. При віддалені ЛКЗ від оптимальної фокусної відстані, КС починає фрагментуватися на окремі частини, чим зменшується надійність [18]. Якщо ЛКЗ встановлено на фокусній відстані меншій за оптимальну, це спричиняє не лише зростання ударних навантажень на конструкцію, а й формування рваної структури в процесі прорізання. Така структура, зокрема під час розкриття сопел газореактивної системи, може викликати специфічний імпульс рушійної установки, що знижує надійність РН.

Вплив фокусної відстані. Найбільш ефективну відстань між ЛКЗ та перешкодою називають фокусною [9,12,16,33,35]. Це пояснюється схемою наведеною на Рис. 1.17. На ній зображено два типи зарядів: суцільні (1, 2) та з V-подібною виїмкою (3-6), спрямованою до металевої плити (7), у яких вставлені сталеві конуси. Заряди (1, 3, 5) знаходяться на плиті, а (2, 4, 6) – на відстані від неї. При детонації заряду ВР без КВ утворюється неглибока вм'ятина в матеріалі перешкоди (заряд 1), а при віддаленні заряду вплив зменшується (2). Наявність КВ концентрує енергію, збільшуючи глибину вм'ятини у матеріалі перешкоди (3). Зі збільшенням відстані ефект вибуху знижується (4). Використання металевої КВ у зарядах (5, 6) значно підвищує ефективність, а глибина проникнення КС істотно залежить від відстані заряду до перешкоди (7) [12,33].



Рис. 1.17. Схема порівняння впливу вибухового заряду [12] (на основі [33])
1, 2 - суцільний заряд, 3, 4 - заряд з V-подібним профілем, 5, 6 - заряд зі сталевою V-подібною вставкою, 7 - металева плита (перешкода)

При спрацюванні КЗ, продукти детонації концентруються перпендикулярно до поверхні КВ. Це утворює струмінь із високою щільністю та швидкістю. Біля самої КВ елементи струменя рухаються нормально до її поверхні. Далі вони випрямляються згідно із законами газової динаміки та ущільнюються на фокусній відстані (*F*) [32], що наведено на Рис. 1.18.



Рис. 1.18. Формування кумулятивного струменю: 1 – детонатор, 2 – КЗ до вибуху, 3 – напівсферична КВ, 4 – КС; *F* – фокусна відстань

Таким чином, якщо встановлювати КЗ на фокусній відстані, що відрізняється від раціональної, ефективність КС знижується. Перевищення фокусної відстані знижує ефективність через радіальний розліт продуктів детонації [31,32], зменшення призводить до погіршення якості різу КС, будуть спостерігатись відколювання, розтріскування та розшарування матеріалу перешкоди в зоні впливу КС (Рис. 1.196). В результаті цього конструкція РН отримує більші ударні навантаження, що не лише знижує ефективність, але й навіть може призвести до виходу з ладу чуттєвої апаратури [9].



Рис. 1.19. Стан матеріалу перешкоди залежно від величини фокусної відстані встановлення ВКЗ [22]: а – без металевого облицювання КВ;

б – з металевим облицюванням КВ, при F = 0 мм; в – з металевим облицюванням КВ, при раціональній фокусній відстані

Найпоширеніші геометричні форми КВ та їх вплив на режим кумуляції

Найпоширеніші геометричні форми КВ [9]:

- для ВКЗ - конусні та напівсферичні (Рис. 1.20);

- для ЛКЗ – клиноподібні та напівциліндричні (Рис. 1.21).



Рис. 1.20. Геометричні форми КВ ВКЗ (скомпоновано з [36]): а-д – прості форми (циліндрична, конусна, напівсферична); е, ж – ускладнені; з, и – комбіновані; к, л – змінної товщини; 2α – кут між твірними КВ; δ – товщина КВ; d₀ – діаметр КВ



Рис. 1.21. Геометричні форми КВ ЛКЗ [9] (зкомпановано з [30,31,37]): а – напівциліндрична (конструкція ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [31]); б – напівциліндрична (конструкція [37]); в – клиноподібна (конструкція [30])

У подальшому тексті роботи використовуватимемо такі позначення:

- ЛКЗ-а – конструкція на Рис. 1.21а;

– ЛКЗ-б – конструкція на Рис. 1.216;

- ЛКЗ-в - конструкція на Рис. 1.21в.

Форма КВ впливає на довжину КС та його глибину проникнення, оскільки визначає режим кумуляції (Рис. 1.22).



Рис. 1.22. Режими кумуляції ВКЗ [36]: а – класична кумуляція; б – зворотна; в – проміжний

Характеристики різних режимів кумуляції на прикладі ВКЗ наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Тип кумуляції	Геометрія облицювання	Особливості формування КС	Швидкість (км/с)	Пробиття перешкод и
Класична	Високий конус	Високошвидкісний, високоградієнтний КС. До 30 % матеріалу КВ переходить у КС.	9–10 (головні елементи), 2–2,5 (хвостові елементи)	(8–10) d ₀
Зворотна	Пологий конус (150–160°) (0,1–0,2)d ₀	Компактний разючий елемент. До 100 % матеріалу КВ переходить у КС	2,2–2,8	(0,5–0,8) d ₀
Проміжний режим	Кут розкриття 100–120° або напівсферичні облицювання	Масивний мало градієнтний КС. До 50–60 % матеріалу КВ переходить у струмінь	4,5–5 (головні елементи), 1,5–2 (хвостові елементи)	(4–5) d ₀

Характеристики різних режимів кумуляції на прикладі ВКЗ

Джерело: сформовано на основі [36]

Глибина проникнення КС у перешкоду. Визначається його довжиною, формою кумулятивної виїмки, фокусною відстанню та наважкою вибухової речовини, представленою через діаметр КЗ. Ця залежність зображена на Рис. 1.23.



Рис. 1.23. Залежність глибини проникнення КС від фокусної відстані та форми КВ, для лабораторного КЗ з мідною КВ та сталевою перешкодою [36]: *L* – глибина проникнення КС; *F* – фокусна відстань; *d* – діаметр КЗ; 2α – кут розкриття КВ; S – товщина КВ; 1 – КЗ (*d* = 25 мм, конічна КВ, 2α = 30°, S = 1 мм); 2 – КЗ (*d* = 46 мм, конічна КВ, 2α = 44°, S = 1,5 мм); 3 – КЗ (*d* = 46 мм, конічна КВ, 2α = 60°, S = 1,5 мм); 4 – КЗ (*d* = 70 мм,

3 Рис. 1.23, випливають наступні висновки:

всі криві мають чітко виражений максимум (фокусну відстань),
 відхилення від якого знижує ефективність (глибину проникнення);

– збільшення діаметра КЗ збільшує величину проникнення, але й збільшує габарит та масу КЗ, що в РКТ знижує ефективність РН;

 – кут розкриття КВ має нелінійний вплив: збільшення кута покращує проникнення до певної межі (≈30…44°), після чого ефективність зменшується;

- напівсферичні КВ мають ширший робочий діапазон;

– величина фокусної відстані та глибина проникнення КС в перешкоду залежать від довжини КС;

 – криві показують, що з метою зниження матеріаломісткості експериментальних досліджень, їх необхідно проводити в деякому інтервалі фокусних відстаней, близькому до оптимального; криві для різних форм КВ демонструють різну ефективність, це вказує
 на те, що поточні підходи до визначення глибини проникнення і фокусної
 відстані для різних конфігурацій КЗ не є універсальними.

Технологічні фактори. Додатково на ефективність проникнення КС впливають технологічні фактори пов'язані з точністю виготовлення ЛКЗ, його КВ (передусім товщини та співвісності), технології наповнення ЛКЗ вибуховою речовиною і пов'язаним з цим її різною щільністю вздовж оболонки ЛКЗ, точністю виготовлення перешкоди та складальних операцій тощо. Цей вплив може досягати до 30% від загальної глибини проникнення КС порівнюючи КЗ виготовлений за прецизійною точністю і за звичайною технологією [9,31,34,36], що наведено на Рис. 1.24.



Рис. 1.24. Залежність відносної глибини проникнення КС від відносної відстані КЗ з мідною КВ до міцної сталевої перешкоди (НВ = 3,2 ГПа) [36]:

1 – КЗ зі звичайною технологією виготовлення; 2 – прецизійний КЗ;
3 – ідеальний КЗ; 4 – ідеальний КС у повітрі; *L* – глибина проникнення КС;

F – фокусна відстань встановлення ЛКЗ; *d* – діаметр ЛКЗ

Також, слід відзначити на технологічні обмеження, що виникають в результаті виготовлення корпусних відсіків. До недоліків зварних корпусних відсіків оснащених піротехнічними системами розділення, можна віднести зони термічного впливу, що виникають після зварювання. Це призводить до виникнення небажаних температурних градієнтів, накопичення залишкових напружень та утворення деформацій [7,9,11]. Наведені фактори викликають таке негативне явище, як спучування конструкції, що призводить до локального збільшення відстані від перешкоди до ЛКЗ, тобто до відхилення від фокусної відстані.

Таким чином, основними проєктними параметрами, що визначають ефективність і надійність піротехнічних СР на ЛКЗ є його типорозмір та фокусна відстань і пов'язана з ними глибина проникнення КС. Дослідження цих параметрів є критично важливим для оптимізації роботи піротехнічних СР на ЛКЗ. Кожне дослідження має свої особливості, пов'язані з тим, що динаміка роботи СР на ЛКЗ залежить від багатьох факторів, таких як [18]:

- конструкція ЛКЗ: довжина, діаметр, матеріал оболонки, тип ВР, рівномірність наважки ВР тощо.

- конструкція перешкоди: матеріал, кількість шарів матеріалу для багатошарової перешкоди тощо.

- умови спрацювання: вплив термодинамічних навантажень на елементи конструкції РН в польоті, величина замкнутого об'єму відсіку, що розділяється, розташування суміжних вузлів тощо.

При великій кількості позитивних якостей, **СР на основі ЛКЗ мають низку обмежень** пов'язаних з продуктами детонації, ударною хвилею та утворенням уламків. Продукти детонації ЛКЗ (гази та дрібні частинки металу) можуть забруднювати корисне навантаження, зокрема чутливу електроніку та оптичні прилади. Ударна хвиля, що утворюється під час вибуху ЛКЗ поширюється по конструкції РН впливаючи на чутливі елементи. Уламки, що утворюються при детонації та розділенні конструкції можуть пошкодити інші системи РН, що своєю чергою сприяє виникненню аварійної ситуації та становить небезпеку для довкілля [1,27].

Таким чином, при проєктуванні СР оснащеної ЛКЗ необхідно визначити мінімальний, але достатній для розділення конструкції типорозмір ЛКЗ, причому для забезпечення більшої ефективності додатково визначити раціональну фокусну відстань для його розміщення відносно перешкоди.

Це визначає актуальну задачу – підвищення ефективності піротехнічної СР шляхом визначення раціонального типорозміру ЛКЗ та раціональної фокусної відстані. Проєктування таких систем є складним завданням, особливо для розділення багатошарових перешкод, що вимагає комплексного наукового підходу та врахування багатьох факторів, таких як геометрія кумулятивної виїмки, тип вибухової речовини, характеристики матеріалу перешкоди, розташування інших систем тощо.

1.5 Аналіз сучасного стану досліджень ЛКЗ

1.5.1 Складність аналізу літератури

Інформація про ЛКЗ є обмеженою, неповною, фрагментарною та неструктурованою [71]. Додатково ускладнюється аналіз параметрів ЛКЗ через різноманітність форм подання даних, різних одиниць виміру фізичних величин і способів узагальнення інформації [9].

Наприклад, залежності глибини проникнення КС у перешкоду від фокусної відстані ЛКЗ представлені по різному [9]:

– в [30] Джеймс Л.С. аналізує залежності фокусної відстані *F* від глибини проникнення КС *L* для ЛКЗ з різними варіантами щільності ВР;

в [31] Петушков В.Г. використовує відношення *L* до *F*, але приведені до діаметра КВ ЛКЗ *d_{к.в.}* (до діаметра ЛКЗ *D* – уточнено в [9]);

– в [72] Боганек В. аналізує залежність (*M*/*C*) від *L*, де *M* – маса матеріалу КВ, *C* – маса ВР.

Щодо матеріалу та форми КВ, щоб отримати уявлення про який конкретний тип ЛКЗ йде мова, треба проаналізувати декілька джерел інформації. Наприклад, в [20] зазначені лише фокусні відстані, але не уточнена форма КВ і матеріал оболонки ЛКЗ. На основі [31] можна припустити, що в [20] розглядаються ЛКЗ-а з напівциліндричною КВ, що

виготовлені *з міді* або алюмінію, оскільки мова йде про ЛКЗ вітчизняного виробництва. У [37] наголошується, що у системах розділення елементів конструкцій застосовуються цільно-корпусні ЛКЗ-б *з напівциліндричною КВ*, оболонка яких зазвичай виготовляється з *міді* або, рідше, алюмінію. У зв'язку зі схожістю конструкцій ЛКЗ-а та ЛКЗ-б визначеною однаковими підходами забезпечення їх ефективності [20,31,37], можна зробити додаткове припущення, що в [20] розглядаються *мідні* ЛКЗ із *напівциліндричною КВ*. Це додатково підтверджується схожими даними раціональних фокусних відстаней і результатам проникнення КС у перешкоду [9].

Також часто не вказується конкретний матеріал перешкоди, що може бути пов'язано з комерційною таємницею. Наприклад в [23,37] наведено характеристики товщин прорізання різними типорозмірами ЛКЗ перешкоди з алюмінієвого сплаву, конкретну марку матеріалу не вказано. При цьому вказано, що роботи пов'язані з виконанням робіт в рамках проєктів «Марс», «Венера», «Вега», а у формулі до визначення товщини прорізання вказаний коефіцієнт відколу для алюмінієвого сплаву АМг6. В [73] вказано, що КА «Венера-4, 5, 6» виготовлялися зі сплаву АМг6. Вказані в [23,37] товщини прорізання алюмінієвого сплаву, зіставні з такими наведеними для сплаву АМг6 в [20]. Аналіз пов'язаних джерел інформації дозволяє зробити висновок, що характеристики товщин прорізання в [23,37] вказані для сплаву АМг6.

Таким чином, дослідження літератури, збір інформації про ЛКЗ та її узагальнення вимагає від дослідників особливої уваги та значної аналітичної роботи.

1.5.2 Особливості формування та проникнення КС ЛКЗ

Розрахункові (аналітичні) методи формування та проникнення КС в одношарову перешкоду. У роботі [37] наголошується, що станом на 2014 рік теорія формування КС добре розроблена для ВКЗ, але значно менше досліджена для плоско-симетричних ЛКЗ. Особливу складність становить

аналіз процесу формування та фрагментації КС для ЛКЗ через взаємодію ковзальної детонаційної хвилі з КВ за наявності поздовжніх і поперечних хвиль розрідження, параметри яких істотно залежать від показників тильної частини оболонки заряду.

У роботі [74] підтверджується, що станом на 2022 рік процес формування КС ЛКЗ залишається недостатньо вивченим. Не проведено достатніх досліджень, які б поєднували теорію формування КС та його взаємодією з матеріалами перешкод, що пояснюється технічними складнощами спостереження за даними процесами під час його проникнення.

Процес взаємодії КС ЛКЗ з перешкодою є складним, оскільки швидкість головної частини КС складає (2200–3500) м/с, та є нижчою ніж у ВКЗ. Це пов'язано з [9,31,74,75]:

- особливостями згортання КВ у плоскій геометрії заряду;
- впливом факторів міцності та стисливості матеріалу струменя та перешкоди на даних швидкостях;
- різним напрямком фронту детонації у ВКЗ і ЛКЗ;
- відмінністю у напрямках дії КС і фронту детонації.

Складність визначення параметрів ЛКЗ з напівциліндричною КВ підтверджується аналізом робіт [19,31,32,36], де наведено різні методи розрахунку КЗ. Однак, ці методи не дозволяють точно розв'язувати задачу визначення глибини проникнення для ЛКЗ з КВ напівциліндричної форми. Наприклад, у роботі [36] для розрахунку глибини проникнення КС ЛКЗ використовуються формули, виведені в рамках гідродинамічної теорії з використанням ряду емпіричних коефіцієнтів, які відсутні для досліджуваних матеріалів. Процес проникнення КС конкретного ЛКЗ в конкретний матеріал має свої особливості. В [19] наводиться формула для розрахунку глибини проникнення КС в перешкоду для ЛКЗ з клиноподібною КВ, яка не може бути використана для ЛКЗ з напівциліндричною КВ внаслідок різної форми, довжини та маси КВ і КС, різного часу формування КС. Це підтверджується в [76], де вказується, що механізм утворення КС у ВКЗ з конічною і напівсферичною КВ принципово різний, тому застосування наявних методик розрахунку КЗ з конічними КВ для оцінки дії зарядів з напівсферичними КВ є некоректним. В роботі [74] підтверджується, що ЛКЗ, на відміну від ВКЗ, демонструють меншу глибину проникнення КС.

Експериментальні методи формування та проникнення КС в одношарову перешкоду. Питання ефективності проникнення КС ЛКЗ в перешкоду, шляхом експериментального дослідження глибини проникнення розглядається в [72]. В цій роботі досліджуються ЛКЗ з мідною КВ клиноподібної форми з кутом при вершині 90° та полками 30 х 30 мм товщиною 0,5 мм. Перешкодою був алюмінієвий сплав (марка не уточнюється). Результати проникнення КС наведено на Рис. 1.25.



Рис. 1.25. Результати проникнення КС лінійного кумулятивного заряду з мідною КВ розмірами 30 х 30 мм, товщиною 0,5 мм [72]: *F* – фокусна відстань;

L – середня глибина проникнення; a - F = 0 мм, L = 10 мм;

б-F = 10 мм, L = 14,9 мм; в-F = 20 мм, L = 14 мм; $\Gamma - F = 30$ мм; L = 7,7 мм

Результати проникнення КС (Рис. 1.25) свідчать про значний вплив фокусної відстані на ефективність проникнення КС ЛКЗ, яка в даному випадку при відхилення фокусної відстані від 10 мм до 0 мм знижується на 32,9 %.

При збільшенні фокусної відстані зростає фрагментація КС, що знижує глибину проникнення. Це явище пояснюється градієнтом швидкостей частинок вздовж КС, що призводить до його розтягування і розриву на окремі фрагменти [9].

Причини фрагментації КС розглянуто в роботах [23,74]. Внаслідок згортання КВ формується КС, в який поступово переходять внутрішні шари КВ. Оскільки головна частина КС формується з частини КВ, розташованої ближче до вершини, її швидкість є найбільшою. У міру віддалення від «голови» КС до його «хвоста» швидкість руху частинок зменшується, тобто вздовж КС існує градієнт швидкості. Тому в процесі руху КС розтягується і розривається на окремі фрагменти (до 30-60 елементів, за даними [77]). Отже, якщо перешкода віддалена від ЛКЗ на значну відстань, вона перерізається ешелонованим потоком фрагментів (Рис. 1.25*в, г*).

Таким чином, відхилення від раціональної фокусної відстані ЛКЗ призводить до *зниження ефективності*, що вимагає збільшення типорозміру ЛКЗ. Це в своєю чергою спричиняє збільшення маси СР, витрат матеріалів, вібраційних навантажень та вартості виробу в цілому [9].

Окремо слід зазначити, що в конструкції виробів сучасної РКТ все частіше застосовуються неметалеві волокнисті композиційні матеріали. Однак досліджень з проникнення КС у такі перешкоди в розглянутих джерелах практично відсутні. Є лише поодинокі згадки в роботах [23,37], які вказують на збільшену величину проникнення КС в дані матеріали на 15-20 %, а також на неможливість застосування формул, отриманих для металевих перешкод.

Задача додатково ускладнюється при дослідженні багатошарових перешкод, де перший шар металевий, а наступні – з композиційних матеріалів. У цьому випадку процес проникнення КС ускладнюється поєднанням різнорідних матеріалів, кожен шар яких має свої фізико-механічні характеристики та особливості руйнування.

Для багатошарових перешкод математичних моделей для визначення раціонального типорозміру ЛКЗ не виявлено. У роботі [23] пропонується простий алгоритм: початковому етапі на проєктування при виборі конкурентоспроможних типів ЛКЗ задаються товщиною перешкоди, рівною сумарній товщині конструкційного (композиційного) матеріалу та металевого сплаву. На наступному етапі за результатами лабораторних випробувань на модельних зразках проводиться визначення раціонального типорозміру ЛКЗ. Методика [23] не дозволяє виконати оцінку необхідного типорозміру ЛКЗ розрахунковим способом, що призводить до збільшення часу та вартості етапу експериментального дослідження.

1.6 Постановка задачі

Проєктування піротехнічних систем розділення на основі ЛКЗ є перспективним напрямком в ракетно-космічній техніці. Ключовою вимогою, що ставиться до піротехнічних систем є ефективність та надійність. Не розділення перешкоди призводить до невиконання польотної місії.

Способом підвищення надійності є вибір ЛКЗ, кумулятивний струмінь якого проникає в перешкоду на глибину більшу за товщину елементу конструкції, що розділяється. При цьому для забезпечення високих показників ефективності системи розділення, його типорозмір (діаметр)¹ повинен бути мінімізований, а сам ЛКЗ повинен бути встановлений на раціональній фокусній відстані.

Проведений аналіз підтверджує складність процесу формування КС ЛКЗ з КВ напівциліндричної форми. Наявні методики, засновані на класичній гідродинамічній теорії є недостатніми для визначення глибини проникнення ЛКЗ (*L*), відсутні математичні залежності для визначення параметрів пов'язаних з фокусною відстанню (*F*) для перешкоди зі сплаву 2219, відсутні

¹ Надалі обидва терміни є взаємозамінними

математичні моделі для визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для перерізання багатошарових перешкод, що **становить складну науково**практичну задачу.

Конструктивна схема конструкції СР на ЛКЗ наведена на Рис. 1.26. Показано розташування ЛКЗ всередині корпусного відсіку та положення перешкоди, що підлягає розділенню.



Рис. 1.26. Конструктивна схема конструкції СР з ЛКЗ (на основі [6]): 1 – корпусний відсік РН; 2 – ЛКЗ; 3 – кронштейн; 4 – ВР; 5 – КВ; 6 – захист від продуктів детонації (за необхідності); *D* – діаметр ЛКЗ;*l* – КС; *F* – фокусна відстань; *L* – глибина проникнення КС; *L*_{пр} – товщина прорізання перешкоди;

є – відносна глибина відколу; S – товщина перешкоди

Алгоритм розв'язання поставленої задачі:

ефективності піротехнічної 1. Для підвищення CP застосовувати заснований комплексний підхід. який на визначенні раціонального типорозміру ЛКЗ для ефективного розділення багатошарової перешкоди, що складається з металевого першого шару та двох наступних з композиційних матеріалів та встановленні математичної залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані на напівнескінченній перешкоді з матеріал першого шару.

2. Розробити методику експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС в напівнескінченну металеву перешкоду.

3. Створити алгоритм визначення оптимальної фокусної відстані.

4. Провести теоретичний аналіз математичних моделей розрахунку глибини проникнення КС на визначити (уточнити) формулу для розрахунку глибини проникнення КС ЛКЗ з напівциліндричної КВ в напівнескінченну перешкоду.

5. Визначити діапазон фокусних відстаней у зоні очікуваного екстремуму для планування експерименту з мінімальними матеріальними витратами.

6. Провести експериментальні дослідження для встановлення математичної залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані для напівнескінченної перешкоди з алюмінієвого сплаву марки 2219.

7. Встановити оптимальну та раціональну фокусні відстані для перешкоди зі сплаву 2219.

8. Встановити напівемпіричні коефіцієнти, що впливають на ефективність проникнення КС, такі як вплив фокусної відстані та технологічних факторів.

9. Розробити методику визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для гарантованого розділення багатошарової перешкоди, що складається з трьох шарів з різними механічними характеристиками.

10. Підтвердити методику визначення раціонального типорозміру ЛКЗ експериментальним способом.

11. Визначити раціональний типорозмір ЛКЗ для розділення багатошарової перешкоди.

Висновки за розділом 1

Аналіз науково-технічних джерел інформації про ЛКЗ дозволив зробити наступні висновки:

1. ЛКЗ є перспективними та ефективними виконавчими елементами СР, що широко застосовуються в РКТ для вирішення різноманітних завдань, передусім розділення ступенів та аварійного припинення польоту.

2. Наявні методики та математичні моделі не повною мірою описують процес формування та проникнення КС ЛКЗ з напівциліндричною КВ в металеві перешкоди, що ускладнює оптимізацію проєктних параметрів, а саме

визначення глибини проникнення КС, фокусної відстані та раціонального типорозміру ЛКЗ. Наявні дані мають фрагментарний характер. Методи розрахунку глибини проникнення для багатошарових перешкод відсутні. Ключовими факторами, що впливають на ефективність кумулятивних зарядів є оптимальна (раціональна) фокусна відстань і технологічні фактори.

3. Ключовими факторами, що впливають на ефективність кумулятивних зарядів є оптимальна (раціональна) фокусна відстань і технологічні фактори.

4. Виявлено відсутність в науково-технічній інформації даних щодо глибини проникнення, фокусної відстані, залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані для ЛКЗ з напівциліндричної КВ та перешкоди з алюмінієвого сплаву марки 2219.

5. Проблема розділення багатошарових перешкод залишається недостатньо вивченою. В тому числі це стосується розробки розрахункових методик для визначення раціонального типорозміру ЛКЗ, що необхідно для ефективного і надійного перерізання таких перешкод.

6. Відсутні експериментальні дані щодо проникнення КС ЛКЗ з напівциліндричною КВ у багатошарові перешкоди, зокрема у такі де перший шар алюмінієвий сплав марки 2219, а наступні – з композиційних матеріалів.

Таким чином, встановлення значення оптимальної (раціональної) фокусної відстані, глибини проникнення КС в перешкоду, раціонального типорозміру ЛКЗ є складною науковою задачею, що залежить від багатьох факторів: геометрії КВ, густини та міцності матеріалів КС і перешкоди, точності виготовлення ЛКЗ, а також особливостей проникнення КС у конкретні перешкоди, в тому числі багатошарові. Для досягнення мети та завдань необхідно розробити методику експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС, алгоритм визначення оптимальної фокусної відстані, провести теоретичний аналіз та комплексні експериментальні дослідження, що вирішується у 2-5 розділах дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали

У дисертаційній роботі при дослідженні процесу проникнення КС ЛКЗ використовувались такі матеріали:

– алюмінієвий сплав марки 2219 ASTM B209-14 2219-T31/T351, який був застосований для виготовлення перешкоди (першого шару багатошарової перешкоди);

 – алюмінієвий сплав марки АМг6 ГОСТ 21631-76 – використовується для верифікації отриманих результатів;

- мідь марки М1 ГОСТ 859-2014 – для формування корпусу та КВ ЛКЗ;

- гексоген ГОСТ В 20395-74 - як вибухова речовина заряду;

– ultem 9085 Sabic Innovative Plastics – для виготовлення елементів кріплення ЛКЗ до перешкоди;

– ряд інших неметалевих матеріалів, які використовувались у складі багатошарової перешкоди: склотекстоліт СТ-1 ГОСТ 12652-74, повсть технічний напівгрубий ГОСТ 6308-71, полімерний композиційний матеріал (ПКМ) №1 (на основі скляних мікросфер), ПКМ №2 (на основі скляних мікросфер), багатофункціональне покриття (БФП) № 1 (на основі скляних і полімерних мікросфер) та БФП №2 (на основі кремнеземних і скловолоконних матеріалів).

Алюмінієвий сплав марки 2219 є високоміцним термозміцнюваним сплавом системи Al-Cu-Mn з додаванням титану, ванадію та цирконію. Основний легуючий елемент – мідь, яка забезпечує сплаву високу міцність та стійкість до корозії при підвищених температурах. Структура сплаву в зміцненому стані складається з α -твердого розчину міді та марганцю в алюмінії, а також інтерметалідної фази CuAl₂, рівномірно розподіленої по зерну у вигляді дрібних голчастих включень, а також уздовж їх меж у формі великих пластівців. Дисперсне виділення частинок CuAl₂ є основним

механізмом зміцнення сплаву, перешкоджаючи руху дислокацій в кристалічній решітці. Розмір, форма та розподіл цих виділень залежить від режиму термічної обробки. Механічні характеристики сплаву 2219 у гомогенізованому та штучно зістареному стані при температурах в діапазоні від 260 до 316°C перевершують характеристики будь-якого іншого комерційно доступного алюмінієвого сплаву [78–81].

Втрати міцності з підвищенням часу впливу температури мінімальні для 2219 за всіх температур. У корозійних середовищах або там, де висуваються вимоги до стану поверхні, рекомендується захист поверхні, такий як плакування, анодування або фарбування. Сплав 2219 добре зварюється різними методами, включаючи зварювання вольфрамовим та сталевим електродами в газовому середовищі, електронно-променеве зварювання, контактне зварювання змінним або постійним струмом [82–84].

Для дослідження взаємодії КС з алюмінієвим сплавом 2219, важливо розглянути його хімічний склад та основні властивості [78–80,82,85–88]:

Хімічний склад:

- Алюміній (Al): 91,9-93,8 %;
- Мідь (Cu): 5,8-6,8 %;
- Марганець (Mn): 0,2-0,4 %;
- Магній (Mg): ≤ 0,02 %;
- Залізо (Fe): ≤ 0,3 %;
- Кремній (Si): ≤0,2 %;
- Титан (Ti): 0,05-0,1 %;
- Ванадій (V): 0,05-0,15 %;
- Цинк (Zn): ≤0,1 %;
- Цирконій (Zr): 0,10 до 0,25 %;
- Інші домішки: ≤ 0,15 %.

Фізико-механічні характеристики:

- Густина: 2840 кг/м³;

- Температура плавлення: 543-643°С;
- Модуль пружності (модуль Юнга): ≈ 73 ГПа;
- Коефіцієнт теплового розширення: (20,8...24,4)×10⁻⁶ 1/°С. Більш детальні дані для конкретного діапазону температур наведено в [89].

Сплав 2219 використовується для виготовлення герметичних зварних конструкцій, головним чином у баках окислювача та пального [82,85,86]. З [90–93] відомо, що в сучасних розробках він використовується в обшивці та елементах конструкції надзвукових літаків, в баці космічного човна Space Shuttle external, в елементах конструкції модулів Columbus і Cupola на Міжнародній космічній станції.

Для дослідження використовувався матеріал 2219 (ASTM B209-14 2219-T351), який піддавався термічній обробці для отримання наступних характеристик (межа міцності $\sigma_{\rm B}$ = 436,4 МПа, межа плинності $\sigma_{0,2}$ = 323,7 МПа та відносне подовження δ = 10 %).

Алюмінієвий сплав марки АМг6 – поширений деформівний Al-Mg високою корозійною стійкістю та зварюваністю. Зміцнення сплав 3 досягається деформаційним наклепом. Основний легуючий елемент – магній (5,8-6,8 %). Структура сплаву АМг6 в поставленому стані являє собою твердий розчин магнію в алюмінії (α-твердий розчин). При значних деформаціях структура може містити дислокації та інші дефекти кристалічної решітки, що зумовлює зміцнення матеріалу Сплав АМг6 добре зварюється різними методами зварювання, такими як аргонодугове зварювання (TIG), зварювання плавлячим електродом в захисних газах (MIG), контактне зварювання. Зварні з'єднання мають високу міцність та корозійну стійкість. Сплав АМг6 широко використовується для виготовлення зварних конструкцій (корпуси РН та КА, різні елементи конструкції), суднобудуванні (корпуси суден, надбудови), в хімічній промисловості (ємності, трубопроводи), в автомобілебудуванні, будівництві та інших галузях [20,79,94,95].

Для дослідження взаємодії КС з алюмінієвим сплавом АМг6, важливо розглянути його хімічний склад та основні властивості.

Хімічний склад: [79,94,95]:

- Алюміній (Al): основа (≈ 93-94 %);
- Магній (Mg): 5,8-6,8 %;
- Марганець (Мп): ≤ 0,4 %;
- Кремній (Si): ≤0,4 %;
- Залізо (Fe): ≤0,4 %;
- Мідь (Cu): ≤ 0,1 %;
- Цинк (Zn): ≤ 0,2 %;
- Титан (Ті): ≤ 0,15 %;
- Берилій (Ве): ≤ 0,0005 %;
- Інші домішки: ≤ 0,15 %.

Механічні властивості сплаву АМг6 значно залежать від ступеня наклепу (деформаційного зміцнення). Стан постачання позначається додатковими літерами:

- М: м'який (відпалений);
- Н: нагартований;
- Н2: напівнагартований.

Наприклад, АМг6М – це сплав у відпаленому стані, АМг6Н – у нагартованому. Фізико-механічні характеристики сплаву АМг6 залежно від стану постачання наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Назва матеріалу	Межа міцності на розрив σ _в , МПа	Межа плинності σ _{0,2} , МПа	Густина, кг/м ³
АМг6М	320	160	2640
АМг6Н (20%)	380	280	2640
АМг6НН (30%)	420	320	2640

Характеристики сплаву АМг6 залежно від стану постачання [20]

Механічні характеристики сплавів АМг6Н та АМг6НН знижуються до значень сплаву АМг6М при тривалому (в декілька десятків хвилин) нагріванні [20].

Мідь марки М1 є одним з найчистіших видів міді [96] та завдяки своїм фізико-механічним властивостям, широко застосовується в електротехніці [97], приладобудуванні та інших галузях промисловості. В аерокосмічній техніці мідь М1 використовується в таких елементах, як електропроводка, теплообмінники. Висока пластичність міді М1 забезпечує її хорошу технологічність при виготовленні оболонок ЛКЗ, що сприяє отриманню якісних виробів [31,32,36,97].

Мідь має гранецентровану кубічну решітку. Легко піддається обробці, має одну з найвищих теплопровідностей серед металів. Мідь утворює патину, яка захищає поверхню від подальшої корозії [98].

Технічно чиста мідь маркується відповідно до стандартів [98,99] залежно від вмісту домішок. Приблизний вміст міді для різних марок: M00 (99,99% Cu), M0 (99,95% Cu), M2, M3 і M4 (99% Cu) [98].

Хімічний склад [96,99]:

- Мідь і срібло (Cu + Ag): не менше 99,90 %;
- Вісмут (Ві): не більше 0,001 %;
- Залізо (Fe): не більше 0,005 %;
- Нікель (Ni): не більше 0,002 %;
- Цинк (Zn): не більше 0,004 %;
- Олово (Sn): не більше 0,002 %;
- Сурма (Sb): не більше 0,002 %;
- Миш'як (As): не більше 0,002 %;
- Свиней (Pb): не більше 0,005 %;
- Сірка (S): не більше 0,004 %;
- Кисень (O): не більше 0,05 %.

Фізико-механічні характеристики [34,98,100]:

- Густина: 8960 кг/м³;
- Температура плавлення: 1083°С;
- Коефіцієнт лінійного теплового розширення: $16.5 \times 10^{-6} / ^{\circ}C$;
- Модуль пружності (Е): 110-130 ГПа;
- Межа міцності на розрив: 150-200 МПа;
- Відносне подовження: від 15 до 25 %

Гексоген – це безбарвна (біла) кристалічна тверда речовина, без смаку та запаху [41]. Гексоген (Hexogen), також відомий як RDX (Research Department Explosive) є високоефективною бризантною вибуховою речовиною з відмінною хімічною стабільністю і низькою чутливістю до зовнішніх впливів. Він є негігроскопічним та практично не розчиняється у воді [101].

В аерокосмічній промисловості гексоген використовується у виробництві піротехнічних пристроїв, таких як детонатори, запалювальні та різальні заряди, а також у кумулятивних зарядах [19,23,31,37].

Фізико-хімічні характеристики гексогену [19,37,101]:

- Хімічна формула: С₃H₆N₆O₆;
- Енергія утворення: +401.8 кДж/кг;
- Ентальпія утворення: +301,4 кДж/кг;
- Кисневий баланс: 21,6%;
- Об'єм вибухових газів: 0,903 м³/кг;
- Швидкість детонації 8750 м/с (при щільності 1760 кг/м³); 8180 м/с (при щільності 1650 кг/м³); 8030 м/с (при щільності 1600 кг/м³); 6080 м/с (при щільності 1000 кг/м³);
- Щільність: 1820 кг/м³ (теоретична густина монокристала). Практична щільність пресованого гексогену зазвичай менша (1600-1750 кг/м³) і залежить від технології пресування та флегматизації;
- Температура розкладання: 204°С;
- Теплота плавлення: 161 кДж/кг;

 Чутливість до удару: середня. Кількісні значення чутливості до удару сильно залежать від методики випробувань та стану речовини (ступінь подрібнення, наявність домішок, флегматизація). Зазвичай наводять значення 7,5 Н·м.

Висока швидкість детонації та значна енергія вибуху роблять гексоген незамінним для використання при виготовленні ЛКЗ [32].

Ultem 9085 — це високотемпературний термопластик, що відноситься поліефірімідів (PEI), який відрізняється високими механічними ДО властивостями та стійкістю до високих температур. Завдяки своїм унікальним Ultem характеристикам, широко використовується В аерокосмічній промисловості, електротехніці та інших високотехнологічних галузях [102].

В рамках дослідження, матеріал Ultem 9085 Sabic Innovative Plastics, використовувався для виготовлення кронштейнів кріплення ЛКЗ по технології 3D-друку. Кронштейни з даного матеріалу забезпечують надійне встановлення ЛКЗ, витримують високі навантаження та вплив експлуатаційних температур. Матеріал відносно стійкий до впливу хімічних речовин, забезпечує ізоляційні властивості від контакту мідного корпусу ЛКЗ з перешкодою із алюмінієвого сплаву, завдяки чому забезпечується додатковий захист від хімічної корозії корпус ЛКЗ.

Фізико-механічні характеристики Ultem 9085 [102]:

- Густина: 1330 кг/м³;
- Температура прогину при 1,8 МПа: 154 °С;
- Межа міцності на розрив 42 МПа (при товщині 3,17 мм, вісь ZX),
 69 МПа (при товщині 3,17 мм, вісь XZ);
- Модуль міцності: 2,22 ГПа;
- Подовження при розриві: 5,9 %;
- Коефіцієнт теплового розширення: $65,27 \times 10^{-6}$ 1/°C.
Фізико-механічні характеристики матеріалу Ultem відрізняються від стану постачання, нормативного документа. Тому його більш детальні фізикомеханічні характеристики для конкретних умов рекомендується дивитися в [102].

Інші матеріали

В таблиці 2.2 наведено характеристики інших матеріалів, які використовувались у складі багатошарової перешкоди.

Таблиця 2.2

Характеристики матеріалів, які використовувались у складі багатошарової перешкоди

Назва матеріалу	Межа міцності на розрив, МПа	Густина, кг/м ³	Примітка
Склотекстоліт СТ-1	200^{1}	1600-1800	[103]
Повсть технічний напівгрубий	1,47	340	[104]
ПКМ №1	0,8	340	-
ПКМ №2	471	1550-1800	-
БФП №1	0,8	475	-
БФП №2	5	1650	-

Примітка: 1 – Межа міцності при вигині (перпендикулярно шарам)

2.2 Методи досліджень

2.2.1 Моделювання взаємозв'язку між глибиною проникнення і фокусною відстанню

Моделювання є методом наукового дослідження, заснованим на використанні моделей для аналізу явищ і процесів природи. Під моделлю розуміють систему, що замінює реальний об'єкт дослідження, виконуючи функцію джерела інформації про нього [105–107].

Основною характеристикою моделей є їхня подібність до об'єкта, що вивчається, при цьому зберігаються суттєві властивості, а несуттєві розбіжності ігноруються. Відповідно до способу реалізації, моделі поділяють на матеріальні та ідеальні. Ідеальні моделі представлені у вигляді креслень, рисунків, схем, комп'ютерних програм тощо, тоді як матеріальні моделі виконуються з певних матеріалів, таких як дерево, метал, скло тощо [105–107].

Метод моделювання включає такі етапи: формулювання завдання, вибір або розробка відповідної моделі, дослідження моделі, перенесення результатів, отриманих за допомогою моделі на реальний об'єкт [108,109].

Системний підхід передбачає комплексне дослідження складних об'єктів, що розглядаються як єдині цілісні системи, в яких усі елементи функціонують узгоджено. В межах цього підходу необхідно аналізувати кожен структурний компонент у взаємозв'язку з іншими, оцінювати вплив його властивостей на загальну поведінку системи, виявляти емерджентні характеристики та визначати найбільш ефективний режим функціонування. Зі зростанням складності досліджуваних систем виникає необхідність їхнього розподілу на підсистеми, що дає змогу спростити аналіз. Декомпозиція дозволяє розглядати окремі частини автономно, з обов'язковим подальшим узгодженням їхніх функцій із загальною метою системи, що формує її ієрархічну структуру. Такий підхід зумовлений не лише складністю об'єкта дослідження, а й різнорідністю його компонентів. Декомпозиція, по суті, є аналітичним етапом вивчення системи, що спрощує її дослідження шляхом аналізу підсистем. При цьому наступний етап — синтез, який передбачає узгодження функціонування підсистем у єдиному механізмі, є значно складнішим завданням. Таким чином, ефективне застосування системного підходу вимагає раціонального поєднання методів аналізу та синтезу для досягнення узгодженого функціонування всієї системи [105,106].

Складність дослідження процесу проникнення КС у перешкоду обумовлена його залежністю від багатьох факторів. Зокрема, характеристик матеріалів КВ і перешкоди, геометричних параметрів КС та КВ, типу і кількості вибухової речовини, впливу фокусної відстані та технологічних факторів, що може бути узагальнено формулою (2.1) та наведено на Рис. 2.1.



Рис. 2.1. Залежність глибини проникнення від ряду факторів

$$L = f(D, BP, l, \rho_i, \sigma_i, \lambda_i, k_F, k_{KB}, k_T)$$
(2.1)

де *D* – діаметр ЛКЗ;

ВР – тип і кількість вибухової речовини;

l – довжина КС

ρ_i, *σ_i*, *λ_i* – значення густини, міцності і стисливості для матеріалів перешкоди та КС відповідно;

k_F, *k_{KB}*, *k_T* – коефіцієнти, що враховують вплив фокусної відстані, форми КВ і технологічних факторів відповідно.

Експериментальний підхід

Для встановлення залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані в роботах [31,32,36] використовується експериментальний метод, в патентах [68,70] наводиться конструкція пристосувань для експериментального визначення оптимальної фокусної відстані, в роботі [72] описується експериментальний метод визначення глибини проникнення КС в перешкоду.

Проведення експериментів у натуральному масштабі часто неможливе. Тому створюють зменшену модель, яка відтворює основні властивості оригіналу, дозволяючи досліджувати потрібні явища. Метод моделювання допомагає подолати вказані труднощі, забезпечуючи ефективний аналіз досліджувальних процесів [110,111]. Дослідження параметрів ЛКЗ у натуральному масштабі часто ускладнене через економічні і деякі технічні обмеження. Тому на ранніх етапах проєктування для дослідження глибини проникнення КС і впливу фокусної відстані застосовують моделювання, створюючи спрощені системи.

Методологія експерименту включає такі основні етапи [109,111]: розробка плану-програми експерименту, розробка дослідної конструкції, вибір засобів для проведення експерименту, проведення експерименту, обробка і аналіз експериментальних даних.

Таким чином, для визначення проєктних параметрів (фокусної відстані ЛКЗ, глибини проникнення КС та типорозміру ЛКЗ) необхідно вирішити комплексну наукову задачу. Для цього потрібно застосувати відомі методи, розробити конструкторську документацію на дослідні зразки, виготовити дослідні зразки та провести експериментальні дослідження. За результатами експериментів встановити математичну модель у вигляді залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані, що дозволить визначить оптимальну фокусну відстань і глибину проникнення КС, в тому числі з врахуванням впливу на неї фокусної відстані при відхилені від оптимальної в досліджуваному діапазоні. В рамках дослідження багатошарової перешкоди встановлюється раціональний типорозмір ЛКЗ.

2.2.2 Планування та проведення експерименту

Планування експерименту є важливим етапом дослідження, метою якого є мінімізація витрат часу та ресурсів при збереженні високої точності отриманих результатів. Планування дозволяє забезпечити відтворюваність результатів.

Експериментальні дослідження можуть проводитися в пасивній або активній формах. Пасивний експеримент є спостереженням за об'єктом у його природному стані, тоді як активний експеримент передбачає зміну рівнів контрольованих факторів за заздалегідь розробленим планом. Модель об'єкта дослідження приведена на Рис. 2.2.



Рис. 2.2. Модель (функціональна схема) об'єкта дослідження

Стан об'єкта дослідження описується математичною залежністю вихідної функції від вхідних факторів [112]:

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_n; h_1, h_2, ..., h_p; W_1, W_2, ..., W_q),$$
(2.2)

де $(X_1, X_2, ..., X_n; h_1, h_2, ..., h_p; W_1, W_2, ..., W_q)$ – значення незалежних величин.

Функція (2.2) називається *функцією відгуку*, в якій значення незалежних величин є факторами, а параметри (Y₁, Y₂, ..., У_r), які досліджуються (оптимізуються) – виходами, або відгуками. Серед факторів (входів) розрізняють такі групи [112]:

X – контрольовані керовані фактори. У нашому випадку це відстань між ЛКЗ і перешкодою (*F*);

h – контрольовані некеровані фактори (паспортні характеристики матеріалів об'єкта дослідження, геометричні параметри ЛКЗ, кількість наважки ВР, тип електродетонатора, місце ініціації детонації);

W – контрольовані збурювальні фактори (наприклад, зміна умов середовища, наявність або відсутність домішок, технологічні фактори, якість

виготовлення ЛКЗ, а також всі фактори, які не включені до програми досліджень).

Інформація про контрольовані збурювальні фактори (так звані незалежні змінні), їх характер і інтенсивності часто відсутня, а іноді має випадковий характер. Але сукупна величина впливу може бути суттєвою. У технологічні нашому випадку передусім це фактори пов'язані 3 виготовленням ЛКЗ, такі як: неоднорідність вибухової речовини (незначні відмінності в щільності або розподілі гранул ВР вздовж ЛКЗ), неточності виготовлення КВ, невеликі відхилення положення КВ від осі заряду, локальні неоднорідності матеріалу КВ та перешкоди, неточності вимірювальних інструментів, похибки вимірювання, в тому числі суб'єктивність при визначенні глибини проникнення, вплив інших факторів на процес експерименту.

За рекомендаціями [110,113] при плануванні експерименту розробляються:

1. Програма для усіх випробувань, яким піддається досліджуваний елемент конструкції;

2. Короткий та чіткий опис кожного послідовного випробування із зазначенням вихідних даних;

3. Детальний опис об'єкта випробувань;

5. Детальний опис методики випробувань;

6. Бланк результатів випробувань із зазначенням умов проведення експерименту та інформації, яку необхідно отримати;

7. Методи обробки експериментальних даних.

Для дослідження залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані обрано метод однофакторного експерименту. Він є базовим методом планування експериментів, що вирізняється простотою, економічністю та достатністю для досягнення поставленої мети. Фактором є фокусна відстань між ЛКЗ та перешкодою, відгуком – глибина проникнення КС у матеріал перешкоди. Критерієм оптимізації є максимальна глибина проникнення струменя. Оптимальна фокусна відстань відповідає тому значення фактора, при якому досягається максимальний відгук.

Процес експериментального дослідження проєктних параметрів ЛКЗ, розділено на два етапи:

- 1. Визначення оптимальної та раціональної фокусної відстані при розміщенні ЛКЗ під кутом до перешкоди;
- Визначення глибини проникнення КС на раціональній фокусній відстані при розміщенні ЛКЗ паралельно перешкоді.

Гіпотезою дослідження є припущення про нелінійну залежність між глибиною проникнення кумулятивного струменя та фокусною відстанню ЛКЗ.

Однофакторний експеримент використовує просту матрицю планування, яка містить кількість рівнів фактора та значення результатів для кожного рівня (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3

N₂	Рівень фактора (F)	Результат (L)
1	F_1	L_1
2	F_2	L_2
N	Fi	$L_{ m i}$

Матриця планування однофакторного експерименту

Бланк результатів експериментального дослідження етапів 1, 2 наведено в таблиці 2.4, таблиці 2.5 відповідно.

80

Загальна таблиця плану експерименту етапу 1, визначення оптимальної фокусної відстані

Дата, місто		Температура н	авколишнього		
		середов	зища, °С		
Спосіб і місце ініція	щії				
Параметри ЛКЗ:		Параметри переш	коди:		
- діаметр ЛКЗ, мм;		- марка матеріалу;	- марка матеріалу;		
- тип BP;		- товщина перешкоди;			
- наважка ВР, кг/м		- характеристики матеріалу			
		(межа міцності $\sigma_{\rm B}$,	МПа;		
		межа плинності $\sigma_{0,2}$	2, МПа;		
		відносне подовження δ , %)			
Номер фрагмента	Фокусна	Глибина Примітка			
	відстань	проникнення КС			
	(<i>F_i</i>), мм	(<i>L_i</i>), мм			
	F_1	L_1			
	F _n	L _n			

Таблиця 2.5

Загальна таблиця плану експерименту етапу 2, визначення глибини проникнення КС при паралельному розміщенні ЛКЗ на раціональній фокусній відстані

Дата, місто		Температура навколишнього			
		середов	зища, °С		
Спосіб і місце ініція	щії				
Параметри ЛКЗ:		Параметри переш	коди:		
- діаметр ЛКЗ, мм;		- марка матеріалу;			
- тип ВР;		- товщина перешко	- товщина перешкоди;		
- наважка ВР, кг/м		- характеристики матеріалу			
		(межа міцності $\sigma_{\rm B}$, МПа;			
		межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа;			
		відносне подовження δ , %)			
Номер фрагмента	Фокусна	Глибина Примітка			
	відстань	проникнення КС			
	(F), мм	(<i>L</i>), мм			
	<i>F</i> _{рац.}	L_1			
		L _n			

Математична модель. Залежність між фактором *F* та результатом *L* описується рівнянням виду [113]:

$$L = f(F), \tag{2.3}$$

де *f* – аналітична або емпірична функція, отримана внаслідок обробки даних.

Якщо аналітичний вираз функції відгуку (2.2) невідомий, то можна наближено виразити його за допомогою многочлена, який називається апроксимуючим многочленом Тейлора і має вигляд [114]:

$$y = b_0 + b_i x_i + b_{ij} x_i x_j + b_{ii} x_i^2 + \dots, \qquad (2.4)$$

де *b*₀, *b*_{*i*}, *b*_{*ij*}, *b*_{*ii*} – оцінки коефіцієнтів рівняння регресії, які розраховуються за експериментально отриманими даними.

Підтвердження раціонального типорозміру ЛКЗ. Для експериментального підтвердження раціонального типорозміру ЛКЗ використовується біноміальний експеримент, що передбачає проведення серії незалежних випробувань. Кожне випробування має один із двох можливих результатів: «успіх» або «невдача» [115]. Успіхом є факт розділення перешкоди шляхом її повного перерізання КС.

Виконується серія випробувань, результати яких записуються у вигляді кількості успіхів та невдач. Бланк результатів експериментального дослідження для підтвердження раціонального типорозміру ЛКЗ наведений в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Загальна таблиця плану експерименту підтвердження раціонального

Дата, місто			Примітка						
Температура навколишнього середовища,									
°C									
Параметри	діаметр	о ЛКЗ, мм	тип ВР нав		важка ВР, кг/м	4			
ЛК3:	(зна	чення)	(значення)		(значення)				
Спосіб і місце	е ініціаці	iï:	Фокусна від	стань, м	1M :				
			·						
Шар	Марка		Межа міцно	сті $\sigma_{\scriptscriptstyle \rm B},$	Відносне				
матеріалу	матеріа	лу:	МПа: (значен	ння)	подовження	δ, %:			
Nº 1	(значен	(кня)	Межа плинн	ості	(значення)				
(перешкоди)	Товщин	на, мм:	<i>σ</i> _{0,2} , МПа:		Густина кг/м	3.			
	(значен	(ня)	(значення)		(значення)				
Шар	Марка		Межа міцності $\sigma_{\rm B}$,		Відносне				
матеріалу	матеріа	лу:	МПа: (значення)		подовження	δ, %:			
<u>№</u> 2	(значен	(кня)	Межа плинності		(значення)				
	Товщин	на, мм:	<i>σ</i> _{0,2} , МПа:		<i>σ</i> _{0,2} , МПа:		Густина кг/м	3:	
	(значен	(кня)	(значення)		(значення) (значення)		(значення)		
Шар	Марка		Межа міцності $\sigma_{\rm B}$,		Межа міцності $\sigma_{\rm B}$, Відн		Відносне		
матеріалу	матеріа	лу:	МПа: (значення)		подовження	δ, %:			
<u>№</u> 3	(значен	(кня)	Межа плинності		(значення)				
	Товщин	на, мм:	<i>σ</i> _{0,2} , МПа:		Густина кг/м	3.			
	(значен	(кня)	(значення)		(значення)				

типорозміру ЛКЗ

Дана методика планування та проведення експерименту забезпечує надійність та репрезентативність отриманих даних для оцінки параметрів ЛКЗ, що досліджуються.

2.2.3 Метод регресійного аналізу екстремумів нелінійних функцій

Для визначення екстремумів нелінійних функцій використовуються математичні моделі та графічні методи аналізу. Одним із підходів є апроксимація залежностей поліномами різних порядків. Це дозволяє знаходити точки екстремумів і оцінювати характер змін функції [113,116].

Графічний підхід. Експериментальні дані, отримані в результаті досліджень, аналізуються за допомогою регресійного аналізу, який включає побудову поліноміальних функцій. Процес складається з таких етапів:

- Побудова графіка розсіяння експериментальні точки наносяться на графік для візуалізації залежності;
- Апроксимація даних виконується побудова регресійної кривої, яка найкраще описує отримані дані (зазвичай другого порядку);
- 3. Розрахунок коефіцієнтів рівняння, які описують залежність.

Регресійна крива другого порядку має вигляд [113,116]:

$$y = f(x) = ax^2 + bx + c;$$
 (2.5)

де $a, b, c - дійсні числа, причому <math>a \neq 0$. Дані коефіцієнти, отримуються внаслідок апроксимації.

Графічно екстремум цієї функції відповідає вершині параболи. Щоб знайти координати точки екстремуму використовуючи графік. опускають перпендикуляри з вершини параболи на вісі *X* та *Y*.

Математичний підхід. Екстремум функції досягається у вершині параболи, координати якої обчислюються за формулою [116]:

$$x_0 = \frac{-b}{2a};\tag{2.6}$$

де x₀ – значення змінної, що відповідає екстремуму.

Залежно від знаку коефіцієнта а:

- якщо a > 0, парабола відкривається вгору (екстремум є мінімумом);
- якщо *a* < 0, парабола відкривається вниз (екстремум є максимумом).

Тоді, значення функції в точці екстремуму:

$$y = f(x_0) = a \left(-\frac{b}{2a}\right)^2 + b \left(-\frac{b}{2a}\right) + c.$$
 (2.7)

Напрямок відкриття параболи визначає, чи є екстремум мінімумом або максимумом, що важливо враховувати під час аналізу залежностей.

2.2.4. Оцінка впливу термічного розширення конструкції в польоті на величину фокусної відстані

Для оцінки зміни фокусної відстані, викликаної відносним переміщенням ЛКЗ в результаті термічного розширення твердих тіл, використано методику, наведену в [14,117], за якою розраховується величина зміни довжини тіла кожного конструктивного елементу.

Для розрахунку сумарного впливу термічного розширення на фокусну відстань використовується рівняння [14]:

$$\Delta F_{\text{терм.}} = \sum_{i=1}^{n} \pm \Delta L_i.$$
(2.8)

Знак перед ΔL_i залежить від впливу термічного розширення: «+» обирається якщо розширення елемента збільшує фокусну відстань, «-» якщо зменшує.

Для оцінки впливу теплового розширення на величину фокусної відстані було розраховано переміщення крайньої точки КВ ЛКЗ при зміні температури від -50 до +220°C. Згідно з розрахунком, наведеним в додатку В, фокусна відстань конструкції зменшується на 0,025 мм. Таким чином, вплив теплового розширення на фокусну відстань є незначним і ним можна знехтувати.

2.3. Розроблені та використані методи

2.3.1 Методика експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС в перешкоду

Розроблена методика. Для експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС ЛКЗ розроблено нову методику, де ЛКЗ розміщується під малим кутом ($\alpha = 1...2^{\circ}$) до перешкоди. Це дозволяє:

- дослідити залежність глибини проникнення КС від фокусної відстані;

- визначити оптимальну фокусну відстань;

отримати кількісну оцінку впливу фокусної відстані на глибину проникнення.

Встановлення ЛКЗ під кутом α відносно перешкоди дозволяє зменшити кількість випробувань і матеріаломісткість досліджень. Квазінеперервний характер отриманих результатів глибини проникнення КС у межах досліджуваного діапазону фокусних відстаней забезпечує вищу точність визначення досліджуваних параметрів.

Розміщення ЛКЗ під кутом *α* обґрунтовується впливом наступних факторів:

 точністю виготовлення елементів СР та пов'язаною з цим межею допусків на встановлення ЛКЗ відносно перешкоди;

 точністю виготовлення корпусних елементів (наприклад, відхилення пов'язані зі спучуванням матеріалу перешкоди після зварювання) та складальних операцій (проворотом ЛКЗ навколо своєї вісі);

- оптимізацією експерименту (розмірів дослідної конструкції).

В реальних умовах експлуатації фактори пов'язані з точністю виготовлення матеріальної частини (кронштейнів, ЛКЗ, оболонки корпусу РН, провороту КВ тощо) призводять до виникнення варіації фокусної відстані між ЛКЗ та перешкодою. Обраний діапазон 1-2° дозволяє імітувати такі умови експлуатації, підвищуючи достовірність результатів.

Схему реалізації розробленої методики наведено на Рис. 2.3.



Рис. 2.3. Схема реалізації розробленої методики (уточнено з [6]):

ЛКЗ; 2 - перешкода; 3 - кронштейни кріплення ЛКЗ; 4 – електродетонатор;
 А, В – фокусна відстань між ЛКЗ і перешкодою; S – товщина перешкоди;

Н – довжина перешкоди

Вибір конкретного значення кута α в діапазоні 1–2°, а також довжини дослідного зразка H, визначається необхідністю дослідити бажаний діапазон фокусних відстаней (від F_{min} до F_{max}) за одне випробування на зразку економічно та технічно прийнятних розмірів. Цей взаємозв'язок наведено на Рис. 2.4.



Рис. 2.4. Схема визначення параметрів, що забезпечують установку ЛКЗ відносно перешкоди: А, В – фокусна відстань між ЛКЗ і перешкодою; С – різниця між значеннями А та В; Н – довжина перешкоди; α – кут нахилу ЛКЗ

Значення параметрів наведених на Рис. 2.4 визначаються:

$$A = F_{\min}; B = F_{\max}; C = A - B;$$

H = C / tg (\alpha) (2.9)

де А, В – фокусна відстань між ЛКЗ і перешкодою;

С – різниця між значеннями А, В;

Н – довжина перешкоди;

 α – кут нахилу ЛКЗ, α = 1...2°;

*F*_{min}, *F*_{max} – очікувані значення мінімальної та максимальної фокусної відстані в досліджуваному діапазоні.

Таким чином, діапазон 1–2° обрано як рекомендований, що дозволяє дослідити необхідний діапазон фокусних відстаней на зразку довжиною 150 мм, імітуючи при цьому реальні умови експлуатації.

Порівняння з наявними методиками. У відомих методиках ЛКЗ розміщується паралельно перешкоді.

В роботах [72,31], кожне випробування перевіряє одну фокусну відстань, що потребує великої кількості випробувань, як наслідок збільшується матеріаломісткість експериментального дослідження (Рис. 2.5).



Рис. 2.5. Схема відомої методики з розміщенням ЛКЗ паралельно перешкоді [72]: 1 – ЛКЗ; 2 – дерев'яні бруски; 3 – перешкода

В роботах [68,118] об'єкт дослідження має «сходинкову» конструкцією перешкоди, де кожна сходинка паралельна ЛКЗ, а перед і за нею фрезеровані поперечні пази (Рис. 2.6).



Рис. 2.6. Схема відомої методики зі «сходинковою» конструкцією перешкоди (уточнено з [68]): 1 – перешкода; 2 – горизонтальні площини («сходинки»;

3 і 4 – кронштейни; 5 – ЛКЗ; 6 – детонатор; 7 – поперечні пази; α – «умовний» (уточнено автором) кут нахилу перешкоди; *D* – діаметр ЛКЗ;

h – висота елемента площини («сходинки»); *H* – довжина перешкоди;

*l*_k – довжина твірної КВ; *F*_{min} – мінімальна відстань між ЛКЗ і перешкодою

Оскільки для кожної сходинки існує зона входу і виходу КС, це впливає на її ширину, а отже і на загальну довжину перешкоди. Така методика забезпечує дослідження обмеженої варіації фокусних відстаней і призводить або до збільшення розмірів зразка, або до збільшення кількості випробувань. Обидва варіанти призводять до збільшення матеріаломісткості дослідження.

Переваги нової методики. На відміну від відомих методик, розроблена дозволяє дослідити весь діапазон фокусних відстаней за одне випробування за квазінеперервним результатом проникнення КС. Це підвищує точність досліджень, зменшує матеріаломісткість і дозволяє імітувати реальні умови експлуатації, що підвищує реалістичність і практичну цінність моделі.

Дослідження проводиться у 2 етапи:

1. При A < В: встановлюється залежність глибини проникнення КС у перешкоду від фокусної відстані; визначається оптимальна та раціональна фокусна відстані, визначається вплив фокусної відстані на глибину проникнення КС.

2. При A = В: проводиться оцінка впливу технологічних факторів на глибину проникнення КС ЛКЗ, уточнюється значення глибини проникнення КС в перешкоду при паралельному розміщенні ЛКЗ на раціональній фокусній відстані.

Методика [6,8,15]:

1. Підготовка зразків для дослідження. Розробити дослідну конструкцію (ДК) для експериментального дослідження, що включає перешкоду з досліджуваного матеріалу, ЛКЗ, елементи кріплення ЛКЗ, електродетонатор. Товщина перешкоди повинна перевищувати очікувану глибину проникнення КС. Конструкція кронштейнів повинна забезпечувати надійне кріплення ЛКЗ до перешкоди з можливістю контролю фокусної відстані між ЛКЗ та перешкодою.

2. Виготовлення та комплектація елементів ДК. Виготовити перешкоду та елементи кріплення ЛКЗ. Для комплектації ДК використовувати ЛКЗ нормованого ряду.

3. Встановлення ЛКЗ на перешкоду ДК (етап A < B). Закріпити ЛКЗ під кутом до перешкоди *α*, який забезпечує варіативність фокусної відстані в досліджуваному діапазоні.

4. Проведення експерименту. Ініціювати детонацію вибухової речовини в ЛКЗ за допомогою електродетонатору.

5. Розділення зразків на фрагменти. Після експерименту кожна перешкода ДК розділяється на два фрагменти. Для цього на зворотній стороні перешкоди вздовж лінії розташування ЛКЗ виконується надріз (наприклад дисковою фрезою), не доходячи до зони проникнення КС. Далі частини перешкоди ДК відокремлюються одна від одної, забезпечуючи доступ до слідів проникнення КС. Структуру перешкоди після розділення зображено на Рис. 2.7.



Рис. 2.7. Макроструктура перешкоди зі сплаву марки 2219 після проникнення КС ЛКЗ: 1 – слід від проникнення КС; 2 – слід від розділення зразка (після експерименту); 3 – слід від надрізу для розділення зразка (дисковою фрезою)

6. Фотографування результатів та обробка зображень. Після розділення перешкоди ДК, виконати сканування або фотографування макроструктури матеріалу у високій роздільній здатності. Підготувати фотографії, наприклад в програмі XnVeiwMP: вирівняти горизонт та провести кадрування, використовуючи маску у вигляді сітки для зручності аналізу (Рис. 2.8).



Рис. 2.8. Вирівнювання горизонту фотографії досліджуваної перешкоди

7. Вимірювання глибини проникнення КС в перешкоду. Для кожного глибина вимірюється проникнення КС експерименту y перешкоду. Вимірювання глибини (L) виконується у точках вимірювання (K1, K2,... Kn) з згідно зi фіксованим кроком, схемою наведеною на Рис. 2.9. При вимірюваннях не враховуються зони входу та виходу КС (X1, X2), оскільки в їх межах вплив КС на перешкоду не відображає загальної закономірності (Рис. 2.10).



Рис. 2.9. Схема проведення замірів: *S* – товщина перешкоди; *L* – замір глибини проникнення КС; (*K1*, *K2*,... *Kn*) – точки вимірювання; (*X1*, *X2*) – зони входу та виходу КС; (*F1*, *F2*,... *Fn*) – значення фокусної відстані в точці вимірювання



Рис. 2.10. Зображення характеру впливу КС ЛКЗ на перешкоду: *X1* – зона входу КС у перешкоду; *X2* – зона виходу КС з перешкоди

Імпортувати фотографії до САПР (наприклад, AutoCAD), де отримати масштаб зображення дослідного зразка 1:1. Побудувати прямокутник, що відповідає розмірам досліджуваного зразка та накласти його на фотографію дослідного зразка. Базою для розміщення прямокутника є нижня частина зразку на фотографії (Рис. 2.11). Це пов'язано з тим, що при проникненні КС в перешкоду утворюється канал у вигляді латинської літери «V», де початкові місця входу КС підіймаються над основним металом зразка (Рис. 2.12).



Рис. 2.11. Встановлення глибини проникнення КС за допомогою фотографії високої роздільної здатності в САПР: 1 – лінія побудована командою «Сплайн» за результатами проникнення КС



Рис. 2.12. Канал утворений КС в матеріалі перешкоди

У точках вимірювання (*K1*, *K2*,... *Kn*) слід від проникнення КС відмітити за допомогою серії команд «Точка», які з'єднати командою «Сплайн» згідно з Рис. 2.11. Зняти значення глибини проникнення (*L1*, *L2*,... *Ln*) за допомогою команди «Лінійний розмір», згідно з Рис. 2.13. Вимірювання в середовищі САПР виконано з роздільною здатністю 0,01 мм.



Рис. 2.13. Зняття значень глибини проникнення КС за допомогою фотографії високої роздільної здатності в САПР: *L1*, *L2*,... *Ln* – значення глибин проникнення КС в точках вимірювання

Точність вимірювання глибини проникнення КС за зображенням макроструктури, імпортованого до САПР, залежить від якості отриманих для аналізу зображень (роздільної здатності, точності кадрування тощо) та правильності інтерпретації контуру проникнення. Для оцінки практичної точності розробленої методики вимірювання було проведено її порівняння з вимірами, виконаними за допомогою штангенциркуля ШЦ-І-250 0,1 ДСТУ ГОСТ 166:2009, який має точність ± 0,05 мм на фрагменті перешкоди зі сплаву марки 2219. На серії контрольних точок було проведено вимірювання глибини проникнення КС обома методами (Рис. 2.14, таблиця 2.7).



Рис. 2.14. Процес вимірювання глибини проникнення КС в перешкоду зі сплаву марки 2219 з використанням зображення макроструктури в САПР:

S – товщина перешкоди (S = 20 мм); A_i – відстань від нижньої частин перешкоди до ліній проникнення КС, L_i, – глибина проникнення КС, i – крок між вимірювальними точками (i = 3 мм)

Таблиця 2.7

Вимірювання штан	Вимірювання в САПР	
<i>Аi</i> , мм	L_i , мм ($L_i = S - A_i$)	L _i , мм
13,3	6,7	6,74
13,3	6,7	6,73
13,4	6,6	6,58
13,5	6,5	6,54
13,4	6,6	6,68
13,2	6,8	6,8
13,3	6,7	6,68
13,3	6,7	6,68
13,3	6,7	6,72
13,2	6,8	6,73
13,6	6,4	6,48
Середнє значення	6,655	6,669
Стандартне відхилення	0,121	0,096

Порівняння результатів вимірювання глибини проникнення КС

8. Аналіз результатів експерименту (етапу А < В). На основі отриманих даних розробити математичну модель, що описує залежність глибини проникнення КС від фокусної відстані; визначити оптимальну та раціональну фокусну відстані, розрахувати значення глибини проникнення КС в перешкоду, визначити вплив фокусної відстані на глибину проникнення КС.

9. Встановлення ЛКЗ на об'єкт дослідження (етап A = B). Випробування проводяться при розташуванні ЛКЗ паралельно до перешкоди на раціональній фокусній відстані, що дозволяє отримати більшу кількість вимірювань глибини проникнення. Це дає змогу точніше визначити глибину проникнення КС у перешкоду, встановити значення стандартного відхилення для глибини проникнення та оцінити вплив технологічних факторів на неї.

10. Повторити п. 4-7 методики для етапу (А = В).

11. Аналіз результатів експерименту (етапу A = B). На основі отриманих даних уточнити визначити глибину проникнення КС у перешкоду для раціонального параметру фокусної відстані, встановити значення стандартного відхилення та нижньої межі толерантного інтервалу глибини проникнення КС та оцінити вплив технологічних факторів на неї.

2.3.2 Алгоритм визначення оптимальної фокусної відстані

В роботах [30,31,36], залежність глибини проникнення КС від фокусної відстані для ряду матеріалів представлено графічно у вигляді квадратичних функцій (Рис. 2.15).



Рис. 2.15. Залежність глибини проникнення КС від фокусної відстані (перекладено та уточнено з [23])

Використання методів регресійного аналізу екстремумів нелінійних функцій дозволяє дослідити залежність глибини проникнення КС від фокусної

відстані та знайти екстремум, що відповідає оптимальному значенню фокусної відстані і максимальній глибині проникнення КС.

Експериментальні дані, отримані в результаті досліджень, аналізуються за допомогою регресійного аналізу, що включає побудову полінома другого порядку. Використання програм, таких як LibreOffice Calc або Microsoft Excel, дозволяє автоматизувати процес побудови графіків, розрахунків і аналізу, що підвищує точність і ефективність аналізу даних.

Алгоритм визначення оптимальної фокусної відстані [6]:

1. Вибір даних. У стовпці LibreOffice Calc або Microsoft Excel внести експериментальні дані, виділити дані та відкрити функцію «Діаграми», де на вісі *X* відкладаються значення фокусних відстаней, на вісі *Y* – значення глибини проникнення;

2. Побудова графіка. Вибирається тип графіка "Розсіювання";

3. Додавання лінії тренду. Тип лінії тренду обирається поліноміальний. Далі вибирається 2-й степінь полінома;

4. Налаштування рівняння. Увімкнути опцію «Показати рівняння на графіку» та «Показати значення R²».

5. Визначення рівняння. Програма автоматично обчислить рівняння залежності глибини проникнення від фокусної відстані по формулі (2.5). Підставивши у дану формулу замість x фокусну відстань F_i , замість y глибину проникнення L_i , отримаємо:

$$L_i(F_i) = aF_i^2 + bF_i + c; (2.10)$$

де *a*, *b*, *c* – дійсні числа, причому $a \neq 0$.

Відхилення фокусної відстані від оптимальної зменшує глибину проникнення КС. Для розрахунку глибини проникнення для довільного значення фокусної відстані у формулу (2.10), підставляється необхідне значення фокусної відстані *F_i*.

6. Розрахунок оптимальної фокусної відстані. Графічно екстремум функції (2.10) відповідає оптимальній фокусній відстані. Критерій оптимальності – найбільша глибина проникнення КС в перешкоду (2.11):

$$F_{onm.} = f\left(L_{i.j}\right), \ L_{i.j} \to max; \tag{2.11}$$

де $L_{i,j}$ – глибина проникнення КС, де i – номер ДК, j – номер фрагмента.

Розрахунок проводиться за формулою (2.6), в якій $x_0 = F_{opt.}$, тоді:

$$F_{opt.} = \frac{-b}{2a} \tag{2.12}$$

де a, b – коефіцієнти квадратичної функції (2.10).

Запропонований алгоритм дозволяє визначити оптимальну фокусну відстань і відповідну їй глибину проникнення КС ЛКЗ на основі експериментальної залежності (2.10), а також глибину проникнення для довільного значення фокусної відстані.

Висновки за розділом 2

На основі представлених у розділі матеріалів щодо методів і матеріалів дослідження можна зробити такі висновки:

1. Проведено огляд використаних у роботі матеріалів та виконано аналіз наявних підходів до моделювання для дослідження залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані. Обґрунтовано застосування методу однофакторного експерименту для дослідження цієї залежності як такого, що характеризується відносною простотою, економічністю та достатністю для досягнення поставленої мети.

2. Визначено основні фактори, що впливають на процес проникнення КС у перешкоду: контрольований (фокусна відстань), некеровані (геометричні параметри ЛКЗ, тип та кількість ВР) та збурювальні (технологічні відхилення при виготовленні ЛКЗ та перешкоди, неоднорідність ВР, похибки вимірювань).

3. Розроблено нову методику експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС в перешкоду, яка відрізняється від наявних тим, що ЛКЗ встановлюється під малим кутом (1...2°) до поверхні перешкоди. Такий підхід дозволяє отримати квазінеперервну залежність глибини проникнення від фокусної відстані в межах одного випробування, що суттєво скорочує кількість необхідних дослідів, зменшує витрати матеріалів і часу та забезпечуючи високу щільність даних для точного визначення оптимальної фокусної відстані.

4. Розроблено алгоритм визначення оптимальної фокусної відстані з використанням сучасних програмних засобів, що зменшує час і трудомісткість обробки експериментальних даних. Для визначення екстремумів нелінійних функцій, що описують залежність глибини проникнення від фокусної відстані, запропоновано поєднання графічного (побудова діаграми розсіювання та апроксимація поліномом другого порядку) та аналітичного (розрахунок координат вершини параболи) підходів, що дозволяє підвищити точність та надійність визначення оптимального значення.

5. Розроблені методика експериментального дослідження та алгоритм обробки даних є універсальними та можуть бути застосовані при відпрацюванні систем розділення на основі ЛКЗ для нових конструкційних матеріалів перешкод.

РОЗДІЛ З. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНІ І ГЛИБИНИ ПРОНИКНЕННЯ КС

3.1 Теоретичне дослідження визначення глибини проникнення КС в перешкоду

Класична модель. Задачу визначення глибини проникнення КС у напівнескінченну перешкоду було вперше розв'язано в рамках гідродинамічної теорії кумуляції запропонованої Лаврентьєвим М.А. [23,31–33,36].

Для розуміння механізму формування КС розглянемо спрощену двовимірну модель зіткнення двох плоских струменів рідини (Рис. 3.1). Ця модель, хоча й не повністю описує складний тривимірний процес формування КС при обтисненні КВ у ЛКЗ, дозволяє зрозуміти основні гідродинамічні явища, що лежать в основі кумулятивного ефекту. Вона базується на законах збереження маси, імпульсу та енергії та демонструє перерозподіл енергії та маси при зіткненні струменів [31,32].



Рис. 3.1. Схеми зіткнення плоских струменів [31] (з уточненням на основі [32]): *а* – загальна схема, *б* – точка перетину струменя з площиною, яка

рухається вздовж нього, *в* – випадок утворення одного струменя після зіткнення; *u*₀ – швидкість рідини в початковому струмені; *u*₁, *u*₂ – швидкість рідини після зіткнення в струмені І та ІІ відповідно; *w* – швидкість руху точки

перетину струменю з площиною xOz; w_0 – швидкість рідини; w_1 , w_2 – швидкість струменя I та II відповідно; α , β , γ – кути між напрямками руху струменя (рідини) та віссю x, фронтом потоку, площиною xOz відповідно

Розглянемо випадок сходження двох однакових за швидкістю (u_0) та масовою витратою (m_0) струменів під кутом α (Рис. 3.1*a*). В результаті зіткнення утворюються два нові струмені, що розтікаються в протилежні сторони [31,32].

Згідно з законами збереження, швидкості струменів, що розтікаються (u_1, u_2) рівні за модулем до швидкості початкових струменів (u_0) , але протилежні за напрямком $(-u_1 = u_0 = u_2)$. При цьому, масові витрати рідини в струменях, що розтікаються різні [31,32]:

$$m_1 = \frac{m_0(1 - \cos \alpha)}{2}; \tag{3.1}$$

$$m_2 = \frac{m_0(1 + \cos \alpha)}{2}; \tag{3.2}$$

де *m*₀, *m*₁, *m*₂ – витрати (маси) початкового струменю та струменів І та ІІ відповідно

Важливим є випадок, коли точка перетину струменя з площиною xO_z рухається вздовж вісі x з деякою швидкістю w (Рис. 3.1 δ). Коли потік u_0 перетинає площину xO_z , його початкові маса та енергія розподіляються між двома новоствореними потоками w_1 та w_2 , де w_1 розтікається направо, w_2 – наліво. Далі $u_2 < 0$. При заданій швидкості w_0 та кутах α та β у загальному випадку u_0 , w, w_1 та w_2 визначаються [31,32]:

$$-u_0 = w_0 \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}; \qquad (3.3)$$

$$w = w_0 \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}; \tag{3.4}$$

$$w_1 = w_0 \frac{\sin\beta + \sin(\alpha + \beta)}{\sin\alpha}; \qquad (3.5)$$

$$w_2 = w_0 \frac{\sin\beta - \sin(\alpha + \beta)}{\sin\alpha}, \qquad (3.6)$$

де w₀, w₁, w₂ – швидкості початкового струменю та струменів І та ІІ відповідно.

В нерухомій системі координат швидкості, а отже, і довжини всіх струменів однакові, з цього витікає **головне твердження**: *довжина кожного струменя дорівнює довжині початкового струменя* [32]. Тобто довжина КС для ВКЗ з конічною КВ визначається за формулою:

$$l = l_{\text{T.KB}},\tag{3.7}$$

де *l*_{т.кв} – довжина твірної конуса КВ ВКЗ.

Відношення маси і енергії цих потоків, як показують співвідношення (3.1), (3.2) та (3.5), (3.6), визначаються формулами [31,32]:

$$\frac{m_1}{m_2} = \operatorname{tg} 0,5\alpha,\tag{3.8}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{m_1 w_1^2}{m_2 w_2^2} = \left(\operatorname{tg0}, 5\alpha \frac{\sin \beta + \sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta - \sin(\alpha + \beta)} \right)^2, \quad (3.9)$$

де E₁ та E₂ – енергії струменів І та II відповідно

Аналіз формул (3.8), (3.9) показує, що відношення мас струменів залежить лише від кута α , тоді як відношення енергій залежить як від кута α , так і від кута β . Зокрема, при $\alpha < 0.5\pi$ виконується умова $m_1/m_2 < 1$ та $E_1/E_2 > 1$, що свідчить про те, що струмінь І має меншу масу, але більшу енергію, ніж струмінь II [31,32].

При певних умовах (Рис. 3.1*в*, коли кут $\beta = 0,5(\pi - \alpha)$ і $w_2 \equiv 0$), вся енергія переходить в один струмінь (І), що призводить до збільшення густини енергії в ньому. Цей ефект аналогічний концентрації енергії, що відбувається при формуванні кумулятивного струменя, хоча й у спрощеному двовимірному вигляді [31,32].

На основі цих гідродинамічних уявлень Лаврентьєвим М.А. була запропонована класична модель для оцінки глибини проникнення кумулятивного струменя, яка базується на ряді припущень, що суттєво спрощують аналіз [23,33,36]: - міцність матеріалів (як струменя, так і перешкоди) не враховується, оскільки в зоні взаємодії діють дуже високі тиски;

- стисливістю матеріалів нехтують, тобто як струмінь, так і перешкода вважаються ідеальними нестисливими рідинами.

Таким чином, процес проникнення КС в металеву перешкоду можна математично моделювати як взаємодію двох нестисливих рідин. Відповідно до цієї теорії, глибина проникнення КС визначається довжиною КС та густиною матеріалів КВ і перешкоди за формулою **Лаврентьєва** [32]:

$$L = l \cdot \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T}}, \qquad (3.10)$$

де *l* – довжина КС (для ВКЗ визначається за формулою (3.7));

 $\rho_{\rm J}$ і ρ_T – густина матеріалу КС і перешкоди відповідно.

Формула (3.10) є основою гідродинамічної теорії, що описує проникнення високошвидкісного КС зі швидкістю понад 4000 м/с [31,32], Однак для ЛКЗ її використання обмежене через нижчу швидкість струменя (2200–3500 м/с) [31]. За таких умов суттєвим стає вплив міцності та стисливості матеріалів. Це вимагає врахування додаткових факторів і застосування уточнених математичних моделей для більш точної оцінки.

Окрім швидкісних обмежень, важливо також враховувати тип перешкоди, для якої була виведена формула (3.10). Вона обмежується проникненням КС у напівнескінченні перешкоди.

Тому для розрахунку товщини перешкоди, що прорізається наскрізь КС ЛКЗ використовується уточнена Єфановим формула [23]:

$$L_{np.} = c \cdot l \cdot \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T}} \quad , \tag{3.11}$$

с – корекційний коефіцієнт.

Оскільки КС при своєму подовжені фрагментується, його ефективна довжина становить [23]:

$$l = l_{e\phi} = \sum_{i=1}^{n} l_i , \qquad (3.12)$$

де l_i – довжина і-го фрагмента;

n – загальна кількість фрагментів, з яких складається КС

Для оцінки процесу проникнення КС у матеріал перешкоди, також використовується підхід, який дозволяє врахувати вплив швидкості КС та густини матеріалів струменя і перешкоди. Для визначення глибини *L_i i*-го елемента КС використовується уточнена Орленко формула [36]:

$$L_i = \zeta_i l_i \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T}}; \qquad (3.13)$$

$$\zeta_{i} = \frac{V_{Ji} - V_{J}^{*}}{V_{J}^{*}}, \qquad (3.14)$$

де ζ_i – експериментальний коефіцієнт, що враховує вплив швидкості на глибину пробиття;

 l_i – довжина КС *i*-го елемента;

 V_{I} – швидкість *i*-го елемента КС;

 V_J^* – критична швидкість пробиття, причому при $V_{Ji} < V_J^*$ маємо $\zeta_i = 0$, а при $V_{Ji} \ge 4000$ м/с, $\zeta_i = 1$. Деякі середні значення критичної швидкості для ВКЗ наведено в таблиці 3.1.

Підсумкова глибина пробиття по гомогенній перешкоді на оптимальній фокусній відстані визначається за формулою:

$$L = \sum_{i=1}^{n} L_{i}$$
(3.15)

де *L_i* – глибина проникнення для *i*-го елемента (фрагмента);

n – загальна кількість елементів, з яких складається КС

103

Залежність критичної швидкості КС від твердості перешкоди та

Матеріал перешкоди	Матеріал КС	<i>V_J</i> *, м/с
Сталь загартована, HRC 50	Сталь	2200
Сталь, НВ = 125	Сталь	2050
Сталь, НВ = 125	Дюралюміній	3300
Дюралюміній, НВ 115	Дюралюміній	2900
Сталь міцна	Мідь	3000
Бетон	Мідь	1500
Пісок	Мідь	1000
Мармур	Мідь	1600
Вапняк	Мідь	1500
Піщаник	Мідь	1300
Бетон	Сталь	1900
Лід	Мідь	1800
Грунт мерзлий	Сталь	1000

матеріалу КВ ВКЗ [36]

<u>Примітка:</u> Залежно від характеристик використовуваних ВКЗ, методу визначення критичної швидкості та розбіжностей у тому, що вважати за критичну швидкість в досліді, ці дані в ряді випадків мають значний розкид.

Модель Колеснікова К.С. На відміну від класичної моделі, дана модель розрахована на ЛКЗ та базується на таких припущеннях [19]:

- 1. Детонація вибухової речовини відбувається миттєво.
- 2. Матеріали КВ та перешкоди вважаються стисливими рідинами.

Товщина перешкоди, що прорізається КС ЛКЗ, визначається за формулою [19]:

$$L_{\rm np} = l_0 \cdot \frac{1}{1 - \beta_{JK3}}, \qquad (3.16)$$
$$\beta_{JK3} = \frac{1 - \sqrt{\frac{\lambda_J \rho_T}{\lambda_T \rho_J}}}{\sqrt{1 - \frac{p_{cM} \lambda_T}{\rho_T u_J^2} \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda_J \rho_T}{\lambda_T \rho_J}}\right)^2}}; \qquad (3.17)$$

$$u_{J} = \eta_{B} \frac{0.41D}{\left(\frac{m_{_{\rm KB}}}{m_{_{\rm B,a}}} + \frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}} \tan \frac{\alpha_{_{\rm K}}}{2}},$$
(3.18)

де p_{cm} – міцність на стиск матеріалу перешкоди; для алюмінієвих сплавів з твердістю НВ 115, $p_{cm} = 27,4586 \cdot 10^3 \text{ MII}$ а;

 ρ_J і ρ_T – густина металу КС і перешкоди відповідно;

 λ_J і λ_T — коефіцієнти стисливості матеріалів КС і перешкоди;

*l*₀ – довжина КС в момент підходу до перешкоди.

 u_{J} – середня швидкість КС;

D – швидкість детонації ВР;

 α_{κ} – кут пів розкриття конічної КВ;

*m*_{кв} – маса КВ;

*m*_{в.а} – маса активної частини ВР;

 η_B – коефіцієнт, що враховує неповноту використання енергії активної частини ВР і поправку на середнє збільшення кута нахилу матеріалу КВ при її обтисненні. Цей коефіцієнт визначається експериментально. Для приблизних оцінок часто приймається $\eta_B = 0,7$.

Якщо припустити, що опір матеріалу перешкоди p_{cm} дорівнює нулю, а коефіцієнти стисливості α_J і α_T однакові, то формула (3.16) спрощується до класичної формули [19]:

$$L_{\rm np} = l_0 \sqrt{\frac{\rho_{J0}}{\rho_{\rm T0}}}$$

де ρ_{J0} і ρ_{T0} – початкові значення густини металу КС і перешкоди відповідно; l_0 – приймається рівним довжині половини твірної конуса КВ.

$$U_0 = 0.5 l_{\rm T.KB}, \tag{3.19}$$

де *l*_{т.кв} – довжина твірної конуса КВ.

1

Модель Фрістмана. Для оцінки товщини прорізання перешкоди Фрістман запропонував модифіковану модель, що враховує як гідродинамічну, так і ударно-хвильову компоненти процесу взаємодії КС з матеріалом перешкоди [37]:

$$\frac{L}{l_0} = \left(1 - \frac{d_0}{l_0}\right) \sqrt{\frac{\rho_{02}}{\rho_{01}}} + 2,42 \cdot \frac{d_0}{l_0} \sqrt{\frac{\rho_{02} u_0^2}{H_1}}, \qquad (3.20)$$

де *l*₀, *d*₀ – довжина та діаметр ударника (циліндричного уламка);

ρ₀₁ і ρ₀₂ – початкові значення густини перешкоди та ударника відповідно;

*H*₁ – динамічна твердість перешкоди;

ио – швидкість зіткнення

У випадку, коли відношення $d_0 / l_0 \ll 1$, то формула (3.20) спрощується до вигляду формули (3.10) [37].

Модель Єфанова. У роботах [23,37] для оцінки граничної товщини прорізання перешкоди запропоновано математичні моделі, що враховують механічні характеристики матеріалів і вплив відносної глибини відколу на зворотній поверхні перешкоди:

$$L_{\rm np} = 100d \left(\frac{u_{\rm H}^{-2}}{\rho\sigma_{\rm B}}\right) (1+\varepsilon), \qquad (3.21)$$

$$L_{\rm np} = 100d \cdot \left(\frac{u_{\rm H}}{\rho \cdot \sigma_{\rm B}}\right)^{\frac{1}{2}} (1+\varepsilon), \qquad (3.22)$$

де $u_{\mu} = \frac{u_r + u_x}{2}$ – пів сума швидкостей головного (u_r) і хвостового (u_x) елементів КС, м/с;

 ρ – густина матеріалу перешкоди, кг/м³;

*σ*_в – межа міцності при розтягуванні матеріалу перешкоди, Па;

є – відносна глибина відколу на тильній стороні перешкоди;

d – діаметр ЛКЗ, (розмірні одиниці не вказані).

За даними [37], для перешкод зі сталей Ст. 3, сталі 45 та 1Х18Н10Т $\varepsilon = 0,030...0,055$; зі сплавів АМг6, ВТ6С $\varepsilon = 0,065...0,080$; зі сплавів МА2-1, В93, Д16Т, ОТ4-1, 48Т17 $\varepsilon = 0,105...0,125$; зі сплавів ВМД3, ВТ5, ВТ14 $\varepsilon = 0,150...0,170$.

Модель Орленко Л.П. Серед розглянутих моделей вирізняється своєю комплексністю, зокрема вона є єдиною з представлених вище, що враховує вплив фокусної відстані та рівень технології виготовлення кумулятивного заряду [36]:

$$L_i = l_i \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T}} k_\sigma k_\lambda k_F k_T , \qquad (3.23)$$

де ρ_J і ρ_T – густина металу КС і перешкоди відповідно;

 l_i – довжина КС;

 k_{σ} – коефіцієнт, що враховує міцність перешкоди;

 k_{λ} – коефіцієнт, що враховує стисливість струменя і перешкоди;

*k*_{*T*} – коефіцієнт, що враховує рівень технології виготовлення КЗ;

 k_F – коефіцієнт, що враховує фокусну відстань КЗ

У формулі (3.23): $k_{\sigma} = (1...0,75)$, від маловуглецевої сталі до високоміцної сталі; $k_{\lambda} = (1...2)$, залежить від комбінації матеріалів КС і перешкоди; $k_F = 1$, при встановленні КЗ на фокусній відстані і зменшується у разі зміни цієї умови; $k_T = (1...2)$, залежить від технології виготовлення КЗ (від традиційної до прецизійної). Діапазон значень коефіцієнтів отримано в результаті експериментальних досліджень [36].

Загальний аналіз. Для покращення сприйняття інформації, аналіз розглянутих формул зведено до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Аналіз формул визначення глибини проникнення та товщини прорізання КС

N⁰	Формула	Номер	Аналіз
п.п.		формули	
1	$L = l \cdot \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T}}$	Лаврентьє ва (3.10)	Застосовується для високо- швидкісних КС з швидкостями понад 4000 м/с. Не враховує вплив міцності та стисливості матеріалів, що стає значним при швидкостях КС, характерних для ЛКЗ (2200–3500 м/с).
2	$L_{np.} = c \cdot l \cdot \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T}}$	Уточнена Єфановим (3.11)	Використовується для розрахунку товщини прорізання перешкоди ЛКЗ. Враховує відкольний ефект на тильній стороні перешкоди. Вводить корекційний коефіцієнт <i>c</i> , та потребує його експериментального визначення.
3	$L_{i} = \zeta_{i} l_{i} \sqrt{\frac{\rho_{J}}{\rho_{T}}},$ де $\zeta_{i} = \frac{V_{Ji} - V_{J}^{*}}{V_{J}^{*}}$	Уточнена Орленко (3.13)	Враховує вплив швидкості та довжини КС для кожного <i>i</i> -го елемента. Потребує експериме-нтального визначення коефіцієнта ζ_i , який невідомий для досліджуваних ЛКЗ та перешкоди.
4	$L_{\rm np} = l_0 \cdot \frac{1}{1 - \beta_{JK3}},$ $ge = \frac{1 - \sqrt{\frac{\lambda_J \rho_T}{\lambda_{\rm T} \rho_J}}}{\sqrt{1 - \frac{p_{cM} \lambda_T}{\rho_T u_J^2} \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda_J \rho_T}{\lambda_{\rm T} \rho_J}}\right)^2}},$ $u_J = \eta_B \frac{0.41D}{\left(\frac{m_{\rm \tiny KB}}{m_{\rm \tiny B.a}} + \frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}} \tan \frac{\alpha_{\rm \tiny K}}{2}}$	Колесніко ва (3.16)	Призначена для визначення товщини прорізання перешкоди КС ЛКЗ з клиноподібною КВ. У ній використано теоретичні уявлення, характерні для ВКЗ з конічними КВ, що випливає з використаних в роботі виразів, зокрема: «кут пів розкриття конічної КВ α_{κ} », «довжина твірної конуса» та «маса конічного облицювання» (для ЛКЗ характерна клиноподібна геометрія КВ). Параметр α_{κ} для ЛКЗ з напівциліндричною КВ не застосовується. Також не вказуються розмірні величини, що додатково обмежує її точність та застосовність.
5	$\frac{L}{l_0} = \left(1 - \frac{d_0}{l_0}\right) \sqrt{\frac{\rho_{02}}{\rho_{01}}} + \frac{1}{2} + 2 \cdot \frac{d_0}{l_0} \sqrt{\frac{\rho_{02}u_0^2}{H_1}}$	Фрістмана (3.20)	Удосконалена тим, що враховує як гідродинамічну, так і ударно-хвильову компоненти процесу взаємодії КС з матеріалом перешкоди. Відсутні дані для H ₁ , для досліджуваних матеріалів при u ₀ та складність їх експериментального визначення. Коефіцієнт «2,42» має емпіричний характер, межі використання не вказані.

Продовження таблиці 3.2

N₂	Формула	Номер	Аналіз
п.п.		формули	
6	$L_{\rm np} = 100d \left(\frac{u_{\rm H}^{-2}}{\rho \sigma_{\rm B}}\right) (1+\varepsilon),$ $L_{\rm np} = 100d \cdot \left(\frac{u_{\rm H}}{\rho \cdot \sigma_{\rm B}}\right)^{\frac{1}{2}} (1+\varepsilon),$ $u_{\rm H} + u_{\rm H}$	Єфанова (3.21) та (3.22)	Враховують пів суму швидкостей головного та хвостового елементів КС, густину, межу міцності на розтягування та відносну глибину відколу матеріалу перешкоди. Не вказується розмірність для параметра <i>d</i> .
	$e u_{\mu} = \frac{u_r + u_x}{2}$		
7	$L_i = l_i \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T}} k_\sigma k_\lambda k_F k_T$	Орленка (3.23)	Враховує міцність перешкоди (k_{σ}) , стисливість (k_{λ}) , вплив фокусної відстані (k_F) та технології виготовлення КЗ (k_T) . Застосовність обмежена відсутністю експериментальних значень цих коефіцієнтів для конкретних ЛКЗ і перешкоди, а також методик їх визначення.

Розрахунок. Для розрахунку використаємо наступні вхідні дані: діаметр ЛКЗ D = 5 мм, діаметр напівциліндричної КВ $d_{\kappa g} = 2,3$ мм; ВР – гексоген (наважка 0,0115 кг/м); матеріал КВ та корпусу ЛКЗ – мідь М1 (густина $\rho_J = 8960$ кг/м³, матеріал перешкоди – сплав 2219 (густина $\rho_T = 2840$ кг/м³; $\sigma_B = 436,4$ МПа).

За формулою (3.10). Встановимо довжину КС. З формули (3.7) $l = l_{m.\kappa 6}$ для конічних ВКЗ. У випадку ЛКЗ з КВ напівциліндричної форми автором на основі гідродинамічної теорії (Рис. 3.1*a*) запропоновано уточнену формулу для розрахунку довжини кумулятивного струменя:

$$l = \frac{\pi d_{\kappa_{\theta}}}{4},$$

$$l = \frac{3,14 \cdot 0,0023}{4} = 0,00181 \,\mathrm{m} = 1,81 \,\mathrm{mm},$$

$$L = l \cdot \sqrt{\frac{\rho_{J}}{\rho_{T}}} = 0,00181 \cdot \sqrt{\frac{8960}{2840}} = 0,00321 \,\mathrm{m} = 3,21 \,\mathrm{mm}.$$
(3.24)
За формулами (3.11), (3.13) розрахунок не можливий в зв'язку з відсутністю даних для коефіцієнтів *с*, ζ_i відповідно.

За формулою (3.16) розрахунок не можливий в зв'язку з невизначеністю застосування параметра *а*_к для ЛКЗ з напівциліндричною КВ.

За формулою (3.20) розрахунок не можливий (або ускладнений) внаслідок відсутності даних H_1 для об'єкта дослідження та необхідністі складного експериментального його визначення. Коефіцієнт «2,42» при другому доданку має емпіричний характер, межі використання не вказані.

За формулами (3.21), (3.22) розрахунок є некоректним у зв'язку відсутністю даних щодо розмірності для d. Спроба розрахунку з припущенням, що d вказаний у системі SI (d = 0,005 м), швидкість КС знаходиться в відомому діапазоні (2200-3500) м/с, де $u_r = 3500$ м/с, а $u_x = 2200$ м/с, тоді:

$$u_{\mu} = \frac{u_r + u_x}{2} = \frac{3500 + 2200}{2} = 2850 \text{ m/c}.$$

Для алюмінієвого сплаву марки АМг6, є = 0,065...0,080 [37]. Припустимо, що для сплаву марки 2219, є = 0,075, тоді по формулі (3.21):

$$L_{\rm np} = 100d \left(\frac{u_{\rm H}^{-2}}{\rho \sigma_{\rm B}}\right) (1+\varepsilon) = 100 \cdot 0,005 \left(\frac{2850^{-2}}{2840 \cdot 436, 4 \cdot 10^6}\right) (1+0,075) = 5,34 \cdot 10^{-20} \,\mathrm{M}.$$

По формулі (3.22),

$$L_{\rm np} = 100d \cdot \left(\frac{u_{\rm H}}{\rho \cdot \sigma_{\rm B}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (1+\varepsilon) = 100 \cdot 0,005 \left(\frac{2850}{2840 \cdot 436, 4 \cdot 10^6}\right)^{\frac{1}{2}} (1+0,075) = 2,58 \cdot 10^{-5} \,\text{M}.$$

Результати розрахунку значно відрізняються між собою та є фізично некоректними.

За формулою (3.23) розрахунок не можливий у зв'язку з відсутністю значень коефіцієнтів k_{σ} , k_{λ} , k_F та k_T для конкретних ЛКЗ і перешкоди та методик їх визначення.

Таким чином, проведений аналіз показав наступне:

1. Більшість розглянутих формул, включаючи класичну гідродинамічну формулу (3.10) та її модифікації, мають суттєві обмеження при застосуванні до ЛКЗ з напівциліндричною КВ:

– формула (3.10) не враховує вплив міцності та стисливості матеріалів,
 що є значними при швидкостях КС характерних для ЛКЗ (2200 – 3500 м/с);

– формула Колеснікова (3.16) призначена для ЛКЗ з клиноподібною КВ, тому не може бути використана для ЛКЗ з напівциліндричною КВ.

– у формулах (3.10), (3.11), (3.13), (3.20), (3.23) для розрахунку використовують довжину КС (*l*), визначену за двовимірною моделлю (формула (3.7)), яка не враховує особливості складного тривимірного процесу формування КС притаманного ЛКЗ. У формулі (3.16) довжину КС визначають за формулою (3.19), виведену для клиноподібної геометрії КВ, що не враховує особливості формування КС напівциліндричною КВ. Для підвищення точності розрахунків, автор рекомендує враховувати реальну геометрію КВ та процес формування КС ЛКЗ, шляхом введення корекційного коефіцієнта *k* до прийнятої довжини КС, наприклад за геометричним параметром довжини КВ. Зв'язок між довжиною КС та КВ доведений в рамках гідродинамічної теорії.

2. Значна частина формул ((3.11), (3.13), (3.16), (3.20), (3.21), (3.22) та (3.23)) є напівемпіричними і потребують визначення специфічних коефіцієнтів (c, ζ_i , H_1 , k_σ , k_λ , k_F , k_T , ε), значення яких для досліджуваних ЛКЗ та матеріалу перешкоди (сплав 2219) у проаналізованих джерелах інформації відсутні. Спроба розрахунку за формулами (3.21) та (3.22) з припущеннями щодо відсутніх даних та розмірності для d призвела до результатів, що не відповідають відомим експериментальним для алюмінієвих сплавів.

3. Більшість проаналізованих методик ((3.10), (3.11), (3.13), (3.16), (3.20), (3.21), (3.22) безпосередньо не враховують вплив таких важливих факторів, як фокусна відстань (k_F) та технологічні особливості виготовлення ЛКЗ (k_T). Їх вплив є суттєвим (до 14 % [30] та 11 % [8] відповідно) і має бути врахований для отримання точних результатів розрахунку. 4. Аналіз підтвердив, що ключовими параметрами, які найбільше впливають на глибину проникнення КС у перешкоду є:

- конструктивно-енергетичні параметри ЛКЗ (пов'язані з типом ВР, її кількістю та конструкцією ЛКЗ: $m_{\rm kB}$, $m_{\rm B.a}$, $\eta_{\rm B}$, u_0 , u_r , u_x , d);

- довжина КС;

- міцність і густина матеріалів перешкоди та КС;

- технологічні фактори виготовлення ЛКЗ;

- фокусна відстань.

5. Аналіз формул (3.18), (3.21), (3.22) дозволяє зробити важливий висновок – головним параметром оптимізації СР на ЛКЗ є маса наважки вибухової речовини, або, що безпосередньо з нею пов'язано, діаметр самого ЛКЗ. Як перший так і другий параметр впливають на довжину КС, тоюто дані параметри взаємопов'язані між собою.

6. Попри зазначені недоліки, перспективними підходами є формула Орленка (3.23), що враховує вплив фокусної відстані і технологічні особливості виготовлення ЛКЗ та формула Єфанова (3.22), що пов'язує глибину проникнення зі швидкістю КС, густиною та міцнісними характеристиками перешкоди. Обидві формули серед розглянутих, враховують вплив міцності перешкоди, як критичний при швидкостях КС характерних для ЛКЗ.

7. Обмеженням усіх розглянутих формул є їх орієнтація на однорідні металеві матеріали. Моделі для розрахунку взаємодії КС ЛКЗ з багатошаровими структурами, характерними для РКТ (у яких перший шар металевий, а наступні – композитні), у проаналізованій літературі відсутні.

Обґрунтування та пропозиція уточненої моделі.

Виявлені обмеження існуючих підходів вказують на необхідність розробки уточненої моделі розрахунку глибини проникнення КС для досліджуваного типу ЛКЗ у напівнескінченні перешкоди. Ця модель має базуватися на фундаментальних принципах гідродинамічної теорії, але водночас враховувати ключові фактори, що ігноруються або потребують уточнення в класичних моделях, а саме: напівциліндричну геометрію КВ (через оцінку l з використанням коефіцієнту k), вплив фокусної відстані (k_F), технологічні фактори (k_T), а також густини матеріалів КС та перешкоди. Вплив міцності, стисливості матеріалів та інших факторів в уточненій формулі враховується через коефіцієнт k.

Таким чином, для розрахунку глибини проникнення КС ЛКЗ в напівнескінченну перешкоду пропонується використовувати наступну уточнену формулу:

$$L = kl \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T}} k_F k_T \tag{3.25}$$

де *l* – довжина КС;

 ρ_{J}, ρ_{T} – густини матеріалів КС і перешкоди відповідно;

 k_{F} – коефіцієнт, що враховує вплив фокусної відстані;

*k*_{*T*} – коефіцієнт, що враховує вплив технологічних факторів;

k – загальний корекційний коефіцієнт, що комплексно враховує інші особливості процесу (вплив міцності, стисливості, реальної геометрії КС тощо)

Визначення значень напівемпіричних коефіцієнтів k_F , k_T , k для досліджуваної конфігурації ЛКЗ та перешкоди шляхом проведення комплексу експериментальних досліджень є завданням наступного розділу (Розділ 4) цієї роботи.

3.2 Теоретичне дослідження фокусної відстані ЛКЗ

Важливим параметром ЛКЗ, який впливає на глибину проникнення КС та, відповідно на ефективність процесу розділення, є фокусна відстань [6,33,36,72,74].

Фокусна відстань – це відстань між ЛКЗ та перешкодою (загальне поняття). Може бути як оптимальною, так і раціональною.

Оптимальна фокусна відстань – це таке значення відстані між ЛКЗ та перешкодою, за якого досягається максимальна глибина проникнення КС в матеріал перешкоди [6].

Раціональна фокусна відстань – це практично обґрунтована відстань, яку доцільно використовувати при проєктуванні СР. При цій відстані ефективність проникнення КС може бути дещо нижчою за максимально можливу, але залишається на достатньо високому рівні. Вибір раціональної відстані ґрунтується на низці факторів: технологічні допуски при виготовленні та монтажі ЛКЗ, умови експлуатації РН, вимоги стандартів, конструктивні обмеження, міркування практичної зручності тощо. Рекомендації зазвичай на узагальненні результатів попередніх базуються теоретичних та експериментальних досліджень, емпіричних даних та конструктивних міркуваннях (на основі [6]).

В загальному випадку фокусна відстань залежить від конструкції ЛКЗ, параметрів його КВ, типу і кількості вибухової речовини, точності виготовлення ЛКЗ, а також характеристик перешкоди, зокрема її густини [32,36]. Важливо підібрати фокусну відстань ЛКЗ з урахуванням всіх цих факторів. Це може бути досягнуто шляхом проведення синтезу теоретичних та експериментальних досліджень [6].

Типова залежність глибини проникнення КС від фокусної відстані для ЛКЗ-а представлена на (Рис. 3.2) [31], графік якої ілюструє наявність чітко вираженого оптимуму.



Рис. 3.2. Залежність глибини проникнення КС мідного ЛКЗ-а, наповненого гексогеном, від фокусної відстані для перешкоди зі сталі (уточнено на основі [31]): *L* – глибина проникнення КС; *F* – фокусна відстань; *D* – діаметр ЛКЗ

На основі експериментальних даних для різних типів ЛКЗ (виготовлених з міді і наповнених гексогеном) та матеріалів перешкод в роботах [31,37] були отримані емпіричні співвідношення для визначення діапазонів фокусних відстаней, що забезпечують максимальну ефективність КС:

– для ЛКЗ-а при дії КС на сталеву перешкоду [31]:

$$\frac{F}{D} = (1,0...1,5).$$
 (3.26)

– для ЛКЗ-б при дії КС на перешкоди зі сталей різних марок і титанових сплавів [37]:

$$\frac{F}{D} = (0,7...1,1). \tag{3.27}$$

– для ЛКЗ-б при дії КС на перешкоди з алюмінієвих і магнієвих сплавів [37]:

$$\frac{F}{D} = (0,8...1,6).$$
 (3.28)

Аналіз співвідношень (3.26) – (3.28) дозволяє попередньо оцінити очікувані межі діапазону в якому знаходиться оптимальна фокусна відстань для різних комбінацій ЛКЗ та матеріалів перешкод.

В роботі [20] наведені дані щодо фокусної відстані та глибини проникнення для ЛКЗ-а при дії КС на перешкоду з алюмінієвих сплавів марки АМг6 та Д16 (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3

1.29

перешкоду з алюмінієвих сплавів марки АМг6 та Д161										
Ціаметр ЛКЗ, мм	Фокусна відстань, мм	Товщина перешкоди, що перерізається КС, мм	Відношення параметрів							
D	F	L	F/D							
4,5	5	46	1,11							
5,5	7	69	1,27							

9...13

Фокусна відстань та глибина проникнення КС ЛКЗ-а при дії на перешкоду з алюмінієвих сплавів марки АМг6 та Д16¹

¹Джерело: сформовано на основі [20]

9

7

Залежність глибини проникнення від фокусної відстані окремо для кожного типорозміру ЛКЗ-в наведено у роботі [30], результати якої з позначенням рекомендованого діапазону для перешкоди з алюмінієвого сплаву 6061-Т6 наведено на Рис. 3.3.



Рис. 3.3. Залежність глибини проникнення КС свинцевого ЛКЗ-в, наповненого RDX, від фокусної відстані для перешкоди з алюмінієвого сплаву 6061-Т6 (на основі [30]): *L* – глибина проникнення КС, мм; *F* – фокусна відстань, мм; дві похилі лінії – раціональний діапазон фокусних відстаней

Згідно з даними [30,37,119], корпуси ЛКЗ-в найчастіше виготовляється з міді, алюмінію, свинцю або срібла, причому для зарядів більшого типорозміру частіше використовується мідь. Як видно з Рис. 3.3, залежність глибини проникнення КС від фокусної відстані має свої особливості для кожного конкретного типорозміру ЛКЗ-в.

Значення рекомендованої фокусної відстані (*F*) та відповідної глибини проникнення (*L*), отримані з графіків на Рис. 3.3 для нормованого ряду ЛКЗ-в зі свинцевою оболонкою та наважкою ВР (RDX) в діапазоні від 0,0053 до 0,0425 кг/м (25 – 200 гр/фт), зведено до таблиці 3.4. Наприклад, для ЛКЗ-в з наважкою ВР 0,0213 кг/м (100 гр/фт) раціональна фокусна відстань становить F = 4,57 мм, а глибина проникнення L = 11,81 мм.

Таблиця 3.4

Фокусна відстань та глибина проникнення КС ЛКЗ-в при дії на перешкоду з алюмінієвих сплавів марки 6061-T6¹

Наважка ВР, кг/м (гр/фт)	<i>F</i> , мм	<i>L</i> , мм
0,0425 (200)	5,84	21,08
0,0213 (100)	4,57	11,81
0,0106 (50)	2,54	8,56
0,0053 (25)	1,14	5,77

¹ Джерело: сформовано на основі [30]

З метою систематизації наявних даних та порівняльного аналізу, на основі джерел [20,30,31,37] автором було узагальнено технічні характеристики трьох основних типів ЛКЗ (ЛКЗ-а, ЛКЗ-б, ЛКЗ-в) виробництва різних країн. Результати зведено до таблиці 3.5.

Аналіз даних (таблиця 3.5) показує, попри відмінності у конструкції (ЛКЗ-а, ЛКЗ-б, ЛКЗ-в) та країні виготовлення, ЛКЗ подібних типорозмірів демонструють близькі показники ефективності (за параметром глибина проникнення). Близькість типорозмірів підтверджується результатами зворотного проєктування конструкцій ЛКЗ-а та ЛКЗ-в на основі відкритих даних [20,30,31,37,119,120].

Таблиця 3.5

Товшина Маса ЛКЗ Фокусна Дiaпрорізання на відстань, Тип Maca BP, Матеріал метр перешкоди, мм Тип ВР ММ Примітка одиницю ЛКЗ ЛКЗ, кг/м (гр/фт) оболонки ЛКЗ довжини, Алюміній Алюміній мм Сталь кг/м сплав сплав ЛКЗ-б 0.0038 2,75 Гексоген Мідь 0,025 4.9 2,7 Єфанов В.В. ЛКЗ-в _ Гексоген 0,0043 (20) Срібло 0,068 4.5 Петушков ЛКЗ-а 3 Гексоген 0,0060 Мідь 3 _ _ Л.П. Єфанов В.В. ЛКЗ-б 3,5 Гексоген 0.0052 Мідь 0,047 5,3 2,8 Єфанов В.В./ ЛКЗ-в 0,0053 (25) Срібло/Свинець 0,085/-5,2/--/5,8 -Гексоген -/1,1 Джеймс Л.С. Петушков ЛКЗ-а 0,0110 4 4 Гексоген Мідь _ _ Л.П. ЛКЗ-а 5 4,5 4 - 6_ --Лінник А.К. ЛКЗ-б 4,2 Гексоген 0,0085 Мідь 0,059 8,0 4.3 Єфанов В.В. Єфанов В.В. ЛКЗ-в 0,0085 (40) Срібло 0,135 6.9 -Гексоген ЛКЗ-а 5,5 6-9 7 _ --Лінник А.К. ЛКЗ-б Сфанов В.В. 5 Гексоген 0,0126 Міль 0,083 10.7 5,5 Єфанов В.В. ЛКЗ-б 6 Гексоген 0.0197 Міль 0.116 12.7 6.7 Єфанов В.В./ -/4,6 ЛКЗ-в Гекс./Окт. 0,0213 (100) Мідь/Свинець 0.105/--/11,8 6,5/--Джеймс Л.С. Петушков ЛКЗ-а Гексоген 0,0200 Мідь 6 _ 6 _ Л.П. 7 9 ЛКЗ-а 9-13 Лінник А.К. Єфанов В.В. ЛКЗ-б 7 Гексоген 0,0293 Мідь 0,149 15.3 7.9 Єфанов В.В. ЛКЗ-б 9 Гексоген 19,2 9,7 0,0467 Мідь 0,245 Єфанов В.В./ -/5.8 ЛКЗ-в -Гекс./Окт. 0,0425 (200) Мідь/Свинець 0,208/--/21,110,5/-Джеймс Л.С. Петушков ЛКЗ-а 10 Гексоген 0,0600 Мідь 10 _ -Л.П.

Основні параметри ЛКЗ нормованого ряду¹

де: Гекс./Окт. - Гексоген/Октоген

¹Джерело: сформовано на основі [20,23,30,31,37]

Електронне моделювання показало, що для ЛКЗ зі співставними характеристиками (наприклад, близькою масою ВР на одиницю довжини) спостерігається подібність як габаритних розмірів оболонок, так і площ поперечного перерізу ВР (Рис. 3.4) [9].



Рис. 3.4. Порівняння конструкцій ЛКЗ [9]: а — ЛКЗ-а; б — ЛКЗ-в; в — графічне суміщення варіантів ЛКЗ-а та ЛКЗ-в

Відхиленням фокусної відстані від оптимального її значення призводить до зниження глибини проникнення КС, як наведено на Рис. 3.5 [30].



Рис. 3.5. Залежність відносної ефективності проникнення КС свинцевого ЛКЗ-в (наповненого RDX) від відносної фокусної відстані (перекладено та уточнено з [30]): *F* – фокусна відстань, % (від оптимальної); *L* – глибина проникнення КС, % (від отриманої при *F_{opt}*; 1 – перешкода з нержавіючої сталі; 2 – перешкода з алюмінію

Аналіз Рис. 3.5 свідчить, що ЛКЗ зберігають працездатність у широкому діапазоні фокусних відстаней. Однак, відхилення від оптимальної призводять до зниження ефективності. Наприклад, для ЛКЗ-в та алюмінієвої перешкоди зменшення фокусної відстані до нуля призводить до зменшення глибини проникнення приблизно на 14 %. Таке зниження ефективності не тільки зменшує гарантовану товщину перерізання, але й може спричинити небажані побічні ефекти: посилення ударно-хвильового навантаження на конструкцію, виникнення відколів, розтріскування, розшарування матеріалу в зоні різу. Для конструкцій РН це може призвести до виходу з ладу чутливих елементів бортової апаратури та потребуватиме введення додаткових демпфуючих елементів, що збільшує загальну масу системи.

Таким чином, проведений аналіз показав наступне:

1. Фокусна відстань є важливим проєктним параметром, що визначає ефективність ЛКЗ. Для забезпечення максимальної глибини проникнення КС необхідно встановлювати ЛКЗ на оптимальній фокусній відстані.

2. Наявні літературні дані та емпіричні залежності (3.26) – (3.28) дозволяють зробити попередню оцінку меж очікуваного діапазону в якому знаходиться оптимальна фокусна відстань для різних комбінацій ЛКЗ та матеріалів перешкод (однак ці дані є узагальненими).

3. Аналіз показав відсутність у досліджених джерелах інформації рекомендацій щодо оптимальних значень фокусної відстані для комбінації: ЛКЗ-а (українського виробництва) – перешкода алюмінієвий сплав марки 2219, що є однією з задач дослідження даної роботи.

Таким чином, для точного визначення оптимальної фокусної відстані для конкретної задачі розділяється перешкоди у якої перший шар з алюмінієвого сплаву 2219, що розділяється за допомогою ЛКЗ вітчизняного виробництва з напівциліндричної КВ, необхідно провести експериментальні дослідження на напівнескінченній перешкоді з даного сплаву в діапазоні фокусних відстаней близьких до визначених формулою (3.28). Результати дослідження будуть представлені у розділі 4 даної роботи.

3.3 Розробка дослідної конструкції

Для досягнення поставлених у роботі завдань, зокрема для експериментального визначення залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані та вибору раціонального типорозміру ЛКЗ, було розроблено дослідну конструкцію (ДК), конструкція якої дозволяє моделювати умови, наближені до реальної роботи СР корпусного відсіку перспективної конструкції. ДК (установку) уніфіковано для проведення двох основних серій експериментів, загальну схему наведено на Рис. 3.6.



Рис. 3.6. Загальна схема ДК (установки): 1 – перешкода; 2 – ЛКЗ; 3 – елементи кріплення; 4 – імітатор циліндричної оболонки; 5 – підставка; а – ДК №1, що призначена для визначення залежності *L* від *F*; б – ДК №2, що призначена для визначення типорозміру ЛКЗ

ДК складається з таких основних елементів:

– перешкода (поз. 1) – характеристики обираються в залежності від призначення експериментів. Для визначення залежності глибини проникнення від фокусної відстані обирається перешкода напівнескінченної товщини (Рис. 3.6*a*). Для визначення типорозміру ЛКЗ – обирається перешкода, яка відповідає штатній конструкції для корпусного відсіку, що проєктується (Рис. 3.6*б*). При цьому з метою імітації реальних умов експлуатації (врахування сил ударної хвилі і продуктів детонації на бічні стінки корпусного відсіку), дослідна конструкція наведена на Рис. 3.6*б* додатково оснащується імітаторами циліндричної оболонки (поз. 4). - ЛКЗ (поз. 2) – виконавчий елемент СР.

– елементи кріплення (поз. 3) – кронштейни для фіксації ЛКЗ на заданій фокусній відстані від перешкоди та під заданим кутом (за необхідності).

– електродетонатор (на схемі не показаний) – піротехнічний пристрій, що використовується для ініціювання детонації ЛКЗ. Встановлюється у торцевій або верхній його частині.

При проєктуванні ДК важливим параметром є ширина перешкоди. Вона повинна бути достатньою для повного охоплення зони впливу фронту детонації ЛКЗ та супутньої ударної хвилі. За результатами аналізу слідів впливу на поверхні перешкоди (Рис. 3.7), було встановлено, що ширина зони помітного впливу для ЛКЗ діаметром D = 5 мм становить близько 80 мм. Це відповідає співвідношенню приблизно 16D.



Рис. 3.7. Вплив фронту ударної хвилі і продуктів детонації ЛКЗ на поверхню перешкоди.

З метою оптимізації витрат матеріалів та зниження вартості експериментальних досліджень було запропоновано конструктивне рішення, що дозволяє об'єднати дві перешкоди ДК в одному блоці (Рис. 3.8).



Рис. 3.8. Схема проєктування ширини перешкоди

Дане рішення забезпечує зменшення загальної ширини перешкоди приблизно на 20 мм, що в свою чергу дозволило знизити матеріаломісткість експериментальних досліджень на 18,4%, що пропорційно зменшило витрати на їх проведення.

Принцип роботи ДК. Перед проведенням експерименту ЛКЗ (поз. 2) встановлюється на заданій фокусній відстані *F* від поверхні перешкоди (поз. 1) за допомогою елементів кріплення (поз. 3). Залежно від мети дослідження, ЛКЗ може встановлюватися паралельно до поверхні перешкоди або під малим кутом (1...2°). Кронштейни (поз. 3) забезпечують точну фіксацію положення ЛКЗ. В результаті детонації ВР відбувається формування високошвидкісного кумулятивного струменя, який взаємодіє з матеріалом перешкоди (поз. 1), проникаючи в неї на певну глибину (*L*) або здійснюючи її прорізання (*L*_{пр}).

Описана ДК дозволяє отримувати експериментальні дані для визначення залежності глибини проникнення від фокусної відстані та визначати раціональний типорозмір ЛКЗ для гарантованого розділення конструкцій заданої товщини.

3.4 Обґрунтування об'єму експериментальних досліджень

Обсяг експериментальних досліджень визначається необхідністю отримання достовірних статистичних даних.

Для експериментального визначення фокусної відстані і глибини проникнення КС ЛКЗ на напівнескінченній перешкоді (ДК, Рис. 3.6*a*) кількість випробувань залежить від мінімального обсягу вибірки, що оцінюється за формулою [115,121–123]:

$$n_{\min} = \left(\frac{t_{(1+\gamma)/2;f} \cdot s}{\delta}\right)^2, \qquad (3.29)$$

де $t_{(1+\gamma/2)f}$ – квантиль розподілу Стьюдента рівня $p = (1+\gamma)/2$ зі ступенем вільності f = n - 1;

у – задана довірча ймовірність;

S – стандартне відхилення глибини проникнення, мм;

 δ — задана допустима похибка оцінки середнього значення глибини проникнення, мм.

Оскільки значення стандартного відхилення *S* для досліджуваної пари «ЛКЗ-перешкода» невідоме, дослідження проводять за покроковим принципом починаючи з *трьох* випробувань, оскільки менша кількості не забезпечує репрезентативність вибірки. Після визначення стандартного відхилення аналізуються отримані результати та уточнюється необхідний обсяг вибірки за формулою (3.29). В експерименті де ЛКЗ розміщується під кутом до перешкоди, для оцінки *S* рекомендується використовувати діапазон фокусних відстаней $F_{opt} \pm 10$, оскільки в цьому інтервалі вплив фокусної відстані на ефективність КС є незначним.

Значення n уточнюється ітераційним методом [115,123] після кожного кроку, а задана допустима похибка оцінки середнього значення глибини проникнення δ обирається з очікуваних результатів.

Для експериментального дослідження розділення багатошарової перешкоди кінцевої товщини (ДК, Рис. 3.6 σ) об'єм випробувань залежить від необхідної величини надійності. Критерієм дослідження є умова розділення багатошарової перешкоди шляхом її повного прорізання КС (успіх) або не прорізання (відмова). Така постановка відповідає біноміальній схемі випробувань (схема Бернуллі), де результат кожного випробування є незалежним, а ймовірність успіху (P) та відмови (1– P) вважаються постійними [115].

Для високонадійних елементів одноразової миттєвої дії, якими є системи розділення на основі ЛКЗ, верхня довірча межа надійності дорівнює одиниці, тому для практичних розрахунків використовується нижня довірча межа надійності, що визначається за формулою [124]:

$$H_{H} = P(A_{i}) = \sqrt[n]{1 - \gamma}, \qquad (3.30)$$

де *H_H* – нижня довірча межа надійності;

 $P(A_i)$ – ймовірність безвідмовної роботи;

n – кількість ДК, що піддаються випробуванню;

у – довірча ймовірність (рівень надійності).

З формули (3.30), отримаємо необхідний об'єм експериментальних досліджень *n* [124]:

$$n = \frac{\lg(1-\gamma)}{\lg(H_H)} \tag{3.31}$$

Приклад. Визначимо, кількість безвідмовних випробувань n, щоб з довірчою ймовірністю $\gamma = 0,95$ підтвердити нижню довірчу межу надійності прорізання багатошарової перешкоди для P = 0,779.

$$n = \frac{\lg(1-0,95)}{\lg(0,779)} = 12.$$

Результати розрахунку для інших значень Р наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Необхідна кількість безвідмовних випробувань для підтвердження нижньої довірчої межі надійності

Необхідна нижня довірча межа надійності,	Необхідна кількість безвідмовних					
H_H	випробувань, <i>п</i> шт					
0,741	10					
0,779	12					
0,819	15					
0,8384	17					
0,8726	22					
0,9018	28					
0,9504	58					
0,99	298					
0,999	2994					
0,9999	29956					
0,99995	59913					

При досягненні необхідної надійності випробування зупиняються.

Для зменшення кількості випробувань використовується метод Босса [23,115,125]. Він застосовується для оцінки надійності конструкції під дією експлуатаційних (номінальних) навантажень ($Q_{експл.}$) за результатами безвідмовних випробувань обмеженої кількості виробів при навантаженні ($Q_{випр.}$), що перевищує експлуатаційне. Метод використовується для орієнтовних попередніх оцінок на етапі відпрацювання конструкції [115].

Враховуючи, що критерієм надійної роботи є умова розділення багатошарової перешкоди шляхом її повного прорізання КС, яка для конкретних перешкоди та ЛКЗ залежить від фокусної відстані, то відхилення значення фокусної відстані від оптимальної (Рис. 3.5) призводить до зменшення глибини проникнення, тобто підвищує ризик відмови (не прорізання). Таким чином, для оцінки надійності ЛКЗ необхідно провести випробування обмеженої кількості зразків при значеннях фокусної відстані, що виходять за межі допустимого експлуатаційного діапазону. Верхня довірча межа середнього квадратичного відхилення розраховується за формулою [23,115,125]:

$$\sigma_{R,\gamma} = \frac{R_{max} - Q_{gunp.}}{3 - x}, \qquad (3.32)$$

де *R*_{max} – значення навантаження, що призводить до відмови;

 $Q_{\text{випр.}}$ – значення навантаження, що перевищує експлуатаційне;

x – коефіцієнт, що залежить від рівня довіри γ і кількості безвідмовних випробувань *n* (таблиця 3.7);

Таблиця 3.7

Значення коефіцієнта x, в залежності від рівня довіри у [115]

~		n									
Ŷ	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
0,7	- 0,12	- 0,44	- 0,64	- 0,79	-0,91	- 1,00	- 1,08	- 1,14	- 1,20	- 1,43	- 1,57
0,8	0,13	- 0,4	- 0,44	- 0,60	- 0,72	- 0,84	- 0,91	- 0,98	- 1,04	- 1,25	- 1,44
0,9	0,48	0,1	- 0,15	- 0,33	- 0,47	- 0,58	- 0,67	- 0,75	- 0,82	- 1,07	- 1,23

Математичне сподівання визначається за формулою [23,115,125]:

$$R = Q_{\text{sunp.}} - x\sigma_{R,\gamma}, \qquad (3.33)$$

Квантиль функції нормального розподілу та імовірність не руйнування при експлуатаційному навантаженні визначається за формулами [23,115,125]:

$$u_{\underline{P}} = \frac{\overline{R} - Q_{sunp.}}{\sigma_{R,\gamma} (1 + 1/2n)},; \qquad (3.34)$$

$$\underline{P} = \Phi \left[\frac{\overline{R} - Q_{\text{sunp.}}}{\sigma_{R,\gamma} (1 + 1/2n)} \right].$$
(3.35)

Значення <u>*P*</u> визначається за таблицями значення нормального розподілу $\Phi(u_p)$, (таблиця 60 в [126]):

$$P = \underline{P} = \Phi(u_P), \qquad (3.36)$$

$$\Phi(u_{\underline{P}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-y^2/2} dy \,. \tag{3.37}$$

Порядок розрахунку кількості безвідмовних випробувань наступний:

- визначається *R_{max}*, що дорівнює фокусній відстані, яка гарантовано виходить за межі допустимих значень заданих в конструкторській документації та призводить до відмови;
- визначається *Q*_{експл.}, що дорівнює раціональній фокусні відстані;
- задається значення фокусної відстані (навантаження) для випробувань
 *Q*_{випр.}, більше від *Q*_{експл.};
- задається кількість випробувань n і рівень довіри γ ;
- визначається значення *x* за даними з таблиці 3.7;
- розрахувати за формулами (3.32) (3.34) значення $\sigma_{R,\gamma}, \bar{R}, u_{\underline{P}};$
- за отриманим результатом *u_p*, з таблиці 60 в [126] визначається значення функції Ф(*u_p*) та надійність конструкції *P*.

Плановий обсяг досліджень. В рамках дисертаційного дослідження проводиться 12 випробувань на дослідній конструкції наведеній на Рис. 3.46 та 5 макетах корпусного відсіку нової розробки. Кількість випробувань при збільшеному навантажені уточнюється в розділі 5.

Висновки за розділом 3

За результатами теоретичного дослідження визначення фокусної відстані і глибини проникнення КС можна зробити такі висновки:

1. Аналіз класичної гідродинамічної теорії кумуляції та наявних розрахункових моделей глибини проникнення КС показав їх обмежену придатність для ЛКЗ з напівциліндричною КВ через відсутність даних щодо емпіричних коефіцієнтів та невизначеність ефективної довжини КС для цього типу зарядів.

2. На основі аналізу відомих математичних моделей визначено ключові групи параметрів, що впливають на глибину проникнення КС ЛКЗ: конструктивно-енергетичні (пов'язані з типом і масою ВР, геометрією та діаметром ЛКЗ); параметри КС (ефективна довжина, швидкість); фізикомеханічні властивості матеріалів перешкоди та КС; технологічні фактори виготовлення ЛКЗ та фокусна відстань.

3. Встановлено, що припущення класичних моделей щодо довжини КС потребують уточнення для випадку ЛКЗ з напівциліндричною КВ, зокрема шляхом введення відповідного корекційного коефіцієнта *k*.

4. Визначено найбільш перспективні математичні моделі (Орленка та Єфанова) як основу для подальшого уточнення формули розрахунку глибини проникнення КС та розробки методики визначення раціонального типорозміру ЛКЗ. Модель Орленка враховує вплив фокусної відстані та технологічних особливостей, а модель Єфанова пов'язує глибину проникнення зі швидкістю КС, густиною та міцністю перешкоди.

5. Уточнено формулу для розрахунку глибини проникнення КС ЛКЗ, яка поєднує гідродинамічний підхід (визначення довжини КС за геометрією КВ) з урахуванням напівемпіричних коефіцієнтів впливу фокусної відстані k_F , технологічних факторів k_T та загального коефіцієнта корекції k.

6. Теоретичний аналіз та узагальнення літературних даних підтвердили визначальну роль оптимальної фокусної відстані для забезпечення максимальної ефективності ЛКЗ та її залежність від типу/розміру ЛКЗ і матеріалу перешкоди. Відхилення від оптимальної фокусної відстані в діапазоні від 0 до 2 F_{opt} знижує глибину проникнення в перешкоди з алюмінію приблизно на 14 %.

7. Встановлено відсутність в досліджених джерелах інформації конкретних даних та рекомендацій щодо оптимальної фокусної відстані і глибини проникнення для ЛКЗ з напівциліндричної КВ при дії КС на перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219. Це визначає необхідність

експериментального визначення оптимальної фокусної відстані та глибини проникнення для даної комбінації «ЛКЗ-перешкода» в діапазоні значень фокусних відстаней близьких до F = (0, 8...1, 6)D.

8. Розроблено уніфіковану дослідну конструкцію, яка дозволяє моделювати умови функціонування СР та проводити дослідження для визначення залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані, а також для підтвердження раціонального типорозміру ЛКЗ для перешкод різного типу. Обґрунтовано методики планування об'єму експериментальних досліджень (на основі розподілу Стьюдента, біноміальних довірчих інтервалів та методу Босса), які забезпечують необхідну точність результатів при мінімальному об'ємі випробувань.

Таким чином, результати проведеного теоретичного дослідження формують науково-методичне підґрунтя для планування та проведення подальших експериментальних досліджень, спрямованих на визначення проєктних параметрів ЛКЗ, спрямованих на підвищення ефективності СР.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНІ І ГЛИБИНИ ПРОНИКНЕННЯ КС ЛКЗ НА НАПІВНЕСКІНЧЕННІЙ ПЕРЕШКОДІ

4.1 Верифікація методики експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС

Метою € верифікація розробленої розділі 2 методики В експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС Верифікацію В перешкоду. виконано ШЛЯХОМ проведення експериментального дослідження на добре вивченому матеріалі перешкоди (алюмінієвому сплаві марки АМг6), для якого існують відомі експериментальні дані в джерелах інформації. Схема проведення дослідження відповідає описаній у розділі 2 (Рис. 2.3).

4.1.1 Об'єкт дослідження

Об'єкт випробувань складався з наступних компонентів: ЛКЗ з мідною оболонкою діаметром 5 мм (конструкція відповідає Рис. 1.21*a*), наповнений ВР (гексогеном 0,0115 кг/м); металевої напівнескінченної перешкоди з алюмінієвого сплаву марки АМг6 товщиною 17,7 мм, довжиною 150 мм (характеристики сплаву: межа міцності $\sigma_e = 320$ МПа, межа плинності $\sigma_{0,2} = 160$ МПа, відносне подовження $\delta = 15$ %); кронштейнів кріплення ЛКЗ; електродетонатору.

ЛКЗ (поз. 1) встановлювався на металеву перешкоду (поз. 2) за допомогою кронштейнів (поз. 3) (Рис. 2.3). Кут між віссю ЛКЗ та поверхнею перешкоди було обрано таким чином, щоб забезпечити варіацію фокусної відстані F в досліджуваному діапазоні від 4 до 7 мм вздовж довжини перешкоди (150 мм). Розрахунковий кут склав 1,15°. Ініціювання ЛКЗ здійснювалося електродетонатором (поз. 4), встановленим у торці заряду.

ДК перед випробуванням зображено на Рис. 4.1.



Рис. 4.1. ДК з алюмінієвого сплаву марки АМг6 з встановленим ЛКЗ

Експериментальне дослідження проведено згідно зі схемою, наведеною на Рис. 4.2. Після випробувань кожна ДК була розділена вздовж вісі різу КС на два фрагменти для подальшого аналізу глибини проникнення.



Рис. 4.2. Схема експериментального дослідження

Для збільшення вірогідності отриманих результатів, заміри проводились на кожному з відокремлених фрагментах.

4.1.2 Результати випробувань та їх аналіз

Підготовка зразків до вимірювання та заміри глибини проникнення КС проведені за методикою, описаною в розділі 2.3.1.

Для аналізу взято ділянку перешкоди на якій забезпечується варіація значень фокусної відстані в діапазоні від 4,1 до 6,9 мм. Зони входу та виходу КС в об'єкт випробування в діапазоні від 4 до 4,1 мм, та від 6,9 до 7 мм були виключені з розгляду для мінімізації крайових ефектів.

На кожному фрагменті було проведено вимірювання глибини проникнення КС (L_i) вздовж лінії різу КС з кроком i = 0,1 мм, що відповідає фокусним відстаням $F_i = (4,2; 4,3; 4,5...6,9)$ мм (Рис. 4.3).



Рис. 4.3. Схема проведення вимірювань глибини проникнення *L* вздовж лінії різу: 1 – ЛКЗ; 2 – перешкода; *F_i* – діапазон досліджувальних фокусних відстаней, *F_i* – початкове значення фокусної відстані, рівне 4,1 мм; *L_i* – замір початкового значення глибини

Фотографії стану поверхні перешкоди після впливу КС (макроструктура) наведено в таблиці 4.1.



Номер фрагменту	Макроструктура матеріалу після впливу КС
1.1 (4←7)	Construction of the second sec
1.2 (7→4))	
2.1 (4←7)	
2.2 (7→4))	A CARE DE RESERVANCE - CONTRACTOR - CONTRA
3.1 (4←7)	
3.2 (7→4))	

Макроструктура алюмінієвого сплаву марки АМг6 після впливу КС

<u>Примітка:</u> в дужках під номером фрагмента цифрою (4,7) вказано фокусну відстань для його лівої і правої сторони. Стрілкою вказано напрямок детонації.

Результати вимірювань глибини проникнення КС у матеріал перешкоди наведені в таблиці 4.2 (стовпці 2-7).

Аналіз результатів експерименту.

Середнє значення глибини проникнення КС (*L_{cep.}*) розраховувалось згідно з [115], за формулою:

$$L_{\text{cep.}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} L_{i,j};$$
(4.1)

де *L*_{*i,j*} – глибина проникнення КС; *i* – номер ДК; *j* – номер фрагмента; *n* — кількість фрагментів.

Перевірку експериментальних даних на наявність грубих похибок (викидів) проведено за правилом трьох стандартних відхилень, згідно з яким викидами вважають всі дані, що знаходяться за межами інтервалу [127,128]:

$$\mu - 3\sigma \le x \le \mu + 3\sigma, \tag{4.2}$$

де µ – математичне очікування;

σ – стандартне відхилення генеральної сукупності

Оскільки генеральні параметри (μ , σ) зазвичай невідомі, на практиці використовують їх вибіркові оцінки: середнє значення ($L_{cep.}$) та стандартне відхилення (s) [128]. Відповідно, перевірка виконується за умовою, за якою вимірювання $L_{i,j}$ вважається викидом, якщо воно виходить за межі наступного інтервалу:

$$L_{\text{cep.}} - 3s \le L_{\text{i.j}} \le L_{\text{cep.}} + 3s, \tag{4.3}$$

де *L*_{сер.} – середнє значення глибини проникнення КС (розраховане за формулою (4.1);

*L*_{i,j} – виміряне значення глибини проникнення КС в наборі даних, що аналізується; де і – номер ДК, ј – номер фрагмента;

s – вибіркове стандартне відхилення

Значення *s* розраховувалось відповідно до [115], за формулою:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (L_{i.j} - L_{cep.})^2}{n-1}},$$
(4.4)

де *n* – кількість значень у вибірці

Приклад розрахунку для F = 4,1 мм.

$$L_{cep.}(F_{4,1}) = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{6} (8,67+8,38+8,49+8,37+8,28+8,55) = 8,46;$$

$$s(L_{i,j}(F_{4,1})) = 0,141.$$

Інтервал для ідентифікації викидів по формулі (4.3):

$$L_{\text{cep.}} - 3s = 8,03;$$

 $L_{\text{cep.}} + 3s = 8,88.$
 $8,03 \le (8,67; 8,38; 8,49; 8,37; 8,28; 8,55) \le 8,88.$

Аналогічний аналіз було проведено для всього масиву даних. Грубих похибок (викидів) не виявлено. Результати аналізу наведені в таблиці 4.2 (стовпці 8-13).

Таблиця 4.2

Дослід №1 Лосліл №2 Дослід №3 Lcep. L_{cep.} F, L_{\min} , L_{cep.}, $L_{\rm max},$ -3s. $L_{1.1},$ $L_{1.2}$, $L_{2.1},$ $L_{2.2}$, $L_{3.1},$ $L_{3.2}$, S +3s, ММ ММ ММ ММ ММ MM ММ ММ MM MM MM ММ 9 1 2 3 4 5 6 7 8 10 11 12 13 8,38 8,37 8,28 8,28 8,67 8,88 4.1 8,67 8.49 8,55 8.46 0,141 8,03 9,08 4.2 8,67 8,58 8,77 8,49 8,27 8,27 8,56 8,77 0,172 8,05 8,6 8,59 4,3 8,73 8,8 8,83 8,86 8,71 8,59 8,75 8,86 0,099 8,46 9,05 4,4 8,85 8,63 8,74 8,74 8,71 8,82 8,63 8,75 8,85 0,079 8,51 8,98 4,5 9,1 8,81 9,08 9,1 8,63 8,6 8,60 8,89 9,10 0,238 8,17 9,60 8,88 8,93 8,93 8,83 9,23 8,83 8,97 9,23 0,141 9,39 4,6 9,01 8,54 4,7 8.67 8,91 8.69 8,92 8,95 8,67 8,83 8,95 0,122 8,47 9.20 8,86 9,35 4.8 9.08 8.89 8,9 8,7 8,88 9,08 8,70 8,92 9.08 0,143 8,49 4,9 8,94 8,87 8,94 9,18 8,64 8,9 8,91 8,79 8,64 8,84 0,111 8,51 5.0 8,77 8,91 8,97 8,70 0,105 9,15 8,91 8,7 8,78 8,84 8,97 8,53 8,69 8.89 8.99 8.89 8,69 8,86 8.99 9,23 5,1 8,71 8,96 0,126 8,48 5,2 8,82 9,37 9,1 9,13 8,85 8,81 8,82 8,81 8,92 9,13 0,151 8,47 5,3 8,81 9,03 9,35 8,95 8,80 9,01 9,35 8,39 9,63 9,11 8,8 0,207 5,4 8,74 9,05 8,82 8,74 9,05 0,128 8,50 9,27 9.03 8,8 8,86 8,88 5,5 8,88 9,25 9,27 8,86 8,91 8,98 8,86 9,03 9,27 0,187 8,47 9,58 5,6 8,83 9,16 9,1 9,18 9,02 9,3 8,83 9,10 9,30 0,161 8,62 9,58 5,7 8,75 9,06 9,27 9.17 8,9 9.09 8,75 9.04 9,27 0,188 9,60 8,48 8,76 9,42 9,34 8,76 9,13 9,42 0,273 8,31 9,95 5,8 9,08 9,32 8,87 5,9 9,01 9,24 9,34 9,38 8,94 9,01 8,94 9,15 9,38 0,190 8,58 9,72 6.0 8,84 9.06 9,28 9,32 9.04 9,02 8,84 9.09 9,32 0.179 8,56 9.63 8.98 9,58 8.98 9.23 9.58 0,214 8,59 9.88 6.1 9.07 9,23 9,18 9,36 9.07 9,24 9.07 9,42 9,71 6.2 9,35 9.39 9.11 9,42 9,26 0,148 8,82 9.1 9,27 9.63 6.3 9.33 9.31 8,95 9.07 8.95 9,17 9.33 0,154 8,71 8,74 6,4 9.02 9.37 9.14 9.38 8,66 9.05 0,306 9.97 8,66 9.38 8,13 6,5 8,98 9,23 9,2 9,33 9,1 8,74 8,74 9,10 9,33 0,212 9,73 8,46 6,6 8,9 9,38 9,04 9,2 9,1 8,76 8,76 9,06 9,38 0,219 8,41 9,72 8,96 9,13 8,82 8,73 8,92 9,13 0,140 8,50 9,34 6,7 8,9 9 8,73 9,07 8,53 0,218 6,8 8,76 8,68 9 8,6 8,53 8,77 9,07 8,12 9,43 6,9 8,74 8,55 8,67 8,87 8,8 8,32 8,32 8,66 8,87 0,199 8,06 9,26

Результати вимірювання та статистичної обробки глибини проникнення КС для сплаву марки АМг6, при *F* від 4,1 до 6,9 мм

<u>Примітка:</u> *L*_{i,j} – глибина проникнення КС, де і – номер зразка, j – номер фрагмента

В графічному вигляді результати глибини проникнення КС залежно від фокусної відстані для дослідів № 1-3 наведені на Рис. 4.4.



Рис. 4.4 Результати вимірювання глибини проникнення КС в перешкоду зі сплаву АМг6 залежно від фокусної відстані: *F* – фокусна відстань, мм;

L – глибина проникнення КС, мм; *L*_{min}, *L*_{cep}, *L*_{max} – мінімальне, середнє, максимальне значення глибини проникнення КС відповідно; *L_{i,j}* – точки замірів для фрагментів № 1.1-3.2 відповідно

Аналіз результатів дослідження показує, що зі зміною фокусної відстані від 4,1 мм до 6,9 мм глибина проникнення КС ЛКЗ в сплав АМг6 змінюється від 8,27 до 9,58 мм. Максимальне середнє значення глибини проникнення було зафіксоване при фокусній відстані F = 6,2 мм і склало L = 9,26 мм. Подальше збільшення або зменшення F призводить до зменшення глибини проникнення. Мінімальне середнє значення глибини проникнення було зафіксоване при фокусній відстані F = 4,1 мм і склало L = 8,46 мм.

Визначення функціональної залежності глибини проникнення від фокусної відстані

Для отримання функціональної залежності [6] глибини проникнення КС від фокусної відстані та визначення оптимальних параметрів було проведено апроксимацію усереднених експериментальних даних (L_{min} , $L_{cep.}$, L_{max}), за допомогою поліноміальної регресії 2-го степеня у програмі LibreOffice Calc 24.2.7.2 (Рис. 4.5).



Рис. 4.5. Апроксимація середніх експериментальних значень глибини проникнення (L_{cep}) поліномом 2-го степеня та графічне визначення оптимальної фокусної відстані (F_{opt}) для сплаву АМг6: F – фокусна відстань, мм; L – глибина проникнення, мм; L_{min} , $L_{cep.}$, L_{max} – мінімальне, середнє, максимальне значення глибини проникнення, мм

Математична модель, що описує залежність глибини проникнення від фокусної відстані становить:

$$L_{\text{мод.}}(F) = f(\mathbf{x}) = -0,1958\mathbf{x}^2 + 2,276\mathbf{x} + 2,483.$$
(4.5)

Коефіцієнт детермінації R^2 для даної моделі становить 0,70.

Визначення оптимальної фокусної відстані. Координати вершини параболи залежності (4.5), що відповідають оптимальній фокусній відстані та максимальній глибині проникнення, розраховано аналітично за формулою (2.12) з коефіцієнтами *a* = – 0,1958; *b* = 2,276:

$$F_{\text{опт.}} = \frac{-b}{2a} = \frac{-2,276}{2 \cdot (-0,1958)} = 5,81 \text{ мм.}$$

Глибина проникнення, що відповідає цій фокусній відстані, за формулою (4.5):

 $L_{\text{MOT.}}(5,81) = f(5,81) = -0, 1958 \cdot 5,81^2 + 2,276 \cdot 5,81 + 2,483 = 9,1 \text{ MM}.$

Таким чином, за результатами експериментального дослідження, для ЛКЗ діаметром 5 мм встановленого на перешкоді з алюмінієвого сплаву АМг6, оптимальна фокусна відстань дорівнює 5,81 мм, а глибина проникнення 9,1 мм.

4.1.3 Верифікація методики експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС в перешкоду

Для підтвердження вірогідності (верифікації) результатів, отриманих за розробленою методикою ($F_{opt} = 5,81$ мм, L = 9,1 мм для ЛКЗ D = 5 мм та сплаву АМг6) проведемо їх порівняння з наявними у літературі даними для аналогічних або близьких умов.

Порівняння оптимальної фокусної відстані. Отримані результати узгоджуються з наявними у літературі даними. Зокрема, для ЛКЗ вітчизняного виробництва діаметром 4,5 та 5,5 мм при взаємодії з перешкодами з алюмінієвого сплаву АМг6 у роботі [20] наведені оптимальні значення фокусної відстані, що становлять 5 мм та 7 мм відповідно. Виконавши лінійну інтерполяцію цих даних для ЛКЗ діаметром 5 мм отримано фокусну відстань 6 мм.

Порівнюючи отримане в дисертаційній роботі значення $F_{opt} = 5,81$ мм з інтерпольованим літературним $F_{відоме} = 6$ мм, визначено відносну похибку, що становить 3,2 %. Така розбіжність є незначною і може бути пояснена відмінностями в конкретних умовах експериментів та похибками самої лінійної інтерполяції.

Порівняння глибини проникнення.

Метод 1 - масштабування даних [31] з використанням співвідношення для різних матеріалів з [37].

Згідно з [31], для ЛКЗ-а діаметрами 3, 4 і 6 мм глибина проникнення в сталеву напівнескінченну перешкоду становить 3, 4 і 6 мм відповідно. Провівши лінійну інтерполяцію цих даних можна отримати висновок, що для ЛКЗ діаметром 5 мм глибина проникнення в напівнескінченну перешкоду зі сталі становить 5 мм.

Згідно з [37], для ЛКЗ-б діаметром 5 мм наведено, що товщина прорізання КС перешкоди кінцевої товщини зі сталі $L_{np.cmanb} = 5,5$ мм, а перешкоди з алюмінієвих сплавів $L_{np.anom} = 10,7$ мм. Дані значення отримані для перешкод кінцевої товщини, тобто з врахуванням відколу (1 + ε), для якого згідно з формулою (3.22): $\varepsilon = 0,030...0,055$ (для сталей Ст. 3; 45 та 1Х18Н10Т), $\varepsilon = 0,065...0,080$ (для сплаву АМг6). У випадку перешкоди напівнескінченної товщини, глибина проникнення складе: для сталі $L_{cmanb} = 5,28$ мм, для алюмінієвого сплаву $L_{anom} = 9,98$ мм.

Співвідношення між якими становить:

$$\frac{L_{ankom.}}{L_{cmanb}} = \frac{9,98}{5,28} = 1,89.$$

Використовуючи отримане співвідношення для прогнозування глибини проникнення **ЛКЗ-а** діаметром 5 мм у напівнескінченну перешкоду з алюмінієвого сплаву, для даних наведених у роботі [31] отримаємо:

$$L_{\text{алюм.}} = L_{\text{сталь}} \cdot 1,89 = 5 \cdot 1,96 = 9,45 \text{ мм.}$$

Метод 2 - масштабування даних [37] за наважкою ВР з використанням методики [120].

Порівняємо досліджуваний ЛКЗ-а (D = 5 мм, наважка ВР становить 0,0115 кг/м, $L_{алюм.} = 9,1$ мм,) з ЛКЗ-б (D = 5 мм, наважка ВР становить 0,0126 кг/м, $L_{алюм.} = 9,98$ мм).

Використовуємо формулу масштабування компанії «Accurate Energetic Systems, LLC», що враховує вплив наважки ВР на глибину проникнення [120]:

$$L_1 = L_2 \sqrt{\frac{W_1}{W_2}}, \qquad (4.6)$$

де *L*₁ – невідома глибина проникнення КС;

 L_2 – зафіксована глибина проникнення для заряду з наважкою $W_{2;}$

 W_1 – обрана величина наважки ВР;

*W*₂ – зафіксована величина наважки ВР.

Тоді, для даних наведених у роботі [37], з врахуванням величини наважки глибина проникнення КС ЛКЗ-б діаметром 5 мм у напівнескінченну перешкоду становить:

$$L_{auom.} = 0,00998 \sqrt{\frac{0,0115}{0,0126}} = 0,00953m = 9,53mm.$$

Таким чином, отримане за розробленою методикою експериментальне значення глибини проникнення 9,1 мм (для сплаву АМг6) порівнюється з прогнозованими значеннями на основі літературних даних: 9,45 мм (метод 1) та 9,53 мм (метод 2). Відносна похибка становить до 4,5 %. Враховуючи непрямий характер порівнянь, отриману узгодженість результатів можна вважати задовільною.

Висновок. Порівняння експериментально визначених значень оптимальної фокусної відстані ($F_{opt} = 5,81$ мм) та глибини проникнення (L = 9,1 мм) для сплаву АМг6 з даними, отриманими шляхом обробки та масштабування літературних джерел ($F_{opt} = 5,81$ мм, L = 9,45; 9,53 мм), показало задовільну збіжність (відхилення до 4,5 %). Це підтверджує вірогідність результатів та коректність розробленої методики, що дозволяє використовувати її для дослідження інших алюмінієвих матеріалів, зокрема сплаву 2219.

140

4.2 Експериментальне визначення залежності глибини проникнення КС від фокусної відстані та оптимальних параметрів на перешкоді зі сплаву марки 2219

4.2.1 Об'єкт дослідження

Схема проведення дослідження відповідає верифікованій методиці, описаній у розділі 2 (Рис. 2.3). Склад об'єкта випробування аналогічний до розділу 4.1.1, за винятком матеріалу та товщини. Перешкоду виготовлено з алюмінієвого сплаву марки 2219 товщиною 20 мм, довжиною 150 мм (характеристики сплаву: межа міцності $\sigma_{\rm B} = 436,4$ МПа, межа плинності $\sigma_{0,2} = 323,7$ МПа, відносне подовження $\delta = 10$ %) [16,18].

ЛКЗ встановлювався під кутом 1,15° до перешкоди для забезпечення варіації фокусної відстані *F* в діапазоні від 4,1 до 6,9 мм. ДК з встановленим ЛКЗ перед випробуванням наведена на Рис. 4.6, а після спрацювання ЛКЗ – на Рис. 4.7.



Рис. 4.6. ДК з алюмінієвого сплаву марки 2219 [6]



Рис. 4.7. ДК з алюмінієвого сплаву марки 2219 після випробування

4.2.2 Результати випробувань та їх аналіз

Підготовка зразків (розрізання на фрагменти) та вимірювання глибини проникнення КС проводились аналогічно до розділу 4.1.2 (згідно зі схемою на Рис. 4.3) в діапазоні фокусних відстаней від 4,1 до 6,9 мм з кроком *i* = 0,1 мм.

Фотографії макроструктури поверхні фрагментів після впливу КС ЛКЗ наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Номер фрагмента	Макроструктура зони впливу КС
1.1 (4←7)	
1.2 (7→4))	
2.1 7(4←7)	
2.2 (7→4))	
3.1 (4←7)	
3.2 (7→4))	

Макроструктура алюмінієвого сплаву марки 2219 після впливу КС

<u>Примітка:</u> в дужках під номером фрагмента цифрою (4,7) вказано фокусну відстань для лівої і правої сторони фрагмента. Стрілкою вказано напрямок детонації.

Процесу вимірювання глибини проникнення КС в напівнескінченну перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219 на прикладі фрагменту № 1.1 по методиці наведеній в розділі 2.3.1 наведено в Додатку Г на Рис. Г.1. Результати вимірювань глибини проникнення КС зведено до таблиці 4.4 (стовпці 2-7). Проведено статистичну обробку даних: розраховано середні значення глибини

проникнення для кожної фокусної відстані (формула (4.1)), та виконано перевірку на наявність викидів (формули (4.3), (4.4)). Результати розрахунків та перевірки наведено в таблиці 4.4 (стовпці 8-13). Аномальних значень (викидів) у вибірці не виявлено.

Таблиця 4.4

П	Дослід №1		Дослід №2		Дослід №3		<u> </u>	-			L _{cen} .	L _{cen} .
F,	$L_{1,1},$	$L_{1,2},$	$L_{2,1}$	$L_{2,2}$	$L_{3,1}$,	$L_{3,2}$,	$L_{\min},$	L _{cep.} ,	L_{\max} ,	S	-3s,	+3s,
ММ	MM	MM	MM	MM	ММ	MM	ММ	ММ	MM		MM	MM
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4,1	5,65	5,69	5,85	5,98	6,27	6,32	5,65	5,96	6,32	0,285	5,11	6,82
4,2	5,99	5,44	5,89	6,27	6,53	6,21	5,44	6,06	6,53	0,376	4,93	7,19
4,3	6,06	5,88	5,92	6,35	6,45	6,64	5,88	6,22	6,64	0,309	5,29	7,15
4,4	5,73	5,75	5,96	6,16	6,53	6,50	5,73	6,11	6,53	0,354	5,05	7,17
4,5	5,98	5,62	5,98	6,20	6,59	6,63	5,62	6,17	6,63	0,391	5,00	7,34
4,6	6,12	6,07	6,15	6,04	6,51	6,42	6,04	6,22	6,51	0,197	5,63	6,81
4,7	5,68	5,92	6,00	6,24	6,50	6,52	5,68	6,14	6,52	0,336	5,13	7,15
4,8	5,85	5,91	6,29	6,54	6,47	6,55	5,85	6,27	6,55	0,315	5,33	7,22
4,9	5,86	5,66	6,13	6,28	6,64	6,46	5,66	6,17	6,64	0,367	5,07	7,27
5,0	5,65	5,75	6,06	6,30	6,61	6,68	5,65	6,18	6,68	0,431	4,89	7,47
5,1	5,86	5,83	6,34	6,44	6,61	6,39	5,83	6,25	6,61	0,323	5,28	7,22
5,2	5,63	5,43	6,16	6,25	6,54	6,27	5,43	6,05	6,54	0,425	4,78	7,33
5,3	5,62	5,67	6,36	6,34	6,30	6,52	5,62	6,14	6,52	0,387	4,98	7,30
5,4	5,88	5,75	6,22	6,19	6,45	6,36	5,75	6,14	6,45	0,273	5,32	6,96
5,5	5,61	5,23	6,40	6,25	6,44	6,58	5,23	6,09	6,58	0,539	4,47	7,71
5,6	5,60	5,60	6,22	6,23	6,28	6,43	5,60	6,06	6,43	0,364	4,97	7,15
5,7	5,59	5,19	6,32	6,10	6,58	6,52	5,19	6,05	6,58	0,553	4,39	7,71
5,8	5,72	5,59	6,20	6,07	6,69	6,59	5,59	6,14	6,69	0,445	4,81	7,48
5,9	5,55	5,43	6,06	6,22	6,30	6,65	5,43	6,04	6,65	0,466	4,64	7,44
6,0	5,74	5,17	5,85	6,15	6,40	6,61	5,17	5,99	6,61	0,516	4,44	7,54
6,1	5,51	5,21	6,18	5,76	6,28	6,26	5,21	5,87	6,28	0,446	4,53	7,21
6,2	5,47	5,21	6,02	5,81	6,25	6,20	5,21	5,83	6,25	0,416	4,58	7,08
6,3	5,65	5,15	5,75	5,53	6,12	6,42	5,15	5,77	6,42	0,448	4,43	7,11
6,4	5,37	5,29	5,66	5,44	6,16	6,15	5,29	5,68	6,16	0,389	4,51	6,85
6,5	5,33	5,09	6,00	5,68	6,11	6,31	5,09	5,75	6,31	0,474	4,33	7,17
6,6	5,57	5,30	6,14	5,38	6,22	6,53	5,30	5,86	6,53	0,507	4,34	7,38
6,7	5,48	5,22	5,59	5,36	6,17	6,56	5,22	5,73	6,56	0,522	4,16	7,30
6,8	5,25	5,06	5,68	5,43	5,93	6,25	5,06	5,60	6,25	0,443	4,27	6,93
6,9	5,37	4,98	5,66	5,16	6,14	6,38	4,98	5,61	6,38	0,554	3,95	7,27

Результати вимірювань та статистичної обробки глибини проникнення КС у перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219 (при F = 4,1...6,9 мм)

В графічному вигляді результати вимірювань глибини проникнення КС залежно від фокусної відстані представлені на Рис. 4.8.



Рис. 4.8 Результати вимірювання глибини проникнення КС в перешкоду зі сплаву 2219 залежно від фокусної відстані: *F* – фокусна відстань, мм; *L* – глибина проникнення КС, мм; *L*_{min}, *L*_{cep}, *L*_{max} – мінімальне, середнє, максимальне значення глибини проникнення КС відповідно; *L*_{*i*,*j*} – точки вимірювання *L* для фрагментів № 1.1-3.2 відповідно

Аналіз експериментальних даних (Рис. 4.8) показує, що зі зміною фокусної відстані від 4,1 мм до 6,9 мм середня глибина проникнення КС ЛКЗ в сплав 2219 змінюється в діапазоні від 4,98 до 6,69 мм. Максимальні середні значення глибини проникнення L = (6,25 - 6,27) мм спостерігаються при фокусній відстані F = (4,8 - 5,1) мм, подальше відхилення від якої призводить до зменшення глибини проникнення. Мінімальне середнє значення глибини проникнення в дослідженому діапазоні склало L = 5,6 мм при фокусній відстані F = 6,8 мм.

Уточнення мінімального об'єму експериментальних досліджень.

В діапазоні фокусних відстаней від 4,4 до 5,3 мм ($F_{opt} \pm 10\%$), де спостерігається незначна зміна глибини проникнення, було отримано n = 60
вимірювань. Визначене за цими експериментальними даними вибіркове стандартне відхилення становить s = 0,336 мм. Прийнято допустиму оцінку середнього значення глибини проникнення $\delta = 0,25$ мм та довірчу ймовірність $\gamma = 0,90$. Згідно з [115,129] квантиль розподілу Стьюдента $t_{(1+\gamma)/2;f}$ для числа ступенів вільності f = n - 1 = 59 та рівня р = $(1+\gamma)/2=0,95$) дорівнює $t_{0,95;59} = 1,671$. Тоді, за формулою (3.29) мінімально необхідна кількість вимірювань становить:

$$n_{\min} = \left(\frac{1,671.0,336}{0,25}\right)^2 = 5,04$$

Після округлення в більший бік $n_{\min} = 6$. Оскільки фактична кількість вимірювань n = 60, отримана в результаті випробування трьох ДК, значно перевищує мінімально необхідну ($n_{\min} = 6$), обсяг вибірки є достатнім для надійного визначення залежності глибини проникнення від фокусної відстані з заданою точністю та довірчою ймовірністю 90%.

4.2.3. Визначення функціональної залежності глибини проникнення від фокусної відстані

Для отримання математичної моделі, що описує залежності глибини проникнення від фокусної відстані, було проведено апроксимацію усереднених експериментальних даних ($L_{cep.}$) поліноміальною регресією 2-го степеня (аналогічно до розділу 4.1.2) [6]. Результат апроксимації наведено на Рис. 4.9.

Математична модель, що описує цю залежність, має вигляд:

 $L_{\text{мод.}}(F) = f(\mathbf{x}) = -0,1465\mathbf{x}^2 + 1,4248\mathbf{x} + 2,7021.$ (4.7)

Коефіцієнт детермінації R² для даної моделі становить 0,872, що вказує на високу якість апроксимації середніх значень.



Рис. 4.9. Апроксимація середніх експериментальних значень глибини проникнення (*L*_{cep}) поліномом 2-го степеня та графічне визначення оптимальної фокусної відстані (*F*_{opt}) для сплаву 2219: *F* – фокусна відстань, мм; *L* – глибина проникнення КС, мм; пунктирна лінія – перпендикуляр із вершини кривої на вісь *F*

Отримана модель (4.7) це квадратична функція з від'ємним старшим коефіцієнтом (-0.1465), графіком якої є парабола з гілками вниз, що має єдиний максимум (вершину). Така форма залежності якісно відповідає фізиці процесу: існує оптимальна фокусна відстань, при відхиленні від якої глибина проникнення зменшується, що узгоджується з відомими даними (див. розділ 3).

4.2.4 Визначення оптимальної і раціональної фокусної відстані Визначення оптимальної фокусної відстані

Графічний підхід. Оптимальним значенням фокусної відстані (F_{opt}) є абсциса вершини апроксимуючої параболи. Опустивши перпендикуляр із вершини кривої на вісь фокусної відстані (F), графічно отримано оптимальне значення $F_{opt} \approx 4,9$ мм. (Рис. 4.9).

Аналітичний підхід. Оптимальну фокусну відстань для залежності (4.7) визначено за формулою (2.12) з коефіцієнтами *a* = – 0,1473; *b* = 1,4298:

$$F_{opt} = \frac{-b}{2a} = \frac{-1,4248}{2 \cdot (-0,1465)} = 4,86$$
 MM.

Результати графічного та аналітичного підходів добре узгоджуються, для подальшого дослідження обирається значення оптимальної фокусної відстані отримане за аналітичним підходом ($F_{opt} = 4,86$ мм).

Визначення раціональної фокусної відстані

В реальних умовах експерименту точність до сотих часток міліметра $(F_{opt} = 4,86 \text{ мм})$ є надлишковою, оскільки такі малі відхилення суттєво не впливають на ефективність КС. Аналіз експериментальних даних підтверджує це: наприклад, при фокусних відстанях $F_i = (4,5; 5; 5,5)$ мм, близьких до оптимуму, експериментальні середні значення глибини проникнення $L_{cep.}(F_i) = (6,17; 6,18; 6,09)$ мм близькі між собою.

Також, в умовах виробництва, наприклад при налаштуванні фокусної відстані, забезпечення точності до сотих часток міліметра є технологічно складним, особливо у випадках використання стандартного обладнання (вимірювальні щупи), яке часто обмежується кроком 0,1 або 0,5 мм.

Відповідно до вимог стандарту [130], що регламентує нормальні ряди лінійних розмірів для технічного проєктування, отримане значення $F_{\text{опт.}}$ = 4,86 мм, наближене до нормалізованих значень передбачених рядами R10 та R20, а саме до 4,5; 5,0; 5,6 мм. Значення 5,0 мм є найближчим до розрахованого результату. Такі нормалізовані величини широко використовуються у практиці машинобудування для забезпечення уніфікації компонентів, що спрощує технологічну реалізацію і підвищує економічну ефективність виробництва.

Таким чином, для ЛКЗ діаметром 5 мм та перешкоди зі сплаву 2219 як раціональне значення фокусної відстані приймаємо F_{рац.} = 5,0 мм. Розроблена між глибиною проникнення функціональна залежність фокусною та відстанню (формула (4.7)) дозволяє кількісно оцінити, як саме відхилення від ефективність оптимального значення впливають проникнення на кумулятивного струменя.

4.2.5 Визначення впливу фокусної відстані на глибину проникнення КС ЛКЗ

При проєктуванні піротехнічних СР часто виникає задача розташування ЛКЗ відносно перешкоди, яка має локальні потовщення або виступи (у вигляді ребер жорсткості, фітингів тощо), що схематично зображено як перешкоду змінної товщини (Рис. 4.10) [10].



Рис. 4.10. Схема перешкоди змінної товщини: 1 – ЛКЗ; 2 – перешкода; 3 – детонатор; *F_i* – фокусна відстань ЛКЗ в і-перерізі; *L_i* – глибина проникнення КС в *i*-перерізі; *i* = (1...*n*)

З Рис. 4.10 видно, що зміна товщини перешкоди впливає на значення локальної фокусної відстані (F_i ,) і , як наслідок, на глибину проникнення КС (L_i) у цьому перерізі. Тому практичний інтерес становить можливість прогнозування глибини проникнення КС у довільному *i*-перерізі перешкоди змінної товщини.

Використовуючи розроблену функціональну залежність (4.7), можливо знайти розрахункову (модельну) глибину проникнення ($L_{\text{мод.}}$) для довільного перерізу перешкоди змінної товщини (в межах досліджуваного діапазону параметрів *L*, *F*) [10].

Наприклад, в *i*- перерізі конструкції, де фокусна відстань дорівнює 5 мм, згідно з формулою (4.7), розрахункова глибина проникнення КС становить:

 $L_{\text{MOД.}}(5) = f(5) = -0.1465 \cdot 5^2 + 1.4248 \cdot 5 + 2.7021 = 6.16 \text{ MM.}$

Розрахунок для інших значень фокусної відстані зведено до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Експериментальні та розрахункові значення глибини проникнення КС залежно від фокусної відстані на перешкоді зі сплаву марки 2219

<i>F</i> _{<i>i</i>} , мм	L _{експ.сер.} , мм	L _{мод.<i>i</i>, мм}	Похибка Δ, формула (4.8)	Коефіцієнт <i>k_F</i> , формула (4.9)
1	2	3	4	5
4,1	5,96	6,08	2,05%	0,985
4,2	6,06	6,10	0,79%	0,99
4,3	6,22	6,12	1,55%	0,99
4,4	6,11	6,14	0,50%	1,00
4,5	6,17	6,15	0,32%	1,00
4,6	6,22	6,16	1,00%	1,00
4,7	6,14	6,16	0,31%	1,00
4,8	6,27	6,17	1,65%	1,00
4,9	6,17	6,17	0,10%	1,00
5,0	6,18	6,16	0,20%	1,00
5,1	6,25	6,16	1,42%	1,00
5,2	6,05	6,15	1,67%	1,00
5,3	6,14	6,14	0,02%	1,00
5,4	6,14	6,12	0,33%	0,99
5,5	6,09	6,10	0,31%	0,99
5,6	6,06	6,08	0,39%	0,99
5,7	6,05	6,06	0,17%	0,98
5,8	6,14	6,03	1,79%	0,98
5,9	6,04	6,00	0,51%	0,97
6,0	5,99	5,97	0,25%	0,97
6,1	5,87	5,94	1,19%	0,96
6,2	5,83	5,90	1,23%	0,96
6,3	5,77	5,86	1,51%	0,95
6,4	5,68	5,82	2,47%	0,94
6,5	5,75	5,77	0,22%	0,94
6,6	5,86	5,72	2,40%	0,93
6,7	5,73	5,66	1,16%	0,92
6,8	5,60	5,61	0,13%	0,91
6,9	5,61	5,55	1,18%	0,90

Відносна похибка (Δ) модельного розрахунку порівняно з усередненими експериментальними даними визначається за формулою (4.8). Результати розрахунку наведені в таблиці 4.5 (стовпець 4).

$$\Delta = \left| \left(1 - \left(\frac{L_{\text{MOД.}i}}{L_{\text{експ. сер.}}} \right) \right| \cdot 100.$$
(4.8)

Результати розрахунку по розробленій математичній моделі (4.7) дозволяють встановити для довільного значення фокусної відстані відповідне прогнозоване значення глибини проникнення КС у перешкоду змінної товщини з алюмінієвого сплаву 2219. Як видно з таблиці 4.5, похибка розрахунку в порівнянні з експериментальними значеннями в діапазоні F = 4,1...6,9 мм не перевищує 2,47%.

При проєктуванні СР рекомендується використовувати значення глибини проникнення, отримані розрахунковим шляхом за моделлю (4.7). Це пов'язано з тим, що апроксимована функціональна залежність усуває випадкові похибки («шуми») експерименту, забезпечуючи більш стабільний результат.

Аналіз чутливості глибини проникнення до відхилень фокусної відстані. Отримані результати дозволяють оцінити вплив можливих відхилень фокусної відстані від оптимального значення на глибину проникнення КС. Наприклад, для ЛКЗ діаметром 5 мм встановленого на фокусній відстані ($F_{paq.}$ = 5 мм) розрахункова глибина проникнення КС $L_{mod.}(5) = 6,16$ мм (таблиця 4.5). Якщо припустити, що можливе відхилення при встановленні ЛКЗ (5±0,5) мм, то для нижньої межі (F = 4,5 мм) глибина проникнення КС становить $L_{mod.}(4,5)$ = 6,15 мм, а для верхньої межі (F = 5,5 мм) – $L_{mod.}(5,5) = 6,10$ мм. Це свідчить про відносно низьку чутливість глибини проникнення до невеликих (±10%) відхилень фокусної відстані від раціонального значення.

Кількісна оцінка впливу фокусної відстані. Для кількісної оцінки впливу фокусної відстані розглянемо відношення розрахункової глибини проникнення для довільної фокусної відстані F_i до такої при оптимальній фокусній відстані F_{opt} . Це відношення фактично відповідає коефіцієнту впливу фокусної відстані ЛКЗ (k_F) у формулі (3.23). Тоді, в рамках запропонованого підходу, розрахункова формула для визначення коефіцієнта k_F має вигляд [18]:

$$k_F = \frac{L_{Mod.i}}{L(F_{opt})};$$
(4.9)

де $L(F_{opt})$ – розрахункова глибина проникнення КС при оптимальній фокусної відстані;

L_{мод.i} – розрахункова глибина проникнення КС для довільної фокусної відстані *F_i*.

Для ЛКЗ діаметром 5 мм та сплаву 2219, згідно з отриманою моделлю (4.7) та формулою (4.9), вперше встановлено наступну залежність коефіцієнта впливу фокусної відстані:

$$k_{F_{i,D=5}} = \frac{-0.1465F_n^2 + 1.4248F_n + 2.7021}{-0.1465F_{opt}^2 + 1.4248F_{opt} + 2.7021},$$
(4.10)

Визначимо коефіцієнт впливу фокусної відстані для ЛКЗ діаметром 5 мм для раціональної фокусної відстані та граничних меж дослідженого діапазону F = (4,1; 5,0; 6,9) мм:

$$k_{F(4,1)} = \frac{6,08}{6,17} = 0,985;$$

 $k_{F(5,0)} = \frac{6,16}{6,17} = 1;$
 $k_{F(6,9)} = \frac{5,55}{6,17} = 0,9.$

Таким чином, кількісно оцінено вплив фокусної відстані на ефективність проникнення КС. Наприклад, для фокусної відстані F = 4,1 мм, яка на 18% менша за раціональну, глибина проникнення зменшується на 1,5% від максимальної, а при фокусній відстані F = 6,9 мм, що на 38% більша за раціональну, глибина проникнення зменшується на 10%. Отже, коефіцієнт впливу фокусної відстані в дослідженому діапазоні складає $k_{F(4,1-6,9)} =$ (0,9-1). Детальні значення k_F для різних F_i зведені до таблиці 4.5 (стовпець 5).

4.2.6 Оцінка адекватності математичної моделі

Оцінку адекватності розробленої математичної моделі (формула (4.7) виконано шляхом аналізу залишків [131–133].

Залишками (параметр ΔL) є різниця між усередненими експериментальними значеннями глибини проникнення $L_{cep.}$ та значеннями, розрахованими за моделлю $L_{мод.}$. Залишки визначаються за формулою (4.11):

$$\Delta L = L_{\text{cep.}} - L_{\text{MOZ}}; \tag{4.11}$$

Результати розрахунку залишків (ΔL) для всього діапазону досліджених фокусних відстаней наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Розраховані значення залишків між експериментальними та модельними

<i>Fi</i> , мм	ΔL, мм формула (4.11)	<i>Fi</i> , мм	ΔL, мм формула (4.11)	<i>F</i> _i , мм	ΔL, мм формула (4.11)
4,1	-0,12	5,1	0,09	6,1	-0,08
4,2	-0,05	5,2	-0,10	6,2	-0,08
4,3	0,10	5,3	0,00	6,3	-0,09
4,4	-0,03	5,4	0,02	6,4	-0,14
4,5	0,02	5,5	-0,02	6,5	-0,02
4,6	0,06	5,6	-0,03	6,6	0,13
4,7	-0,02	5,7	-0,01	6,7	0,06
4,8	0,10	5,8	0,11	6,8	-0,02
4,9	0,01	5,9	0,03	6.0	0.06
5,0	0,01	6,0	0,01	0,9	0,06

значеннями глибини проникнення для сплаву 2219

Основні критерії аналізу залишків:

 випадковий розподіл. Залишки повинні випадковим чином коливатися навколо нульового значення без утворення видимих закономірностей.
 Випадковий розподіл свідчить про відсутність систематичних похибок у моделі;

– відсутність трендів. У разі систематичного збільшення чи зменшення залишків із зміною фокусної відстані *F*, це вказує на недоліки моделі або потребу в іншому типі полінома.

Графічний аналіз залишків зображено на Рис. 4.11.



Рис. 4.11. Графік аналізу залишків: *ΔL* – різниця між середніми експериментальними і прогнозованими моделлю значеннями глибини проникнення; *F* – фокусна відстань

Як свідчить аналіз графіка залишків (Рис. 4.11), спостерігається випадковий характер розподілу залишків та відсутність систематичних відхилень чи виражених трендів. Це дозволяє стверджувати, що розроблена математична модель (4.7) адекватно описує експериментальні дані щодо процесу проникнення КС у перешкоду в дослідженому діапазоні. Це також підтверджує обґрунтованість використання полінома другого степеня для апроксимації даної залежності.

Таким чином, результати аналізу залишків підтверджують адекватність отриманої моделі (4.7) Випадковий характер залишків та отриманий коефіцієнт детермінації (R²=0,87), разом із використанням верифікованої методики для отримання вихідних даних, підтверджують надійність функціональної вірогідності розробленої залежності отриманих та усереднених експериментальних даних.

4.3. Експериментальне дослідження глибини проникнення кумулятивного струменю при паралельному розташуванні ЛКЗ

Наступний етап експериментальних досліджень мав на меті визначення характеристик глибини проникнення КС та її варіативності при встановленні

ЛКЗ паралельно до поверхні перешкоди на раціональній фокусній відстані [8]. Така постановка експерименту, по-перше, дозволяє порівняти результати з попередніми дослідами (де ЛКЗ встановлювався під кутом) для оцінки впливу кута нахилу, а по-друге, забезпечує умови для аналізу розкиду глибини проникнення вздовж заряду, викликаного технологічними факторами виготовлення ЛКЗ (визначальними є якість виготовлення КВ та наповнення ВР). Як зазначалося раніше, даний вплив може досягати 30% [36].

4.3.1 Об'єкт дослідження

Схема проведення дослідження згідно з Рис. 2.3. Склад і опис об'єкта випробування відповідають розділу 4.2.1. Відмінність полягає в тому, що ЛКЗ встановлювався паралельно перешкоді на визначеній раніше раціональній фокусній відстані F = 5,0 мм.

ДК, що виготовлена з алюмінієвого сплаву марки 2219 з встановленим ЛКЗ, зображена на Рис. 4.12 [8].



Рис. 4.12. ДК з алюмінієвого сплаву марки 2219 перед випробуванням при паралельному встановленні ЛКЗ [8]

4.3.2 Результати випробувань та їх аналіз

Підготовка зразків та вимірювання глибини проникнення КС здійснювались за методикою, описаною у розділі 2.3.1.

На кожному фрагменті було проведено вимірювання глибини проникнення КС (*L*) вздовж лінії різу перешкоди ЛКЗ з кроком 15 мм між вимірювальними перетинами (Рис. 4.13) [8].



Рис. 4.13. Схема проведення вимірювань на фрагменті (уточнено з[8]): 1 — ЛКЗ; 2 — перешкода; *S* – товщина перешкоди; *L* – вимірюване значення для глибини проникнення КС; (5/20...140) – відстань до вимірювального перетину (*n_i*); *F* – фокусна відстань

Для аналізу використовувалась ділянка перешкоди, на якій забезпечувалось рівномірне проникнення КС; ділянки входу (*X1*) та виходу (*X2*) струменя виключались з аналізу (Рис. 2.10). Було проведено вимірювання глибини проникнення КС у перешкоду в 60 точках (З ДК × 2 фрагменти × 10 вимірювальних точок на фрагмент) [8]. Результати випробувань наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

<i>n.</i> MM	$L_{1.1},$	$L_{1.2},$	$L_{2.1},$	$L_{2.2},$	$L_{3.1},$	L _{3.2} ,	L_{\min} ,	L _{cep} ,	L_{\max} ,
	ММ	ММ	ММ	ММ	ММ	ММ	ММ	ММ	ММ
5	6,62	6,39	6,13	6,5	6,84	5,87	5,87	6,39	6,84
20	6,51	6,68	5,98	6,07	6,74	5,77	5,77	6,29	6,68
35	6,38	6,47	6,01	5,97	6,53	5,5	5,5	6,14	6,53
50	6,34	6,51	6,13	6,17	6,17	5,82	5,82	6,19	6,51
65	6,21	6,43	5,73	5,81	6,48	6,03	5,73	6,12	6,48
80	6,12	6,43	5,88	5,24	6,38	6,19	5,24	6,04	6,43
95	6,25	6,17	6,04	6,07	6,02	5,71	5,71	6,04	6,25
110	6,21	6,3	6,18	5,97	6,01	5,93	5,93	6,1	6,3
125	6,34	6,47	6,28	5,91	6,32	5,39	5,39	6,12	6,47
140	6,38	6,43	6,04	5,41	6,02	5,93	5,41	6,04	6,43
s (<i>L</i> _{<i>i</i>.j})	0,15	0,13	0,16	0,36	0,3	0,24			
S			0,	33			1	-	

Глибина проникнення КС ЛКЗ у алюмінієвий сплав марки 2219, при фокусній відстані 5 мм [8]

<u>Примітка</u>: *L*_{*i,j*} – глибина проникнення КС, де *i* – номер зразка, *j* – номер фрагмента.

В графічному вигляді результати вимірювань глибини проникнення КС представлені на Рис. 4.14, Рис. 4.15.



Рис. 4.14. Глибина проникнення КС в перешкоду зі сплаву марки 2219 на фокусній відстані 5,0 мм [8]: Н – розташування вимірювальних точок вздовж перешкоди; *L* – глибина проникнення КС, мм; *L*_{min}, *L*_{cep}, *L*_{max} – мінімальне, середнє, максимальне значення глибин проникнення КС відповідно; пунктиром позначено усереднене значення для *L*_{cep}.; *L*_{i,j} – точки вимірювання *L* для фрагментів № 1.1-3.2 відповідно



Рис. 4.15. Середнє значення глибини проникнення КС для фрагментів №1.1-3.2

Уточнення мінімального об'єму експериментальних досліджень.

Перевіримо статистичну достатність загального обсягу вимірювань (*n* = 60) для оцінки середньої глибини проникнення з заданою точністю.

Для 60 вимірювань глибини проникнення при фокусній відстані 5 мм, розраховане вибіркове стандартне відхилення становить s = 0,33 мм. Прийнято допустиму похибку оцінки середнього значення глибини проникнення $\delta = 0,25$ мм та довірчу ймовірність $\gamma = 0,90$. Згідно з [115,129] квантиль розподілу Стьюдента $t_{(1+\gamma)/2;f}$ для числа ступенів вільності f = n - 1 = 59 та рівня р = $(1+\gamma)/2=0,95$) дорівнює $t_{0,95;59} = 1,671$. Тоді, за формулою (3.29) мінімально необхідна кількість вимірювань становить:

$$n_{\min} = \left(\frac{1,671.0,33}{0,25}\right)^2 = 4,87.$$

Після округлення в більший бік $n_{\min} = 5$. Оскільки фактична кількість вимірювань n = 60, отримана в результаті випробування трьох ДК, значно перевищує мінімально необхідну ($n_{\min} = 5$), обсяг експериментального дослідження є достатнім для надійної оцінки середньої глибини проникнення з заданою точністю та довірчою ймовірністю 90%.

Аналіз результатів експерименту. Для фрагмента № 1.1 середнє значення глибини проникнення становить 6,34 мм, з мінімальним значенням 6,12 мм та максимальним 6,62 мм. Стандартне відхилення результатів складає 0,15 мм, що свідчить про відносну стабільність параметрів експерименту. Значення для фрагментів (№ 1.2-3.2) наведено у таблиці 4.7.

Середня глибина проникнення на основі всіх 60 вимірюваннях становить $L_{\text{сум.сер.}} = 6,15$ мм (штрихова лінія на Рис. 4.14), з варіацією окремих значень від 5,24 мм до 6,84 мм. Стандартне відхилення s = 0,33 мм [8].

Отримане середнє значення глибини проникнення при паралельному розташуванні ЛКЗ ($L_{\text{сум.сер.}} = 6,15$ мм), добре узгоджується із розрахунковим значенням, отриманим за моделлю (4.7) для F = 5 мм у розділі 4.2.5 (Різниця

становить 0,2 %). Це свідчить про незначний вплив малого кута нахилу ЛКЗ (1,15°) на середні результати проникнення КС та додатково підтверджує валідність розробленої методики «Експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС в перешкоду».

Аналіз варіативності вздовж лінії різу КС. Глибина проникнення КС вздовж лінії різу змінювалася хаотично, без явних тенденцій (Рис. 4.14, Рис. 4.16).



Рис. 4.16. Характер проникнення КС в перешкоду зі сплаву 2219: H – розташування вимірювальних точок вздовж перешкоди; L – глибина проникнення КС, мм; L_{сер.} – середнє значення глибини проникнення КС; пунктиром позначено усереднене значення для L_{сер.}; L_{i.j} – точки вимірювання L для фрагментів № 1.1-3.2 відповідно

Максимальні і мінімальні відхилення глибини проникнення КС від узагальненого середнього значення (6,15 мм) становлять від – 14,8 % до +11,2 %. Це може бути пов'язано рядом технологічних факторів, зокрема [8]:

- нерівномірністю густини та дисперсності ВР вздовж ЛКЗ;
- відхиленнями у геометрії форми кумулятивної виїмки, включно з різнотовщинністю та неспіввісністю КВ;
- неоднорідністю структури матеріалу КВ та перешкоди;

 відхиленнями розмірів при виготовленні кронштейнів, ЛКЗ, а також неточностями під час виконання складальних операцій, що впливає на точність витримування фокусної відстані та орієнтації заряду (наприклад, проворот ЛКЗ навколо своїй вісі).

знижують стабільність КС Розглянуті фактори формування та визначають варіативність його глибини проникнення. Як зазначалося раніше, глибина проникнення КС для заряду, виготовленого за прецизійною точністю, може бути на 30% більша за глибину для заряду, виготовленого за звичайною технологією [36]. Таким чином, результати експерименту опосередковано підтверджують значний вплив технологічних факторів на глибину проникнення КС в перешкоду. Тому при проєктуванні систем розділення необхідно враховувати цю варіативність, з використанням статистичних методів [8].

4.3.3 Оцінка впливу технологічних факторів через визначення нижньої толерантної межі глибини проникнення

Для кількісної оцінки впливу сукупності технологічних та інших збурювальних факторів, що впливають на варіативність процесу проникнення, а саме на мінімально очікувану глибину проникнення визначено нижню межу одностороннього толерантного інтервалу для глибини проникнення КС в перешкоду.

Толерантний інтервал дозволяє з заданою довірчою ймовірністю γ вказати межі, в яких знаходиться задана доля ρ генеральної сукупності. Нижню межу одностороннього толерантного інтервалу визначимо згідно з стандартною методикою [8,134].

Попередньо встановлюється, чи підпорядковується випадкова величина глибини проникнення КС ЛКЗ у перешкоду нормальному закону розподілу. Для цього, за результатами випробувань з таблиці 4.7 для всіх значень *L_{i,j}*, в

програмі LabPlot2 побудовано гістограму (Рис. 4.17). Гістограма показує, що розподіл глибин проникнення КС візуально відповідає нормальному [8].



Рис. 4.17. Гістограма розподілу глибин проникнення КС у перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219 [8]

Додатково належність вибірки до нормального розподілу перевірено за критерієм Девіда-Хартлі-Пірсона, який має вигляд [8,135]:

$$U = \frac{R}{s}, \tag{4.12}$$

де $R = x_{max} - x_{min} - розмах вибірки;$

s – вибіркове стандартне відхилення.

Гіпотеза нормальності приймається, якщо виконується умова [8,135]:

$$U_1(n:\alpha) < U < U_2(n:\alpha), \tag{4.13}$$

де *n* – обсяг вибірки;

 α – рівень значущості (вибираємо α = 0,05).

В нашому випадку: *R* = 6,84 – 5,24 = 1,6 мм; *s*=0,33 мм, а отже:

$$U = 1,6/0,33 = 4,85.$$

Критичні точки беремо з таблиці 75, стр. 259 в [135], вони для n = 60 і α = 0,05 становлять:

$$U_l(60:0,05) = 3,96;$$

$$U_2(60:0,05) = 5,51.$$

Оскільки 3,96 < 4,85 < 5,51, то гіпотеза про нормальність вибірки не відхиляється [8].

Для визначення коефіцієнту, що враховує вплив технологічних факторів, запропоновано наступну **методику:**

1. Розрахувати значення нижнього однобічного толерантного інтервалу для середньої глибини проникнення КС ЛКЗ у перешкоду.

2. Визначити коефіцієнт впливу технологічних факторів, як відношення значення нижньої межі толерантного інтервалу до середнього значення глибини проникнення.

Для нормальності вибірки нижній однобічний толерантний інтервал для глибини проникнення КС ЛКЗ у перешкоду визначається за формулою [8,134]:

$$L_{\text{H.TO,PP.}} = L_{cym.cep.} - k(N;\rho;\gamma) s, \qquad (4.14)$$

де *L*_{сум.сер.} – середнє значення вибірки;

s – оцінка стандартного відхилення;

 $k(N;\rho;\gamma)$ – коефіцієнт, що залежить від об'єму вибірки та величин ρ і γ .

Будемо використовувати наступні значення доля сукупності $\rho = 95\%$ та довірча ймовірність $\gamma = 0.95$. Для цих значень та об'єму вибірки n = 60, знаходимо з [134]:

$$k(60;0,95;0,95) = 2,023.$$

Підставляючи отримані значення у формулу (4.14) маємо [8]:

 $L_{\text{н.толер.}} = 6,15 - 2,023 \cdot 0,33 = 5,48$ мм.

Це означає, що з імовірністю 95% можна стверджувати, що 95% всіх можливих значень глибини проникнення будуть не меншими за 5.48 мм.

Таким чином, отриманий результат дозволяє оцінити гарантовану глибину проникнення КС у перешкоду з урахуванням впливу технологічних факторів та випадкової варіативності (далі вплив технологічних факторів).

(1 1 1)

Для кількісної оцінки цього сукупного впливу та можливості використання отриманого результату в розрахунках (наприклад, для уточненої моделі розрахунку L) запропоновано методику визначення та вперше розраховано напівемпіричний коефіцієнт, що враховує вплив технологічних факторів $k_{\rm T}$, як відношення нижньої толерантної межі до середнього значення глибини проникнення:

$$k_T = \frac{L_{\text{H.TONEP.}}}{L_{\text{CVM.CEP.}}}; \qquad (4.15)$$

Для досліджуваних умов, значення цього коефіцієнта становить:

$$k_T = \frac{5,48}{6,15} = 0,891. \tag{4.16}$$

Це значить, що для практичних розрахунків глибина проникнення КС в перешкоду повинна бути зменшена на 10,9 % відносно середнього значення [8,18].

4.4. Визначення коефіцієнта корекції для розрахунку глибини проникнення КС

Для уточненої формули (3.25) розрахунку глибини проникнення КС у напівнескінченну перешкоду визначимо напівемпіричний коефіцієнт корекції *k*. Цей коефіцієнт призначений для комплексного врахування особливостей процесу проникнення КС, що не охоплюються іншими членами формули (наприклад, вплив міцності та стисливості матеріалів, тривимірні ефекти формування струменя, можливі неточності у визначенні базової довжини струменя.

$$L = kl \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T}} k_F k_T \,. \tag{3.25}$$

У цій формулі коефіцієнти k_F та k_T , що враховують вплив фокусної відстані та технологічних факторів відповідно, були визначені в попередніх підрозділах (формули (4.10) та (4.15)).

Як було запропоновано раніше (формула (3.24)), довжину КС (*l*) для ЛКЗ з напівциліндричною КВ можна оцінити як:

$$l = \frac{\pi d_{\kappa_{\theta}}}{4} \,. \tag{3.24}$$

де $d_{\kappa e}$ – діаметр КВ ЛКЗ, мм;

Підставляючи (3.24) в (3.25), отримаємо:

$$L = k \frac{\pi d_{\kappa_{\theta}}}{4} \sqrt{\frac{\rho_{J}}{\rho_{T}}} k_{F} k_{T}$$
(4.17)

де $d_{\kappa \sigma}$ – діаметр КВ ЛКЗ, мм;

 $\rho_{\rm J}$ і ρ_T – густина матеріалу КС і перешкоди відповідно;

k_F – коефіцієнт, що враховує вплив фокусної відстані, визначається за формулою (4.9);

 k_T – коефіцієнт, що враховує вплив технологічних факторів, визначається за формулою (4.15);

k – коефіцієнт корекції

3 формули (2.10), глибина проникнення КС дорівнює:

$$L_i(F_i) = aF_i^2 + bF_i + c. (2.10)$$

де *a, b, c* – дійсні числа (емпіричні коефіцієнти апроксимації). Тоді,

$$aF_i^2 + bF_i + c = k \frac{\pi d_{\kappa e}}{4} \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T}} k_{F_i} k_T;$$

Остаточно коефіцієнт корекції за наступною запропонованою автором формулою:

$$k = \frac{aF_{i}^{2} + bF_{i} + c}{\frac{\pi d_{\kappa_{\theta}}}{4} \sqrt{\frac{\rho_{J}}{\rho_{T}}} k_{F_{i}} k_{T}}.$$
(4.18)

Визначимо коефіцієнт корекції *k* для ЛКЗ діаметром 5 мм ($d_{\text{кв}} = 2,3$ мм) і перешкоди зі сплаву марки 2219. Згідно з результатами експериментальних досліджень та апроксимації, маємо: a = -0,1465; b = 1,4248; c = 2,7021; $p_J = 8960$ кг/м³ (густина для міді); $p_T = 2840$ кг/м³ (густина сплаву 2219); $F_{opt} = 4,85$ мм. Тоді,

$$k = \frac{-0.1465 \cdot 4.85^2 + 1.4248 \cdot 4.85 + 2.7021}{\frac{3.14 \cdot 2.3}{4} \sqrt{\frac{8960}{2840}} \cdot 1 \cdot 0.89} = 2.16.$$

Приклад розрахунку для ЛКЗ діаметром 5 мм встановленого на фокусній відстані 5 мм (при $k_F = 1$; $k_T = 0,89$).

$$L = 2,16 \cdot \frac{3,14 \cdot 2,3}{4} \sqrt{\frac{8960}{2840}} \cdot 1 \cdot 0,89 = 6,17 \,_{\text{MM}}.$$

Середня глибина проникнення КС у перешкоду напівнескінченної товщини для оптимальної фокусної відстані становить 6,17 мм. Результат експерименту для $L(F_{4,8}) = 6,27$ мм, $L(F_{4,9}) = 6,17$ мм, тоді для $L(F_{4,85}) = \frac{6,27+6,17}{2} = 6,22$ мм. Таким чином точність розрахунку за встановленими напівемпіричними коефіцієнтами для досліджуваних ЛКЗ та перешкоди за формулою (4.17) складає 99,2%.

Таким чином, для досліджуваного ЛКЗ та перешкоди розраховане значення коефіцієнта корекції *k* = 2,16.

Слід зазначити, що формула (4.17) та значення напівемпіричних коефіцієнтів k, k_F , k_T були отримані для конкретного ЛКЗ і матеріалу перешкоди. Для інших типів ЛКЗ або матеріалів перешкод потрібно проводити відповідні дослідження для визначення відповідних параметрів a, b, c та коефіцієнтів k, k_F , k_T .

4.5 Розширення меж застосування отриманих результатів

4.5.1. Аналіз підходу на основі відносних параметрів

З метою розширення меж застосування отриманих експериментальних даних на ЛКЗ інших типорозмірів, проведено аналіз відомих джерел інформації на предмет характеру залежності глибини проникнення КС (товщини прорізання) від діаметра ЛКЗ (таблиця 4.8).

Таблиця 4.8

Ліяметр ЛКЗ мм	Маса ВР г/м	Товщина прорізання перешкоди, мм				
		Алюмінієвий сплав	Магній	Сталь	Титан	
4,2	8,5	8	10,8	4,3	4,20	
5	12,6	10,7	14,8	5,5	5,30	
6	19,7	12,7	18,5	6,7	6,30	
7	29,3	15,3	-	7,9	7,67	
9	46,7	19,2	-	9,7	9,30	

Значення товщини прорізання перешкоди для ЛКЗ-б [23]

Для аналізу побудовано графіки залежності глибини проникнення КС (*L*) від діаметра ЛКЗ (*D*) з використанням лінійної регресії (Рис. 4.18). Це дозволяє оцінити, чи є залежність між *L* та *D* близькою до лінійної.



Рис. 4.18. Залежність товщини прорізання від діаметра ЛКЗ-б (за даними з [23])

Аналіз залежностей товщини прорізання від діаметра ЛКЗ-б (Рис. 4.18) встановив практично лінійну залежність, що підтверджується високими значеннями коефіцієнта детермінації (R²) для різних матеріалів (в межах від 0,973 до 0,996). Це свідчить про можливість апроксимації або лінійної інтерполяції, екстраполяції отриманих експериментальних даних для близьких діаметрів ЛКЗ.

Для прикладу, для алюмінієвого сплаву в таблиці 4.8 рівняння лінійної регресії має вигляд:

$$L_{np.} = f(\mathbf{x}) = 2,292 \ D - 1,125. \tag{4.19}$$

Результати розрахунку за формулою (4.19) наведені в таблиці 4.9. Відхилення між розрахунком та відомими експериментальними даними для діаметрів ЛКЗ від 4,2 до 9 мм знаходиться в діапазоні від 0,57 до 6,27 %.

Таблиця 4.9

Діаметр ПКЗ мм	Maca BP,	Маса ВР, г/м Товщина прорізання пере		Відхилення, %	
	1 / 191	Експеримент	Розрахунок		
4,2	8,5	8	8,50	6,27	
5	12,6	10,7	10,34	3,41	
6	19,7	12,7	12,63	0,57	
7	29,3	15,3	14,92	2,49	
9	46,7	19,2	19,50	1,58	

Товщина прорізання перешкоди з алюмінієвого сплаву (за даними з [23])

Підхід до екстраполяції результатів, наведений в [31], базується на використанні відносних параметрів *L/D* та *F/D* (Рис. 3.2). З метою аналізу застосовності даного підходу проведено перевірку на відомих експериментальних даних для ЛКЗ-б діаметром 5 мм (таблиця 4.8). Розраховані відношення *L/D* для алюмінієвого сплаву та сталі склали

10,7 / 5 = 2,14 та 5,5 / 5 = 1,1. Далі ці коефіцієнти використано для розрахунку *L* для інших діаметрів. Результати аналізу наведені в таблиці 4.10. Відхилення розрахунку для діаметрів ЛКЗ від 5 до 9 мм для алюмінієвого сплаву становить до 2,09 %, а для діаметра 4,2 мм – 12,35 %.

Таблиця 4.10

Діаметр	Maca	Товщина прорізання перешкоди, мм					
ЛКЗ, BP,		Алюмінієвий сплав			Сталь		
	17 141	Експеримент	Розрахунок	Відхилення, %	Експеримент	Розрахунок	Відхилення, %
4,2	8,5	8	8,99	12,35	4,3	4,62	6,00
5	12,6	10,7	10,70	0,00	5,5	5,50	0,00
6	19,7	12,7	12,84	1,10	6,7	6,60	0,95
7	29,3	15,3	14,98	2,09	7,9	7,70	3,26
9	46,7	19,2	19,26	0,31	9,7	9,90	2,58

Значення товщини прорізання перешкоди для ЛКЗ-б (за даними з [23])

<u>Примітка:</u> розрахункові значення отримані за відношенням L/D, де D = 5 мм

Аналогічно, за відношенням *F/D*, розрахованим для D = 5,5 мм за даними з таблиці 3.3 (*F/D* = 1,27) проведено аналіз прогнозування *F* для інших діаметрів: відхилення розрахованих значень фокусних відстаней для ЛКЗ діаметром 7 мм становить 0,01 %, для ЛКЗ діаметру 4,2 мм – 14,5 %.

Збільшена похибка для малих діаметрів ЛКЗ пояснюється наближенням до критичного діаметра детонації, нижче якого поширення детонації зарядом стає неможливим [31].

Таким чином, підхід на основі відносних параметрів (*L/D*, *F/D*) з задовільною точністю можна використовувати для оцінки параметрів найближчих номенклатурних рядів ЛКЗ від того, для якого ці відношення були визначені експериментально.

4.5.2. Прогнозування параметрів для ЛКЗ інших діаметрів для сплаву 2219

Використовуючи значення глибини проникнення (L = 6,16 мм) та фокусної відстані ($F_{opt} = 4,86$ мм), за результатами експериментального дослідження ЛКЗ діаметром D = 5 мм на перешкоді зі сплаву 2219 (розділі 4.2), розраховано відношення L/D, F/D, що склали 1,232 і 0,97 відповідно. Отримані орієнтовні параметри фокусної відстані і глибини проникнення отримані за встановленими відношеннями наведені в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11

Орієнтовні значення оптимальної фокусної відстані і глибини проникнення КС для перешкоди з алюмінієвого сплаву 2219

Діаметр ЛКЗ	F _{opt}	L
4,5	4,37	5,54
5	4,85	6,16 ¹
5,5	5,34	6,78
7	6,79	8,62 (8,9 ¹)

Примітка: 1 – значення отримано експериментально

Для оцінки адекватності отриманих результатів проведено додаткове контрольне випробування ЛКЗ діаметром 7 мм на перешкоді з алюмінієвого сплаву 2219 товщиною 20 мм, при фокусній відстані *F* від 6 до 7 мм. Глибина проникнення становила від 8,9 до 9,3 мм, в середньому 8,9 мм. Розрахункове значення $L_{posp.}(D=7) = 1,232 \cdot 7 = 8,62$ мм. Відхилення розрахункового значення в порівнянні з експериментальним склала 3,1%. Це підтверджує прийнятну точність екстраполяції за відносними параметрами, зокрема для ЛКЗ діаметром 7 мм.

4.5.3. Прогнозування параметрів для ЛКЗ інших діаметрів для сплаву АМг6

Аналогічно, використовуючи значення L = 9,10 мм та $F_{opt} = 5,81$ мм за результатами експериментального дослідження ЛКЗ діаметром D = 5 мм на перешкоді зі сплаву АМг6 (розділі 4.1) отримані відношення *L/D*, *F/D* склали 1,82 і 1,162 відповідно. Отримані орієнтовні параметри оптимальної фокусної відстані і глибини проникнення КС наведені в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12

Орієнтовні значення оптимальної фокусної відстані і глибини проникнення КС для перешкоди з алюмінієвого сплаву АМг6

Діаметр ЛКЗ	${m F}_{ m opt}$	L
4,3	5,00	7,83
4,5	5,23	8,19
5,0	5,81	9,10 ¹
5,5	6,39	10,01
7,0	8,13	12,74
8,0	9,30	14,56

Примітка: 1 – значення отримано експериментально

Проведений аналіз та контрольний експеримент показали, що використання відносних параметрів L/D та F/D, визначених для базового діаметра D = 5 мм, дозволяє з задовільною точністю прогнозувати оптимальну фокусну відстань та глибину проникнення для ЛКЗ близьких діаметрів (наприклад, в діапазоні від 4,3 до 8 мм) для досліджених алюмінієвих сплавів (2219, АМг6).

Висновки за розділом 4

За результатами експериментального визначення фокусної відстані і глибини проникнення КС ЛКЗ у напівнескінченну перешкоду зроблено такі висновки:

1. Розроблену методику експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС в перешкоду верифіковано експериментальноаналітичним способом на перешкоді з алюмінієвого сплаву марки АМг6. Отримані результати для ЛКЗ діаметром 5 мм (оптимальна фокусна відстань $F_{opt} = 5,81$ мм, максимальна середня глибина проникнення КС L = 9,1 мм) відомими задовільно узгоджуються 3 джерелами інформації та (відносна похибка до 4,5 %). розрахунковими оцінками Додатковим підтвердженням валідності методики є встановлений незначний вплив кута нахилу (1,15°) на середню глибину проникнення для сплаву 2219 (розбіжність з результатами отриманими при паралельному розташуванні ЛКЗ становить 0,2%).

2. Вперше розроблено математичну модель, що описує залежність середньої глибини проникнення КС ЛКЗ (діаметром 5 мм з напівциліндричною КВ) від фокусної відстані (*F*) у напівнескінченну перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219. Модель дозволяє прогнозувати глибину проникнення КС в діапазоні фокусних відстаней від 4,1 до 6,9 мм.

3. Визначено оптимальну фокусну відстань ($F_{opt} = 4,86$ мм), обґрунтовано раціональну ($F_{pau} = 5,0$ мм) для ЛКЗ діаметром 5 мм з напівциліндричною КВ при проникненні КС у перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219.

4. Встановлено, що при паралельному розташуванні ЛКЗ діаметром 5 мм з напівциліндричною КВ на раціональній фокусній відстані ($F_{\text{рац.}} = 5,0$ мм) КС проникає у перешкоду з алюмінієвого сплаву 2219 на глибину в діапазоні від 5,24 мм до 6,84 мм. Середня глибина проникнення за результатами 60 вимірювань становить 6,15 мм.

5. Розраховано значення напівемпіричного коефіцієнта впливу фокусної відстані k_F на глибину проникнення КС, який для досліджуваних фокусних відстаней в діапазоні від 4,1 до 6,9 мм для ЛКЗ діаметром 5 мм та сплаву 2219 знаходиться в діапазоні від 0,9 до 1.

6. Запропоновано методику визначення напівемпіричного коефіцієнта $k_{\rm T}$, що враховує вплив технологічних факторів, як відношення нижньої толерантної межі до середнього значення глибини проникнення. Визначено його значення для ЛКЗ діаметром 5 мм при проникненні КС у перешкоду зі сплаву 2219, що дорівнює $k_{\rm T} = 0,89$.

7. Визначено значення коефіцієнта корекції k для комплексного врахування інших фізичних ефектів (неточностей у визначенні ефективної довжини КС, тривимірності формування КС, впливу міцності та стисливості матеріалів тощо). Для ЛКЗ діаметром 5 мм та перешкоди зі сплаву 2219 визначено k = 2,16.

8. Встановлено близький до лінійного характер залежності глибини проникнення (L) від діаметра ЛКЗ (D) та обґрунтовано можливість використання відносних параметрів (L/D та F/D) для прогнозування характеристик ЛКЗ близьких типорозмірів. На основі експериментальних даних для ЛКЗ діаметром 5 мм розраховано орієнтовні значення F_{opt} та L для діаметрів від 4,5 до 7 мм для сплаву 2219. Відхилення розрахункового значення глибини проникнення для ЛКЗ діаметром 7 мм від отриманого від експериментальним способом складає 3,1%.

Отримані результати: математична модель, значення напівемпіричних коефіцієнтів k, k_F , k_T розповсюджується на ЛКЗ діаметром 5 мм з напівциліндричною КВ, що діють на перешкоду зі сплаву 2219 та можуть бути використані для проєктування відповідних систем розділення.

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗДІЛЕННЯ БАГАТОШАРОВОЇ ПЕРЕШКОДИ ЛІНІЙНИМ КУМУЛЯТИВНИМ ЗАРЯДОМ

5.1 Постановка задачі дослідження прорізання багатошарової перешкоди ЛКЗ для забезпечення її розділення

Досліджується практична задача розділення елементу конструкції, що досягається прорізанням багатошарової перешкоди КС ЛКЗ. Перешкода складається з металевого шару з алюмінієвого сплаву марки 2219 та двох шарів спеціального багатофункціонального покриття.

Задача зводиться до визначення раціонального типорозміру ЛКЗ, що забезпечує гарантоване розділення багатошарової перешкоди шляхом її прорізання кумулятивним струменем з мінімальними енергетичними витратами. Це дозволяє підвищити ефективність СР та знизити ударні навантаження на елементи конструкції. Методик визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для прорізання багатошарових перешкод на основі розрахункового способу в проаналізованих джерелах інформації не знайдено, що підкреслює наукову новизну та практичну значущість даної роботи.

Основним завданням цього розділу є розробка методики визначення раціонального типорозміру ЛКЗ з урахуванням впливу фокусної відстані.

Межі застосування розроблюваної методики: методика орієнтована на дослідження прорізання тришарової перешкоди із зазначених матеріалів, в діапазоні типорозмірів ЛКЗ від 4,3 до 8 мм та фокусних відстаней від 4,1 до 6,9 мм. Товщина першого (основного) шару перешкоди обирається меншою за глибину проникнення КС в аналогічну напівнескінченну перешкоду, що забезпечує його гарантоване прорізання та зводить задачу до аналізу процесу прорізання наступних шарів. Методика може бути застосована для аналогічних перешкод, але потребує додаткової верифікації для інших типів багатошарових конструкцій та ЛКЗ.

Припущення, що прийняті для спрощення математичного моделювання та аналізу процесу прорізання багатошарової перешкоди ЛКЗ

Для спрощення математичного моделювання та аналізу процесу прорізання багатошарової перешкоди ЛКЗ в даній роботі прийнято наступні припущення:

1. Припущення про моделювання багатошарової перешкоди як однорідного матеріалу еквівалентної товщини;

2. Припущення про двофазний характер процесу прорізання матеріалу перешкоди;

3. Припущення про лінійну залежність швидкості КС від глибини проникнення для перешкод малої товщини (умовно до 20 мм).

Прорізання багатошарової перешкоди КС є складним комплексним процесом, що залежить від багатьох факторів: типу і кількості ВР (енергії продуктів детонації), форми КВ ЛКЗ, фокусної відстані, фізико-механічних властивостей матеріалу перешкоди та КС, впливу продуктів детонації, ударнохвильових навантажень, відкольного ефекту тощо. «При цьому для повного динаміки зіткнення необхідно враховувати тіл. опису форму ЩО співударяються, поширення пружних, пластичних і ударних хвиль, гідродинамічну течію матеріалів, кінцеві деформації, теплові ефекти, вплив тертя, виникнення і поширення зон руйнування» [47], а «точність отримуваних результатів не гарантується через складність правильного опису поведінки матеріалів в умовах, що реалізуються при зіткненні [47]».

Враховуючи відсутність відомих аналітичних моделей проникнення КС у багатошарові перешкоди та значну складність математичного моделювання через багатофакторний впливу численних взаємопов'язаних чинників, в даній роботі для вирішення поставленої задачі вперше запропоновано концепцію еквівалентної товщини. Багатошарова перешкода моделюється як однорідна перешкода еквівалентної товщини, що визначається за правилом адитивності з урахуванням густини, міцності та товщини матеріалу шарів перешкоди.

Адитивність – властивість величин, яка полягає в тому, що значення величини, яка відповідає цілому об'єкту, дорівнює сумі значень величин, що відповідають його частинам, незалежно від того, яким чином поділено об'єкт і незалежно від природи об'єкту [136,137].

Таке спрощення дозволяє звести задачу до аналізу прорізання однорідної перешкоди. При цьому слід зазначити, що поняття еквівалентної товщини не повною мірою враховує складні хвильові процеси в багатошаровій структурі та міжшарову взаємодію, що є обмеженням даного підходу, але вважається достатнім для оцінки на початкових етапах розробки.

На основі аналізу макроструктури матеріалу перешкоди зі сплавів 2219 та АМґб після проникнення КС (таблиці 4.1, 4.3), а також з урахуванням теоретичних уявлень про вплив швидкості на глибину проникнення КС [32,36], обмежень гідродинамічної теорії на швидкостях проникнення КС ЛКЗ [31] та класифікації режимів деформування матеріалів в залежності від швидкості співудару [47], процес прорізання однорідного матеріалу (еквівалентної перешкоди) розглядається як двофазний (Рис. 5.1). Даний висновок випливає з аналізу дії КС на структуру матеріалу перешкоди, де чітко спостерігається модель руйнування з двофазним механізмом прорізання перешкоди.

Перша фаза характеризується переважно гідродинамічним механізмом проникнення кумулятивного струменя, оскільки швидкість проникнення КС ЛКЗ на початковому етапі знаходиться в діапазоні 1000-3000 м/с, для якого, згідно з даними наведеними в таблиці 5.1, характерна гідродинамічна поведінка матеріалів. Визначальним параметром у цій фазі є густина [32,33,47].



Рис. 5.1. Макроструктура матеріалу перешкоди після проникнення КС: а – сплав марки 2219; б – сплав марки АМг6; *L1, L2* – перша і друга фази прорізання відповідно; червоними стрілками вказана межа міжфазного переходу

Таблиця 5.1

Швидкість	Швидкість	Властивості (поведінка) матеріалу		
співудару, м/с	деформації, с-1			
< 50 10^{0}		Переважають пружні деформації. Можлива поява		
× 50	10	зони локалізації		
50500	102	Переважають пластичні деформації		
5 00 1000 10 ⁴		Прояв в'язкопластичних і в'язких властивостей.		
5001000	10	Міцність матеріалу залишається значною		
1000 2000	105	Гідродинамічна поведінка твердих тіл.		
10003000	10	Визначальний параметр – густина		
300012000	106	Необхідно враховувати стисливість		
> 12000	108	Випаровування матеріалу		

Властивості матеріалів в залежності від умов співудару [47]

Швидкість КС ЛКЗ на початку проникнення в перешкоду визначається за формулою [31]:

$$U = V_c \left(\frac{\rho_{\rm T}}{\rho_J} + 1\right)^{-0.5},\tag{5.1}$$

де V_c – швидкість КС;

 $\rho_{\rm J}$ і ρ_T – густина металу КС і перешкоди відповідно.

Розрахуємо швидкість КС ЛКЗ на початку проникнення в перешкоду зі сплаву марки 2219 (U_{2219}) і марки АМг6 (U_{AMr6}), приймаючи $V_c = (2200 + 3500) / 2 = 2850$ м/с:

$$U_{2219} = 2850 \left(\frac{2840}{8960} + 1\right)^{-0.5} = 2483 \text{ m/c};$$
$$U_{AM26} = 2850 \left(\frac{2640}{8960} + 1\right)^{-0.5} = 2504 \text{ m/c}.$$

Друга фаза, що починається після сповільнення КС до швидкостей нижче 1000 м/с, характеризується проявом в'язко-пластичних, пластичних, пружних властивостей матеріалу. Це пов'язано зі зменшенням швидкості КС під час його проникнення в матеріал перешкоди, визначальним параметром стає міцність матеріалу перешкоди [47].

За результатами експериментального дослідження (розділ 4), визначено товщину матеріалу, що прорізається КС в межах першої фази для алюмінієвих сплавів 2219 і АМг6, результати наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Товщина матеріалу, що прорізається КС ЛКЗ діаметром 5 мм в межах першої фази для алюмінієвих сплавів 2219 і АМг6

Na dharwanty	Товщина матеріалу фази <i>L1</i> , мм				
ле фрагменту	Сплав 2219	Сплав АМг6			
1.1	3,21	5,2			
1.2	3,12	5,19			
2.1	3,25	5,46			
2.2	3,86	5,58			
3.1	4,39	5,15			
3.2	3,61	5,23			
Середнє значення	3,57	5,3			

Розрахуємо швидкість КС на межі міжфазного переходу для досліджених в розділі 4 перешкод. Перед цим проведемо аналіз залежності швидкості проникнення КС від глибини проникнення. Експериментальну залежність для перешкоди з алюмінію, за даними [138] (графік 2) від швидкості проникнення наведено на Рис. 5.2.



Рис. 5.2. Розподіл швидкості проникнення КС за глибиною в перешкоду з алюмінію (побудовано за експериментальною кривою (2) в межах глибини проникнення від 0 до 20 мм за [138])

Для подальших розрахунків, зважаючи на дані, представлені на Рис. 5.2 (які показують близьку до лінійної залежність на ділянці проникнення від 0 до 20 мм), та з метою спрощення аналітичних залежностей, в роботі приймається припущення про лінійну залежність швидкості КС від глибини проникнення в межах першого шару (для товщин до 20 мм). Це дозволяє отримати аналітичні залежності для оцінки швидкості КС на різних глибинах проникнення. Тоді, використовуючи рівняння прямої лінії [113,139], швидкість проникнення до точки між фазного переходу $V(L_{\rm MII})$ визначається як:

$$V(L_{\rm MII}) = \mathbf{m} \cdot L_{\rm MII} + V_0; \tag{5.2}$$

$$\mathbf{m} = (V_{\kappa} - V_0) / (L_{\kappa} - L_0), \tag{5.3}$$

де: $V(L_{\text{мп}})$ – швидкість на глибині міжфазного переходу $L_{\text{мп}}$; m – нахил прямої;

*V*₀, *V*_к – швидкість КС на початку і в кінці проникнення;

 L_0 , L_{κ} – глибина проникнення КС на початку і в кінці процесу.

Для перешкоди зі сплаву марки 2219: глибина $L_0 = 0$ мм, $L_{\kappa} = 6,15$ мм (отримано в розділі 4.3.2); швидкість $V_0 = 2483$ м/с, $V_{\kappa} = 0$ м/с. Тоді швидкість КС на межі міжфазного переходу ($L_{\text{мп}} = L1 = 3,57$ мм) становить:

$$V(L_{\rm MII}) = -403,74 \cdot L + 2483;$$
(5.4)
$$V(3,57) = -403,74 \cdot 3,57 + 2483 = 1041,6 \text{ m/c}.$$

Для перешкоди зі сплаву марки АМг6: глибина $L_0 = 0$ мм, $L_{\kappa} = 9,1$ мм (отримано в розділі 4.1.2); швидкість $V_0 = 2504$ м/с, $V_{\kappa} = 0$ м/с. Тоді швидкість КС на межі міжфазного переходу ($L_{\text{мп}} = L1 = 5,3$ мм) становить:

$$V(L_{\rm MII}) = -275,16 \cdot L + 2504;$$
(5.5)
$$V(5,28) = -275,16 \cdot 5,3 + 2504 = 1045,6 \text{ M/c}.$$

Отримані розрахункові значення швидкостей КС на межі міжфазного переходу (1041,6 та 1045,6 м/с), розраховані за експериментальними значеннями глибини першої фази проникнення для сплавів марки 2219 та АМг6, добре узгоджуються з теоретичною межею (~1000 м/с), наведеною в таблиці 5.1 (відхилення становить до 4,56 %), що свідчить про обґрунтованість припущення про двофазний режим проникнення.

На двофазному режимі прорізання перешкоди базуються формули (3.20), (3.21), (3.22), що для зручності наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Формули розрахунку товщини прорізання КС, що базуються на двофазному режимі [23,37]

№ п.п.	Формула	Номер формули
1	$\frac{L}{l_0} = \left(1 - \frac{d_0}{l_0}\right) \sqrt{\frac{\rho_{02}}{\rho_{01}}} + 2,42 \cdot \frac{d_0}{l_0} \sqrt{\frac{\rho_{02} u_0^2}{H_1}}$	(3.20)
2	$L_{\rm np} = 100d \left(\frac{u_{\rm H}^{-2}}{\rho \sigma_{\rm B}}\right) (1 + \varepsilon)$	(3.21)
3	$L_{\rm mp} = 100 d \cdot \left(\frac{u_{\rm H}}{\rho \cdot \sigma_{\rm B}}\right)^{\frac{1}{2}} (1 + \varepsilon)$	(3.22)

Такий поділ на фази дозволяє врахувати зміну механізму руйнування матеріалу на різних етапах проникнення та поєднати аналітичні методи гідродинамічної теорії з проявом в'язко-пластичних, пластичних та пружних властивостей матеріалу на менших швидкостях проникнення.

Таким чином, зроблені вище припущення про моделювання багатошарової перешкоди як однорідної перешкоди еквівалентної товщини; лінійну залежність швидкості КС від глибини проникнення (на ділянці, що розглядається); про двофазний характер процесу прорізання матеріалу перешкоди є обґрунтованими та використані для подальшої розробки методики.

5.2. Аналіз механізму руйнування перешкоди

Схема процесу прорізання КС ЛКЗ багатошарової перешкоди кінцевої товщини, представлена на Рис. 5.3.



Рис. 5.3 Схема процесу прорізання КС ЛКЗ багатошарової перешкоди кінцевої товщини: КС – кумулятивний струмінь; ПД – продукти детонації; *L1, L2* – перша і друга фази прорізання відповідно; S₁, S₂, S₃ – товщина матеріалу 1-го, 2-го та 3-го шарів перешкоди відповідно; 4 – зона з крайовими руйнуваннями від дії ПД; а, б – випадок, коли другий шар матеріалу прорізається в межах однієї фази (*L2*) та в межах двох фаз (*L1, L2*) відповідно

Вигляд структури багатошарової перешкоди, що складається з металевого шару з алюмінієвого сплаву марки 2219 та двох шарів спеціального теплозахисного покриття після повного прорізання КС наведено на Рис. 5.4.



Рис. 5.4. Структура багатошарової перешкоди, після повного прорізання КС ЛКЗ: а, б – поперечний та поздовжній види на лінію різу КС відповідно

Для багатошарової перешкоди загальною товщиною S, що складається з *n* шарів товщиною S_1 , S_2 , S_3 з різними фізико-механічними характеристиками, загальна товщина прорізання $L_{np.}$ визначається як сума товщин прорізання кожного шару:

$$L_{np.} = \sum_{i=1}^{n} L_{i} , \qquad (5.6)$$

де *n* – кількість шарів матеріалу у перешкоді.

Товщина першого (основного) шару перешкоди S_1 , згідно з прийнятими межами вирішення задачі, обирається меншою за глибину проникнення КС L в аналогічну напівнескінченну перешкоду, що забезпечує його гарантоване прорізання та зводить задачу до аналізу процесу прорізання наступних шарів.

$$S_1 \le L. \tag{5.7}$$

Методику визначення величини L розглянуто в розділі 4.

Формування значної кількості продуктів детонації, зумовлене швидким фазовим переходом ВР, створює ударну хвилю, яка поширюється в усі
сторони. Ударна хвиля генерує високі градієнти тиску, що викликають інтенсивну механічну взаємодію з середовищем, призводячи його до руйнування. Слідом за ударною хвилею діє високий тиск газів детонації, який спричиняє додатковий поступальний рух частинок середовища [41].

Унаслідок комбінованого впливу ударної хвилі та тиску газів у зоні, прилеглій до ЛКЗ, утворюються області з інтенсивними напруженнями. Максимальні напруження спостерігаються в безпосередній близькості до ЛКЗ, поступово зменшуючись із віддаленням.

Схему механічного впливу вибухового навантаження у необмеженому середовищі наведено на Рис. 5.5.



Рис. 5.5. Схема механічної дії вибухового навантаження в необмеженому середовищі [41,140]: 1 – заряд ВР; 2 – зона витискання; 3 – зона руйнації; 4 – зона небезпечного струсу

За [41,140], області інтенсивного напруження від вибуху умовно поділяються на три основні зони:

Зона витискання – область максимальної концентрації напружень, де середовище зазнає значного ущільнення [41,140]. Цей режим певною мірою

аналогічний умовам першої, переважно гідродинамічної, фази проникнення КС в перешкоду.

Зона руйнації – область, що оточує зону витискання. Напруження в цій зоні є значно нижчими, проте достатніми для руйнування матеріалу на окремі уламки та його розпушення (розшарування) [41,140]. Процеси руйнування в цій зоні відповідають характеру другої фази проникнення КС (де домінуючим параметром є міцність).

Зона небезпечного струсу – область за межами зони руйнації, у межах якої відбуваються тільки коливання середовища [41,140].

З аналізу формул (3.21), (3.22) витікає, що на глибину проникнення, аналогічно класифікації наведеній в таблиці 5.1, впливають швидкість КС u_{μ} (що є фактором ЛКЗ); густина ρ , межа міцності при розтягуванні матеріалу перешкоди $\sigma_{\rm B}$ і (за наявності) відносна глибина відколу на тильній стороні перешкоди ε (що є факторами перешкоди).

Характер руйнування першого шару (алюмінієвий сплав 2219) товщиною 5 мм багатошарової перешкоди, наведений на Рис. 5.6, має ознаки утворення відкольних тріщин, при цьому ознаки завершеного процесу відколу (повного відокремлення шару) не спостерігаються.



Рис. 5.6. Макроструктура алюмінієвого сплаву марки 2219, після прорізання КС: 1, 2 – дефекти в матеріалі у вигляді зародкових тріщин відколу, які виникають під дією розтягувальних напружень; 2 – зона прилегла до наступного шару БФП

В роботі [141] досліджено формування відкольних тріщин в алюмінієвому сплаві марки 1561 в умовах ударного навантаження, характер руйнування (Рис. 5.7) аналогічний спостережуваному на Рис. 5.6.





Рис. 5.7. Елементи відкольної тріщини в сплаві 1561 [141]: а, б – при швидкості співудару 244 та 643 м/с відповідно

Таким чином, на основі проведеного аналізу механізмів руйнування встановлено, що для розробки розрахункової моделі еквівалентної товщини багатошарової перешкоди (з урахуванням припущення про повне прорізання першого металевого шару s_1) визначальними параметрами для наступних шарів (s_2 , s_3) є густина ρ і межа міцності при розтягуванні матеріалу $\sigma_{\rm B}$. Хоча в першому металевому шарі спостерігаються ознаки зародкового відколу (Рис. 5.6), цей механізм не є характерним для композиційних матеріалів, тому при моделюванні їхньої стійкості до прорізання основна увага приділяється густині та міцності.

5.3 Визначення еквівалентної товщини багатошарової перешкоди

Еквівалентна товщина багатошарової перешкоди – це розрахункова товщина однорідного матеріалу (у нашому випадку матеріалу першого шару), який чинить аналогічний опір проникненню КС, що й задана багатошарова структура. Іншими словами, багатошарова структура перешкоди умовно замінюється однорідною, товщина якої забезпечує такий самий кінцевий

результат при прорізанні, як і реальна сукупність шарів з різними механічними властивостями.

Виходячи з гідродинамічній теорії проникнення КС в перешкоду, можна припустити, що відношення $\sqrt{\rho_J / \rho_T}$ є ваговим коефіцієнтом впливу на глибину проникнення КС. Це випливає з наступного: якщо матеріали КС та перешкоди будуть однаковими, то відношення густин дорівнює одиниці. Тоді, внесок густини *i*-го шару в еквівалентну товщину масштабується за формулою:

$$s_{e_{KG.}}(\rho_i) = s_i \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_1}}, \qquad (5.8)$$

де *s*_i – товщина *i*-го шару матеріалу перешкоди, м;

 ρ_1, ρ_i – густина першого та *i*-го шару матеріалу перешкоди, кг/м³

Для оцінки впливу міцності матеріалу перешкоди на процес прорізання КС розглянемо аналогію зі статичним навантаженням. Нехай маємо лист матеріалу товщиною *s* з межею міцності при розтягуванні $\sigma_{\rm B}$. Якщо на нього діє сила *F* і лист її витримує, це означає, що напруження в матеріалі не перевищують $\sigma_{\rm B,1}$. Якщо ж взяти матеріал із більшою міцністю $\sigma_{\rm B,2} > \sigma_{\rm B,1}$, для витримування тієї ж сили *F* його товщину можна зменшити.

Аналіз формули (3.22) показує, що вплив параметрів густини та міцності при розтягуванні матеріалу перешкоди на товщину прорізання підпорядковується кореневій залежності. Тоді, внесок міцності при розтягуванні *i*-го шару в еквівалентну товщину масштабується за формулою:

$$S_{\text{eKB.}}(\sigma_{e,i}) = s_i \sqrt{\frac{\sigma_{e,i}}{\sigma_{e,1}}}, \qquad (5.9)$$

де *s*_i – товщина *i*-го шару матеріалу перешкоди, м;

 $\sigma_{{\scriptscriptstyle \mathrm{B}},1,}\sigma_{{\scriptscriptstyle \mathrm{B}},i}-$ границя міцності першого та *i*-го шару матеріалу перешкоди

У випадку, коли *i*-й шар матеріалу багатошарової перешкоди прорізається у двох фазах (Рис. 5.36), необхідно враховувати внесок опору

матеріалу в кожній фазі. Для цього вводяться вагові коефіцієнти k_i та m_i , які характеризують відносну частку товщини шару, що прорізається в першій (густино-залежній) та другій (міцно-залежній) фазі відповідно.

Визначення еквівалентної товщини багатошарової перешкоди виконується за наступною новою формулою:

$$S_{\text{\tiny eKB.}} = s_1 + \sum_{i=2}^n \left(k_i \cdot s_i \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_1}} + m_i \cdot s_i \sqrt{\frac{\sigma_{e,i}}{\sigma_{e,1}}} \right), \tag{5.10}$$

де k_i – ваговий коефіцієнт, що відповідає частці прорізання і-го шару в першій фазі;

m_i – ваговий коефіцієнт, що відповідає частці прорізання і-го шару в другій фазі;

 $\sigma_{\rm B.1,} \sigma_{\rm B.i}$ – межа міцності матеріалу першого та *i*-го шару перешкоди.

*s*₁, *s*_i – товщина першого та *i*-го шару матеріалу перешкоди, м;

 ρ_1, ρ_i – густина матеріалу першого та *i*-го шару відповідно, кг/м³;

n – загальна кількість шарів перешкоди

Для композитних матеріалів із анізотропією властивостей, для консервативної оцінки в розрахунках за формулою (5.10) рекомендується використовувати показник міцності $\sigma_{e,i}$, що відповідає напрямку з найбільшим опором руйнуванню

Якщо *i*-й шар руйнується переважно в рамках першої фази прорізання, тоді $k_i = 1, m_i = 0$; якщо в рамках другої фази, тоді $k_i = 0$, а $m_i = 1$.

У випадку змішаного режиму прорізання 2-го шару (коли розрахункова межа між фазами знаходиться всередині шару) значення *k_i* та *m_i* для цього шару визначаються за наступними новими формулами:

$$k_{i=2} = \frac{L1 - s_1}{s_2}; \tag{5.11}$$

$$m_{i=2} = \frac{s_2 - (L1 - s_1)}{s_2}; \tag{5.12}$$

Аналогічно, у випадку змішаного режиму прорізання 3-го шару значення k_i та m_i для цього шару визначаються за наступними новими формулами:

$$k_{i=3} = \frac{L1 - s_1 - s_2}{s_3}; \tag{5.13}$$

$$m_{i=3} = \frac{s_3 - (L1 - s_1 - s_2)}{s_3}; \tag{5.14}$$

5.4 Методика визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для гарантованого розділення багатошарової перешкоди

Глибина проникнення КС в перешкоду є комплексною функцією багатьох параметрів, включаючи енергетичні характеристики ВР, геометрію та матеріал КВ, що визначають параметри КС (наприклад, його довжину). При проектуванні СР для заданої перешкоди, вибір зазвичай здійснюється з нормованого ряду ЛКЗ, які маючи подібну конструкцію та тип ВР, відрізняються передусім своїм типорозміром (діаметром). Для таких ЛКЗ діють закони подібності: енергія заряду, маса ВР, ключові параметри КС та, як наслідок, товщина прорізання (L_{np}) масштабуються пропорційно до його діаметру (D). Це знаходить відображення і в напівемпіричних формулах (3.21) та (3.22), де глибина прорізання пропорційна діаметру ЛКЗ.

Отже, головним параметром оптимізації СР на основі ЛКЗ є визначення його раціонального типорозміру (діаметра), що є важливою науковопрактичною задачею.

Основні умови

Для забезпечення гарантованого розділення перешкоди кумулятивним струменем необхідно виконання умови [23]:

$$L_{\rm np} > S, \tag{(5.15)}$$

(1 7)

де *L*_{пр} – товщина прорізання перешкоди КС, мм;

S – загальна товщина перешкоди, мм.

Аналогічно, багатошарова перешкода приведена до еквівалентної товщини однорідного матеріалу прорізається, вважається прорізаною, якщо розрахункова глибина проникнення L перевищує еквівалентну товщину $S_{e\kappa e.}$. Враховуючи відсутність завершеного відколу в першому шарі досліджуємих матеріалів, умова надійного прорізання визначається уточненою нерівністю:

$$L > S_{ekr}, \tag{5.16}$$

де *L* – глибина проникнення КС у напівнескінченну перешкоду з матеріалу першого шару багатошарової перешкоди, мм;

*S*_{екв} — еквівалентна товщина перешкоди багатошарової перешкоди, мм.

Значення для глибини проникнення в напівнескінченну перешкоду на оптимальній фокусній відстані, вибираються з таблиці 4.11 (для сплаву 2219), таблиці 4.12 (для сплаву АМг6). При розміщені ЛКЗ на довільній фокусній відстані, при визначенні глибини проникнення L_F враховується коефіцієнт впливу k_F :

$$L_F = L \cdot k_F, \tag{5.17}$$

де k_F – коефіцієнт впливу фокусної відстані (формула (4.9)).

Оскільки *L* є функцією від діаметра ЛКЗ *D* (формула (1.1)), тоді умова, що дозволяє обрати найменший можливий типорозмір із нормованого ряду, який ефективно прорізає еквівалентну товщину перешкоди, набуде вигляду:

$$L = f(D) > S_{e_{KB}}, \text{ при } D \to min$$
(5.18)
де D – типорозмір (діаметр) ЛКЗ з нормованого ряду

Після попереднього вибору типорозміру ЛКЗ за умовою (5.18), необхідно перевірити виконання нерівності умови гарантованого розділення (5.15) шляхом експериментального підтвердження факту повного прорізання перешкоди. Отже, **методика визначення раціонального типорозміру** ЛКЗ, складається з наступних кроків:

1. Визначення еквівалентної товщини перешкоди. Привести товщину багатошарової перешкоди до еквівалентної товщини матеріалу першого (основного) шару матеріалу за формулою (5.10).

2. Попередня оцінка раціонального типорозміру ЛКЗ. Вибрати найменший типорозмір ЛКЗ (D) із нормованого ряду, для якого виконується умова $L > S_{\text{екв}}$ (формула (5.16)). Для визначення L використовувати дані з таблиць 4.11 та 4.12, з урахуванням впливу фокусної відстані.

3. Перевірка умови повного прорізання багатошарової перешкоди. Перевірити, чи виконується умова $L_{np} > S$ (формула (5.15)) шляхом експериментального підтвердження факту повного прорізання перешкоди обраним ЛКЗ. Якщо умова виконана, обраний типорозмір вважається раціональним. Якщо ні, перейти до наступного більшого типорозміру із нормованого ряду та повторити пункт 3. Необхідний об'єм випробувань визначається вимогами до показників надійності.

MICIOSOIT EXCEL (FUC).0).					
Ввести:				Розрахунов	c:	
Номер шару матеріалу	S і, мм	ρ i, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв, ММ	9,59	
Шар матеріалу №1	5	2640	320	<i>k i</i> =2	0,076	
Шар матеріалу №2	5	1800	200	<i>m i</i> =2	0,924	
Шар матеріалу №3	5	340	1.47	Чи вілбулет	ъся прорізан	ня

Для розрахунку за даною методикою розроблено програму в середовищі Microsoft Excel (Рис. 5.8).

Рис. 5.8. Програма «Оцінка умови прорізання тришарової перешкоди ЛКЗ»

7.29

5,38

Глибина L, мм

Товщина фази 1, L1, мм

L > Sекв

умова

Висновок: НІ

В ліву частину програми вводяться вхідні дані, необхідні для розрахунку. В правій частини виконується розрахунок. В полі «Висновок» програма автоматично встановлює, чи очікується (за розрахунком) прорізання перешкоди. Можливі дві відповіді «Так» або «Ні». Програма дозволяє вести розрахунок пошарово (для перевірки прорізання окремого шару перешкоди), для цього необхідно товщину шару, що не враховується задати нулем.

5.5. Верифікація методики визначення раціонального типорозміру ЛКЗ

Верифікацію методики проведено на прикладі двох різних тришарових перешкод, що прорізалися КС ЛКЗ різних діаметрів.

Підтвердження моделі експериментальним способом на перешкоді №1 у якої перший шар з алюмінієвого сплаву марки АМґ6, другий з склотекстоліту СТ-1, третій з технічного повстю. Перешкода має наступні характеристики для кожного шару: товщина шарів $s_1 = 5$ мм, $s_2 = 5$ мм, $s_3 = 6,5$ мм; міцність на розтягнення $\sigma_{B1} = 320$ МПа; $\sigma_{B2} = 200$ МПа; $\sigma_{B3} = 1,47$ МПа, густина $\rho_1 = 2640$ кг/м³, $\rho_2 = 1800$ кг/м³, $\rho_3 = 340$ кг/м³; товщину першої фази L1=5,3 мм. Використовувались ЛКЗ діаметром D = (4,5; 5; 7) мм, що встановлювались на фокусній відстані F = D. Коефіцієнти впливу фокусної відстані $k_{F=D} = 0,985$. Коефіцієнти впливу першої та другої фази для 2-го шару: $k_{i=2} = 0,06$ та $m_{i=2} = 0,094$ (визначені за формулами (5.11), (5.12)); для 3-го шару: $k_{i=3} = 0$ та $m_{i=3} = 1$.

Розрахуємо коефіцієнт впливу фокусної відстані для ЛКЗ діаметром 5 мм, встановленого на фокусній відстані *F* = 5 мм для перешкоди зі сплаву АМг6 за формулою (4.9):

$$k_{F=5} = \frac{L_{MOd.i}}{L(F_{opt})} = \frac{-0,1958 \cdot 5^2 + 2,276 \cdot 5 + 2,483}{9,1} = \frac{8,96}{9,1} = 0,985.$$

Оскільки у всіх розглянутих випадках для перешкоди №1 ЛКЗ встановлювалися на фокусній відстані F = D, то приймається $k_{F=D} = 0,985$ для всіх варіантів.

Глибина проникнення в напівнескінченну перешкоду (АМг6) на оптимальній фокусній відстані для ЛКЗ діаметром 4,5; 5; 7 мм становить 8,19; 9,1; 12,74 мм (таблиця 4.12).

Тоді, з врахуванням впливу фокусної відстані глибина проникнення для даних ЛКЗ становить:

 $L_{\rm JIK3-4,5} = 8,19 \cdot 0,985 = 8,07$ MM; $L_{\rm JIK3-5} = 9,1 \cdot 0,985 = 8,96$ MM; $L_{\rm ЛK3-7} = 12,74 \cdot 0,985 = 12,55$ мм.

Розрахунки еквівалентної товщини та перевірка умови прорізання для ЛКЗ діаметром 4,5; 5; 7 мм наведені на Рис. 5.9, Рис. 5.10, Рис. 5.11 відповідно.

Ввести:				Розрахунон	c:	
Номер шару матеріалу	S і, мм	р і, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв, ММ	8,96	
Шар матеріалу №1	5	2640	320	k i=2	0,060	
Шар матеріалу №2	5	1800	200	<i>m i=2</i>	0,940	
Шар матеріалу №3		340	1,47	Чи відбудеться прорізання		
				умова	L > Sекв	
Глибина L, мм	8,07			Висновок:	HI	
Товщина фази 1, L1, мм	5,3					
			a			

•			

Ввести:				Розрахунов			
Номер шару матеріалу	S і, мм	ρ i, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв, ММ	9,70		
Шар матеріалу №1	5	2640	320	<i>k i</i> =2	0,060		
Шар матеріалу №2	5	1800	200	<i>m i</i> =2	0,940		
Шар матеріалу №3	6,5	340	1,47	Чи відбудеться прорізання			
				умова	L > Sекв		
Глибина L, мм	8,07			Висновок:	HI		
Товщина фази 1, L1, мм	5,3						
			б				

Рис. 5.9. Розрахунок для перешкоди № 1, що прорізається ЛКЗ діаметром 4,5 мм: а, б – розрахунок шарів $(s_1 + s_2)$ та $(s_1 + s_2 + s_3)$ відповідно

Ввести:				Розрахунов	c:		
Номер шару матеріалу	S і, мм	ρ i, кг/м ³	σв.і, МПа	S екв, ММ	8,96		
Шар матеріалу №1	5	2640	320	k i=2	0,060		
Шар матеріалу №2	5	1800	200	<i>m i</i> =2	0,940		
Шар матеріалу №3		340	1,47	Чи відбудеться прорізання			
				умова	L > Sекв		
Глибина L, мм	8,96			Висновок:	HI		
Товщина фази 1, L1, мм	5,3						

			a				
Ввести:	ести: Розрахунок:						
Номер шару матеріалу	S і, мм	р і, кг/м ³	σв.і, МПа		S екв, ММ	9,70	
Шар матеріалу №1	5	2640	320		<i>k i</i> =2	0,060	
Шар матеріалу №2	5	1800	200		<i>m i=2</i>	0,940	
Шар матеріалу №3	6,5	340	1,47		Чи відбудет	ься проріза	ння
					умова	L > Sекв	
Глибина L, мм	8,96				Висновок:	HI	
Товщина фази 1, L1, мм	5,3						
			б				

Рис. 5.10. Розрахунок для перешкоди № 1, що прорізається ЛКЗ

діаметром 5 мм: а, б – розрахунок шарів $(s_1 + s_2)$ та $(s_1 + s_2 + s_3)$ відповідно

Ввести:				Розрахунов	c:	
Номер шару матеріалу	S i, мм	ρ i, кг/м ³	σв.і, МПа	S екв, ММ	8,96	
Шар матеріалу №1	5	2640	320	<i>k i</i> =2	0,060	
Шар матеріалу №2	5	1800	200	<i>m i=2</i>	0,940	
Шар матеріалу №3	0	340	1,47	Чи відбудет	ъся проріза	ання
				умова	L > Sекв	
Глибина L, мм	12,55			Висновок:	ТАК	
Товщина фази 1, L1, мм	5,3					

			a			
Ввести:				Розрахунов	:	
Номер шару матеріалу	S і, мм	ρ i, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв, ММ	9,70	
Шар матеріалу №1	5	2640	320	<i>k i</i> =2	0,060	
Шар матеріалу №2	5	1800	200	<i>m i</i> =2	0,940	
Шар матеріалу №3	6,5	340	1,47	Чи відбудет	ься проріза	ання
				умова	L > Sекв	
Глибина L, мм	12,55			Висновок:	ТАК	
Товщина фази 1, L1, мм	5,3					
			6			

Рис. 5.11. Розрахунок для перешкоди № 1, що прорізається ЛКЗ діаметром 7 мм: а, б – розрахунок шарів (*s*₁ + *s*₂) та (*s*₁ + *s*₂ + *s*₃) відповідно

Таблиця 5.4

<u>№</u> пп	Діаметр ЛКЗ мм	Пошаровий аналіз	<i>L</i> , мм	S _{екв} , мм	Прорізання перешкоди («так/ні»)		Примітка
		unumy			Розрахунок	Експеримент	
1	15	$s_1 + s_2$	8,07	8,96	Hi	Hi	Розрахунок
1	4,5	$s_1 + s_2 + s_3$	8,07	9,7	Hi	Hi	на Рис. 5.9
2	5	$s_1 + s_2$	8,96	8,96	Hi	Hi	Розрахунок
2	5	$s_1 + s_2 + s_3$	8,96	9,7	Hi	Hi	на Рис. 5.10
3	7	$s_1 + s_2$	12,55	8,96	Так	Так	Розрахунок
5	/	$s_1 + s_2 + s_3$	12,55	9,7	Так	Так	на Рис. 5.11

Верифікація методики на перешкоді №1

Висновок – результати розрахунку (прогноз прорізання) співпадають з експериментом в 6 випадках з 6 для перешкоди №1.

Підтвердження моделі здійснено експериментально на перешкоді №2, що складалася з трьох шарів: першого – з алюмінієвого сплаву марки АМґ6, другого – з ПКМ №1 із покриттям на основі скляних мікросфер, і третього – з ПКМ №2 із покриттям на основі кремнеземних і скловолоконних матеріалів. Перешкода має наступні характеристики: товщина шарів $s_1 = 5$ мм, $s_2 = 4,5$ мм, $s_3 = 7$ мм; міцність на розтягнення $\sigma_{в1} = 320$ МПа; $\sigma_{в2} = 0,8$ МПа; $\sigma_{в3} = 471$ МПа; густина $\rho_1 = 2640$ кг/м³, $\rho_2 = 340$ кг/м³, $\rho_3 = 1800$ кг/м³. Товщина першої фази для першого шару L1=5,3 мм. Використовувались ЛКЗ діаметром D = (4,3; 7; 8) мм, що встановлювались на фокусній відстані F=D. Коефіцієнти впливу фокусної відстані $k_{F=D} = 0,985$. Коефіцієнти впливу першої та другої фази для 2-го шару: $k_{i=2} = 0,06$ та $m_{i=2} = 0,094$ (визначені за формулами (5.11), (5.12)); для 3-го шару: $k_{i=3} = 0$ та $m_{i=3} = 1$.

Глибина проникнення в напівнескінченну перешкоду для ЛКЗ діаметром D = (4,3;7;8) мм становить 7,83; 12,74; 14,56 мм (таблиця 4.12).

 $L_{\rm ЛK3-4,3}$ = 7,83·0,985 = 7,71 мм; $L_{\rm ЛK3-7}$ = 12,74·0,985 = 12,55 мм; $L_{\rm ЛK3-8}$ = 14,56 ·0,985 = 14,34 мм. Розрахунки еквівалентної товщини та перевірка умови прорізання для ЛКЗ діаметром 4,3; 7; 8 мм наведені на Рис. 5.12, Рис. 5.13, Рис. 5.14 відповідно.

Ввести:				Розрахунов		
Номер шару матеріалу	S і, мм	ρ i, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв, ММ	5,32	
Шар матеріалу №1	5	2640	320	k i=2	0,067	
Шар матеріалу №2	4,5	340	0,8	<i>m i=2</i>	0,933	
Шар матеріалу №3		1800	471	Чи відбудет	ься проріза	ання
				умова	L > Sекв	
Глибина L, мм	7,71			Висновок:	ТАК	
Товщина фази 1, L1, мм	5,3					

			a			
Ввести:				Розрахунов		
Номер шару матеріалу	S і, мм	ρ i, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв, ММ	13,41	
Шар матеріалу №1	5	2640	320	k i=2	0,067	
Шар матеріалу №2	4,5	340	0,8	<i>m i</i> =2	0,933	
Шар матеріалу №3	7	1800	471	Чи відбудет	ъся проріза	ання
				умова	L > Sекв	
Глибина L, мм	7,71			Висновок:	HI	
Товщина фази 1, L1, мм	5,3					
			б			

Рис. 5.12. Розрахунок для перешкоди № 2, що прорізається ЛКЗ діаметром 4,3 мм: а, б – розрахунок шарів $(s_1 + s_2)$ та $(s_1 + s_2 + s_3)$ відповідно

Ввести:				Розрахунов	c:	
Номер шару матеріалу	S і, мм	ρ i, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв, ММ	5,32	
Шар матеріалу №1	5	2640	320	k i=2	0,067	
Шар матеріалу №2	4,5	340	0,8	<i>m i</i> =2	0,933	
Шар матеріалу №3		1800	471	Чи відбудет	ъся проріза	ання
				умова	L > Sекв	
Глибина L, мм	12,55			Висновок:	ТАК	
Товщина фази 1, L1, мм	5,3					

			a				
Ввести:				Розрахунок:			
Номер шару матеріалу	S і, мм	ρ і, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв, ММ	13,41		
Шар матеріалу №1	5	2640	320	k i=2	0,067		
Шар матеріалу №2	4,5	340	0,8	<i>m i</i> =2	0,933		
Шар матеріалу №3	7	1800	471	Чи відбудет	Чи відбудеться прорізання		
				умова	L > Sекв		
Глибина L, мм	12,55			Висновок:	HI		
Товщина фази 1, L1, мм	5,3						
			б				

Рис. 5.13. Розрахунок для перешкоди \mathbb{N} 2, що прорізається ЛКЗ діаметром 7 мм: а, б – розрахунок шарів ($s_1 + s_2$) та ($s_1 + s_2 + s_3$) відповідно

Ввести:				Розрахунок:		
Номер шару матеріалу	S і, мм	р і, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв, ММ	5,32	
Шар матеріалу №1	5	2640	320	k i=2	0,067	
Шар матеріалу №2	4,5	340	0,8	<i>m i</i> =2	0,933	
Шар матеріалу №3		1675	471	Чи відбудеться прорізання		
				умова	L > Sекв	
Глибина L, мм	14,34			Висновок:	ТАК	
Товщина фази 1, L1, мм	5,3					
			a			

Ввести:]	Розрахунок	:	
Номер шару матеріалу	S і, мм	р і, кг/м ³	σ в.і, МПа		S екв, ММ	13,41	
Шар матеріалу №1	5	2640	320	j	k i=2	0,067	
Шар матеріалу №2	4,5	340	0,8	1	<i>m i=2</i>	0,933	
Шар матеріалу №3	7	1675	471	١	Чи відбудеться прорізання		
					умова	L > Sекв	
Глибина L, мм	14,34]	Висновок:	ТАК	
Товщина фази 1, L1, мм	5,3						
			б				

Рис. 5.14. Розрахунок для перешкоди № 2, що прорізається ЛКЗ діаметром 8 мм: а, б – розрахунок шарів (*s*₁ + *s*₂) та (*s*₁ + *s*₂ + *s*₃) відповідно

Результати експерименту та розрахунків наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

<u>№</u>	Діаметр ЛКЗ мм	Пошаровий аналіз	<i>L</i> , мм	S _{екв} , мм	Прорізання перешкоди («так/ні»)		Примітка
					Розрахунок	Експеримент	
1	43	$s_1 + s_2$	7,71	5,32	Так	Так	Розрахунок
1 7,5	1,5	$s_1 + s_2 + s_3$	7,71	13,41	Hi	Hi	на Рис. 5.12
2	7	$s_1 + s_2$	12,55	5,32	Так	Так	Розрахунок
2 /	,	$s_1 + s_2 + s_3$	12,55	13,41	Hi	Hi	на Рис. 5.13
3	8	$s_1 + s_2$	14,34	5,32	Так	Так	Розрахунок
		$s_1 + s_2 + s_3$	14,34	13,41	Так	Так	на Рис. 5.14

Верифікація методики на перешкоді №2

Висновок – результати розрахунку співпадають з експериментом в 6 випадках з 6 для перешкоди №2.

Таким чином, методика визначення раціонального типорозміру ЛКЗ успішно підтверджена (верифікована) експериментальним способом на двох типах багатошарових перешкод з використанням ЛКЗ різних діаметрів D = (4,3; 4,5; 5; 7; 8). Результати розрахунку співпадають з експериментом в 12 випадках з 12.

5.6. Визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для багатошарової перешкоди на основі розробленої методики

5.6.1. Попередня оцінка раціонального типорозміру ЛКЗ розрахунковим способом

Об'єкт дослідження для розрахунку – багатошарова перешкода, у якої перший шар з алюмінієвого сплаву марки 2219, другий з БФП № 1, третій з покриття БФП № 2. Перешкода має наступні характеристики кожного шару: товщина шарів $s_1 = 5$ мм, $s_2 = 3,5$ мм, $s_3 = 8$ мм; міцність на розтягнення $\sigma_{в1} =$ 436,4 МПа; $\sigma_{в2} = 0,8$ МПа; $\sigma_{в3} = 5$ МПа; густина $\rho_1 = 2840$ кг/м³, $\rho_2 = 475$ кг/м³, $\rho_3 = 1650$ кг/м³. Використовувались ЛКЗ діаметром D = (4,5; 5; 7) мм, що встановлювались на фокусній відстані F = D. Товщина між фазного переходу L1=3,57 мм. Коефіцієнти впливу фокусної відстані $k_{F=D} = 1$. Коефіцієнти впливу першої та другої фази: $k_{i=2,3} = 0$, $m_{i=2,3} = 1$. Глибина проникнення в напівнескінченну перешкоду для ЛКЗ діаметрами 4,5; 5; 7 мм становить 5,54; 6,16; 8,9 мм відповідно (таблиця 4.11).

Розрахунок. Розрахунки для ЛКЗ діаметром 4,5; 5; 7 мм виконані в розробленій програмі «Оцінка умови прорізання тришарової перешкоди ЛКЗ» (наведені на Рис. 5.15).

Ввести:				Розрахунов	:	
Номер шару матеріалу	S і, мм	ρ i, кг/м ³	σв.і, МПа	S екв, ММ	6,01	
Шар матеріалу №1	5	2840	436,4	<i>k i</i> =2	0,000	
Шар матеріалу №2	3,5	475	0,8	<i>m i=2</i>	1,000	
Шар матеріалу №3	8	1650	5	Чи відбудеться прорізання		
				умова	L > Sекв	
Глибина L, мм	5,54			Висновок:	HI	
Товщина фази 1, L1, мм	0					

a

Ввести:				Розрахунок:			
Номер шару матеріалу	S і, мм	ρ і, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв, ММ	6,01		
Шар матеріалу №1	5	2840	436,4	<i>k i</i> =2	0,000		
Шар матеріалу №2	3,5	475	0,8	<i>m i</i> =2	1,000		
Шар матеріалу №3	8	1650	5	Чи відбудет	Чи відбудеться прорізання		
				умова	L > Sекв		
Глибина L, мм	6,16			Висновок:	ТАК		
Товщина фази 1, L1, мм	0						

Ввести:				Розр	ахуно	к:	
Номер шару матеріалу	S і, мм	р і, кг/м ³	σ в.і, МПа	S екв	, MM	6,01	
Шар матеріалу №1	5	2840	436,4	<i>k i</i> =2		0,000	
Шар матеріалу №2	3,5	475	0,8	<i>m i</i> =2		1,000	
Шар матеріалу №3	8	1650	5	Чив	Чи відбудеться прорізання		
				умон	за	L > Sекв	
Глибина L, мм	8,9			Вис	ювок:	ТАК	
Товщина фази 1, L1, мм	0						
			D				

Рис. 5.15. Розрахунок для багатошарової перешкоди у якої перший шар сплав 2219: а, б, в – розрахунок для ЛКЗ діаметром 4,5; 5; 7 мм відповідно

За результатами проведеного розрахунку встановлено, що багатошарова перешкода товщиною 16,5 мм, у якої перший шар з алюмінієвого сплаву марки 2219, другий з покриття БФП №1, третій з покриття БФП №2 еквівалентна гомогенній перешкоді з алюмінієвого сплаву 2219 товщиною 6,01 мм та перерізається ЛКЗ діаметром 5 і 7 мм. При цьому глибина проникнення КС для ЛКЗ діаметром 7 мм більша за еквівалентну товщину на 48%, а для ЛКЗ

діаметром 5 мм – на 2,5%. ЛКЗ діаметром 4,5 мм багатошарову перешкоду не перерізає.

У відповідності до формули (5.18), для експериментального підтвердження обирається ЛКЗ діаметром 5 мм.

5.6.2. Експериментальне підтвердження раціонального типорозміру ЛКЗ

Об'єкт дослідження для експерименту. Об'єкт випробувань складався з наступних компонентів: ЛКЗ з мідною оболонкою діаметром 5 мм з напівциліндричною КВ, наповнений ВР (гексогеном 11,5 г/м); багатошарової перешкоди, у якої перший шар з алюмінієвого сплаву марки 2219, другий з БФП № 1, третій з покриття БФП № 2 (характеристики кожного шару: $s_1 = 5$ мм, $s_2 = 3,5$ мм, $s_3 = 8$ мм, $\sigma_{в1} = 436,4$ МПа, $\sigma_{в2} = 0,8$ МПа, $\sigma_{в3} = 5$ МПа, $\rho_1 = 2840$ кг/м³, $\rho_2 = 475$ кг/м³; $\rho_3 = 1650$ кг/м³); кронштейнів для кріплення ЛКЗ; електродетонатору.

Критерієм підтвердження раціональності обраного типорозміру ЛКЗ є факт повного прорізання перешкоди КС.

Схема проведення дослідження аналогічна наведеній на Рис. 2.3, при цьому ЛКЗ встановлювався паралельно перешкоді на фокусній відстані 5 мм. Склад і опис об'єкта випробування відповідають описаним у розділу 4.2.1. Відмінність полягає в тому, що ЛКЗ встановлювався на досліджуваній багатошаровій перешкоді. ДК, з встановленим ЛКЗ зображено на Рис. 5.16.



Рис. 5.16. ДК з багатошаровою перешкодою

Таблиця 5.6

Результат прорізання багатошарової перешкоди	I ЛКЗ ($D = 5$ мм, $F = 5$ мм)
--	---------------------------------

№ зразку	Перша сторона ДК	Друга сторона ДК	Прорізання перешкоди («так/ні»)
1			так
2			так
3			так
4			так

<u>Примітка</u> – Зображено результати досліджень № 1-4.

Експериментальне дослідження проведено на 12 дослідних конструкціях. У всіх 12 випадках зафіксовано повне прорізання (розділення) багатошарової перешкоди. Це підтверджує визначений раціональний типорозмір ЛКЗ діаметром 5 мм на основі розробленої методики.

Аналіз макро- та мікроструктури перешкоди після прорізання

Макроструктура багатошарової перешкоди після її прорізання КС зображена на Рис. 5.17.



Рис. 5.17. Макроструктура багатошарової перешкоди після її прорізання КС: *L1* – товщина першої фази; *L2* – товщина другої фази; 1.1 – зона входу КС у металевий шар; 1.2 – середня зона металевого шару; 1.3 – зона виходу КС з металевого шару; 2.1 – шар БФП №1; 3.1 – зона входу КС у шар БФП №2; 3.2 – зона виходу КС з шару БФП №2

СЕМ-зображення мікроструктури, що отримані за допомогою сканувального електронного мікроскопа Phenom Pro, наведено на Puc. 5.18. Аналіз мікроструктури (Puc. 5.18) дозволяє детально розкрити механізми руйнування кожного шару багатошарової перешкоди [94,95].

У зоні 1.1 аналіз мікроструктури сплаву 2219 показав, що поверхня різу відносно чиста, без явних тріщин. Спостерігаються локальні кратери (Рис. 5.18, 1.1 (260х)), утворення яких пов'язане з інтенсивним специфічним імпульсним навантаженням, високими локальними напруженнями стиснення та деформацією матеріалу безпосередньо від впливу кумулятивного струменю.

У зоні 1.2 спостерігається формування затверділого оплаву із ознаками аморфної структури (Рис. 5.18, 1.2 (5700х)), що виникає через локальне плавлення та швидку кристалізацію металу під впливом високих температур і тиску від КС. Високі напруження стиснення та інтенсивна зсувна деформація сприяють течії металу без ознак тріщин, що свідчить про домінування



Рис. 5.18. Мікроструктура багатошарової перешкоди після її прорізання КС: 1.1-3.2 зони багатошарової структури відповідно до Рис. 5.17

процесів руйнування в рамках гідродинамічної теорії. При цьому більш інтенсивні кратери вказують на суттєву взаємодію кумулятивного струменя з металом (Рис. 5.18, 1.2 (260х)).

У зоні 1.3 (виходу КС з металевого шару) спостерігаються ознаки в'язкопластичного руйнування у вигляді розтягнення металу поперек лінії проникнення та початкова стадія формування тріщин відколу, завершеної стадії відколу не спостерігається. Аналіз ділянки матеріалу з покроковим збільшенням (Рис. 5.18, 1.3 (260x, 820x, 5700x, 16000x)) виявив, що тріщини мають фрактальну структуру з характерними ознаками міжкристалічного руйнування. Це свідчить про закономірний хвильовий характер їхнього поширення під дією пікових напружень розтягування. Параметри тріщини: товщина від 1 до 20 µm, довжина по кордонам зерен кристалічної решітки.. Утворення тріщин в зоні 1.3 зумовлено зміною характеру напруженодеформованого стану: якщо в зонах 1.1 та 1.2 переважає руйнування матеріалу під дією переважно напружень стиснення в рамках гідродинамічної теорії, то в зоні 1.3 на додаток до цього спостерігається деформація (розтягування матеріалу) під дією залишкових напружень та хвиль розвантаження, що відбиваються від вільної поверхні. Накопичення дислокацій на границях зерен під дією цих напружень призводить зародження та до поширення міжкристалітних тріщин, при цьому завершеної стадії відколу не спостерігається. Перший шар перешкоди прорізається КС повністю.

У зоні 2.1 аналіз мікроструктури спеціального покриття БФП №1 показав його пористу структуру, яка складається з безлічі клітин, розділених тонкими перегородками. Під дією КС, внаслідок деформацій (стиснення пор та розтягування/згину перегородок) під дією локальних напружень, відбувається руйнування з утворенням тріщин, розміри яких становлять від 20 до 150 µm (Рис. 5.18, 2.1(255х)). Другий шар перешкоди прорізається КС повністю.

У зонах 3.1, 3.2 аналіз мікроструктури спеціального покриття БФП №2 показав крихке руйнування його волокон (Рис. 5.18, 3.1(255х), 3.2(5700х)). Характер руйнування є типовим для композиційних матеріалів, що зазнають ударного навантаження. Руйнування волокон відбувається як шляхом їх розриву (під дією напружень розтягування), так і через втрату зв'язку між волокнами та матрицею (через зсувні та відривні напруження на межі розділу фаз). У зоні 3.2 додатково спостерігається розпушення структури матеріалу (Рис. 5.18, 3.2(255х, 330х)). Цей ефект, ймовірно, зумовлений впливом продуктів детонації, що вириваються з зони проникнення КС та створюють додаткові напруження і деформації, свідчить про наявність достатнього залишкового запасу кінетичної енергії струменю для повного прорізання перешкоди. **Третій шар перешкоди прорізається КС повністю**.

Таким чином, аналіз мікроструктури багатошарової перешкоди підтверджує складність механізмів її руйнування (гідродинамічна течія, в'язкопластична деформація та руйнування, зародження відкольних тріщин у металі під дією напружень розтягування, крихке руйнування та розпушення в шарах БФП внаслідок комплексної напружено-деформованої взаємодії), та факт повного розділення всіх шарів матеріалу перешкоди ЛКЗ діаметром 5 мм.

5.6.3 Випробування на макеті корпусного відсіку нової розробки

Оцінка мінімального об'єму експериментальних досліджень

Оцінку мінімального об'єму безвідмовних випробувань для підтвердження заданої надійності проведено при збільшеному навантаженні за методом Босса [23,115,125]. Нехай необхідно підтвердити імовірність безвідмовної робити $P \ge 0,99995$ при рівні довіри $\gamma = 0,9$. Для розрахунку прийнято номінальну фокусну відстань $Q_{експл.} = 5$ мм; фокусну відстань при проведенні випробування $Q_{випроб.} = 6$ мм; максимально допустиму (граничну) фокусну відстань $R_{max} = 6,5$ мм; $\gamma = 0,90$. Вибір R_{max} пояснюється тим, що при фокусній відстані F = 6,5 мм, глибина проникнення становить $L_{F=6,5} = 5,77$ мм (таблиця 4.5), яка в свою чергу менша за розраховану еквівалентну товщину перешкоди (S_{ekb} = 6,01 мм). З таблиці 60 в [126] значення квантилю функції нормального розподілу u_p , що відповідає $\Phi(u_p) = 0,99995$ становить 3,90. Для обраних даних результати розрахунку для відповідних *n*, що забезпечують надійність 0,9995 наведено в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

n	2	3	4	5			
X	0,48	0,1	-0,15	-0,33			
$Q_{ m eкспл.}$	5	5	5	5			
$Q_{ m випр.}$	6	6	6	6			
R _{max}	6,5	6,5	6,5	6,5			
$\sigma_{\scriptscriptstyle R,\gamma}$	0,198413	0,172414	0,15873	0,15015			
\overline{R}	5,904762	5,982759	6,02381	6,04955			
$u_{\underline{P}}$	3,648	4,885714	5,733333	6,354545			
$u_{\underline{P}=0,9999519}$	3,9						

Результати розрахунку об'єму експериментальних досліджень при збільшеній фокусній відстані

Результати розрахунку показують, що мінімальним об'ємом експериментальних досліджень при збільшеній фокусній відстані (F = 6 мм) є три випробування.

Експериментальне підтвердження раціонального типорозміру ЛКЗ з заданою надійністю

Працездатність СР, оснащеної визначеним за розробленою методикою ЛКЗ діаметром 5 мм, підтверджено експериментальними випробуваннями на макеті корпусного відсіку нової розробки, при чому три із них проведені згідно методу Босса на збільшеній фокусній відстані при ($Q_{випроб.} \ge 6$ мм).

Процес розділення наведено на Рис. 5.19.





0,38 c 0,72 c 1,07 c 1,93 c

Рис. 5.19. Процес розділення макету корпусного відсіку (знято за допомогою високошвидкісної камери Casio EX-F1 (600FRPS)

Результати випробувань підтверджують успішне розділення макету корпусного відсіку в 5 випробуваннях з 5.

Оцінка надійності. Отже, в дисертаційній роботі досліджена практична задача розділення елементу конструкції корпусного відсіку нової розробки, що складається з металевого шару з алюмінієвого сплаву марки 2219 та двох шарів спеціального багатофункціонального покриття. Проведено 12 успішних випробувань з 12 на ДК №2 та 5 успішних випробувань з 5 на макеті корпусного відсіку нової розробки.

Таким чином, проведено 17 успішних випробувань з 17. Це дозволяє визначити ймовірність безвідмовної роботи за формулою (3.30), яка при рівні надійності *у* =0,9 складає:

$$H_{H} = P(A_{i}) = \sqrt[17]{1 - 0,9} = 0,873.$$

204

За методом Босса оціночна ймовірність безвідмовної роботи складає не менше 0,9999519.

Оцінка підвищення ефективності. На початкових етапах проєктування було попередньо вирішено використовувати ЛКЗ діаметром 7 мм. Проведене дослідження дозволило обґрунтувати можливість зменшення його типорозміру до діаметру 5 мм.

Для оцінки отриманого результату скористаємось підходом до оцінки ефективності ЛКЗ за формулою [31]:

$$E = L / m_{BP}.$$
 (5.19)

де *L* – глибина проникнення КС у перешкоду;

m_{BP} – наважка вибухової речовини

У випадку СР в РКТ, де визначальним критерієм працездатності є повне перерізання перешкоди, для порівняльної оцінки різних типорозмірів ЛКЗ доцільно використовувати показник приведеної ефективності. З врахуванням особливостей розробленої методики (використання еквівалентної товщини), формула оцінки приведеної ефективності ЛКЗ визначаться за уточненою формулою:

$$E = S_{e\kappa e} / m_{BP}$$
 (5.20)

де S_{екв} – товщини однорідного матеріалу еквівалентного багатошаровій перешкоді;

m_{ВР} - наважка вибухової речовини.

Тоді, за формулою (5.20, виконаємо порівняльну оцінку приведеної ефективності:

– для ЛКЗ діаметром 7 мм ($S_{e\kappa e} = 0,00601$ м, $m_{\rm BP} = 0,026$ кг/м),

 $E_{JIK3-7} = 0,00601 / 0,026 = 0,231;$

– для ЛКЗ діаметром 5 мм ($S_{e\kappa e} = 0,00601$ мм, $m_{BP} = 0,0115$ кг/м),

Е_{лкз-5}=0,00601 / 0,0115=0,523.

Відсоткове збільшення приведеної ефективності при переході від ЛКЗ діаметром 7 до 5 мм становить:

$$\Delta = \frac{E_{JK3-5} - E_{JK3-7}}{E_{JK3-7}} \cdot 100\%, \qquad (5.21)$$
$$\Delta = \frac{0,523 - 0,231}{0,231} \cdot 100\% = 126\%$$

Таким чином, за результатами дослідження обґрунтовано зменшення типорозміру ЛКЗ на 28,6 % (з 7 мм до 5 мм), за рахунок чого розрахункова приведена ефективність ЛКЗ збільшена на 126 % в порівнянні з варіантом ЛКЗ D = 7 мм, що дозволяє зменшити масу ЛКЗ з 0,1134 до 0,056 кг/м, тобто на 0,0574 кг/м (49 %). Таким чином маса конструкції СР зменшується на 0,574 кг для кожних 10 метрів ЛКЗ, що еквівалентно сприяє збільшенню маси корисного навантаження. Зменшення маси заряду ВР з 0,026 кг/м до 0,0115 кг/м потенційно призводить до зниження рівня ударно-хвильових навантажень на елементи конструкції РН, що підвищує загальну надійність польоту.

Отже розроблена методика визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для гарантованого розділення багатошарової перешкоди підтверджена експериментально. Вона дає швидку оперативну оцінку необхідного типорозміру ЛКЗ з задовільною точністю. Це дозволяє знизити матеріальні та часові витрати на етапі проектування та експериментального відпрацювання.

Вирішено науково-практичну задачу вибору раціонального типорозміру ЛКЗ та раціональної фокусної відстані, для розділення багатошарової перешкоди, що є фрагментом корпусного відсіку РН нової розробки.

Висновки за розділом 5

За результатами дослідження розділення багатошарової перешкоди лінійним кумулятивним зарядом можна зробити такі висновки:

1. Вперше розроблено методику визначення раціонального (мінімально достатнього) типорозміру ЛКЗ із нормованого ряду, що забезпечує гарантоване розділення багатошарової перешкоди. Методика базується на

порівнянні розрахункової глибини проникнення КС (з урахуванням впливу фокусної відстані) у матеріал першого шару (L), розглядаючи його як напівнескінченну перешкоду, з еквівалентною товщиною багатошарової перешкоди ($S_{e\kappa 6}$) та включає обов'язковий етап експериментальної перевірки повного прорізання перешкоди обраним типорозміром ЛКЗ.

2. Вперше розроблено нову математичну модель для визначення еквівалентної товщини багатошарової перешкоди ($S_{e\kappa \theta}$), яка враховує товщину, густину та міцність матеріалів кожного шару відносно основного (першого) шару, а також інтегрує двофазну модель взаємодії (гідродинамічну та міцнісну фази) через введення вагових коефіцієнтів. Це дозволяє виконувати швидку оцінку раціонального типорозміру ЛКЗ на ранніх етапах проектування, зменшуючи потребу у великій кількості дорогих натурних експериментів.

3. Проведено успішну верифікацію розробленої методики експериментальним способом з використанням ЛКЗ різних діаметрів D = (4,3; 4,5; 5; 7; 8) мм на двох різних багатошарових перешкодах: сплав АМг6, склотекстоліт СТ-1, повсть технічний напівгрубий (перешкода №1) та сплав АМг6, ПКМ №1, ПКМ №2 (перешкода №2). Результати верифікації показали повний збіг (у 100% випадків – 12 з 12) між розрахунковими прогнозами щодо можливості прорізання перешкоди та результатами фізичних експериментів, що підтверджує вірогідність та практичну придатність методики.

4. За розробленою методикою визначено раціональний типорозмір ЛКЗ (*D* = 5 мм) для розділення багатошарової перешкоди, що складається з алюмінієвого сплаву марки 2219 товщиною 5 мм та двох шарів багатофункціонального покриття товщиною 3,5 та 8 мм відповідно. Розрахунковий вибір підтверджено експериментальним способом в 17 випробуваннях з 17, що відповідає нижній довірчій межі ймовірності безвідмовного прорізання 0,873 при довірчій ймовірності 0,90. 5. Виконано оцінку ймовірності безвідмовної роботи СР за методом Босса на трьох макетах корпусного відсіку нової розробки при збільшеному експлуатаційному навантажені. За результатами експериментального дослідження нижня довірча межа ймовірності безвідмовної роботи становить не менше 0,9999519 при довірчій ймовірності 0,90.

6. На основі розробленої методики для конкретної багатошарової перешкоди, що є фрагментом корпусного відсіку РН нової розробки, обґрунтовано вибір ЛКЗ діаметром 5 мм замість попередньо запланованого ЛКЗ діаметром 7 мм. Це дозволило зменшити діаметр ЛКЗ на 28,6 % та масу наважки ВР на 56%. За рахунок цього розрахункова приведена ефективність ЛКЗ збільшена на 126 %, що призводить до зменшення погонної маси ЛКЗ на 0,0574 кг/м. Тобто маса конструкції СР зменшується на 0,574 кг для кожних 10 метрів ЛКЗ. шо еквівалентно сприяє збільшенню маси корисного навантаження РН та зниженню рівня ударно-хвильових навантажень на елементи конструкції, додатково підвищуючи загальну надійність виробу.

Розроблена методика визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для гарантованого розділення багатошарової перешкоди дозволяє оптимізувати параметри піротехнічних СР, підвищити їх ефективність та надійність, а також скоротити витрати на етапах проектування та відпрацювання.

Методику апробовано та верифіковано для ЛКЗ з напівциліндричною КВ в діапазоні типорозмірів від 4,3 до 8 мм для багатошарових перешкод, у яких перший шар з алюмінієвого сплаву (марки 2219 або АМг6) має товщину, меншу за глибину проникнення КС в аналогічну напівнескінченну перешкоду, а наступні шари виконані з композиційних матеріалів (густиною від 340 до 1800 кг/м³, межею міцності на розрив від 0,8 до 474 МПа). Методика може бути застосована для інших типорозмірів ЛКЗ та аналогічних перешкод, але потребує додаткової експериментальної верифікації в кожному конкретному випадку.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності піротехнічної системи розділення ракети шляхом визначення раціональних проєктних параметрів ЛКЗ з напівциліндричною КВ для багатошарової перешкоди, перший шар якої з алюмінієвого сплаву марки 2219, а два наступні з композиційного БФП.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Розроблено та верифіковано нову методику експериментального визначення фокусної відстані та глибини проникнення КС в перешкоду (з встановленням ЛКЗ під малим кутом (1...2°) до перешкоди) та алгоритм визначення оптимальної фокусної відстані, що сукупно дозволяє суттєво скоротити обсяг випробувань та підвищити точність визначення оптимальних параметрів.

2. Вперше розроблено математичну модель, що описує залежність глибини проникнення КС від фокусної відстані для ЛКЗ діаметром 5 мм з напівциліндричною КВ у сплав 2219 та експериментально визначено оптимальну ($F_{opt} = 4,86$ мм) і раціональну ($F_{pau} = 5,0$ мм) фокусні відстані.

3. Удосконалено розрахунок глибини проникнення КС ЛКЗ з напівциліндричною КВ шляхом інтеграції уточненого гідродинамічного підходу з експериментально визначеними напівемпіричними коефіцієнтами, що враховують вплив фокусної відстані ($k_F = (0,9...1)$, в діапазоні фокусних відстаней від 4,1 до 6,9 мм), технологічних факторів ($k_T = 0,89$) та інших фізичних ефектів (k = 2,16).

4. Розроблено та верифіковано нову методику визначення раціонального типорозміру ЛКЗ для гарантованого розділення багатошарової перешкоди, яка включає нову формулу для розрахунку еквівалентної товщини (*S*_{екв}), що

враховує властивості шарів перешкоди та двофазний характер взаємодії КС з перешкодою.

5. За розробленою методикою визначено та експериментально підтверджено раціональний типорозмір ЛКЗ (діаметр 5 мм) для гарантованого розділення конкретної багатошарової перешкоди (сплав 2219 та 2 шари БФП), що використовується в РН нової розробки.

6. Обґрунтований вибір ЛКЗ меншого діаметру (5 мм замість 7 мм) забезпечив значне підвищення ефективності системи розділення: зменшено діаметр ЛКЗ на 28,6%, масу ВР на 56%, підвищено розрахункову приведену ефективність ЛКЗ на 126%, знижено погонну масу ЛКЗ (~0,057 кг/м), що сприяє збільшенню корисного навантаження та надійності РН.

7. Підтверджено високу експлуатаційну надійність розділення дослідженої багатошарової перешкоди обраним ЛКЗ (D = 5 мм) на макетах корпусного відсіку нової розробки при збільшених експлуатаційних навантаженнях (оцінка ймовірності безвідмовної роботи $P(t) \ge 0,99995$ за методом Босса).

8. Мета дослідження – підвищення ефективності піротехнічної системи розділення шляхом визначення раціонального типорозміру ЛКЗ та раціональної фокусної відстані – досягнута, а всі поставлені завдання вирішено повністю.

Межі застосування – ЛКЗ з напівциліндричною КВ діаметром від 4,3 до 8 мм на перешкодах з алюмінієвого сплаву марки 2219 або АМг6 (напівнескінченної товщини) та багатошарових, у яких перший шар з алюмінієвого сплаву (марки 2219 або АМг6) має товщину, меншу за глибину проникнення КС в аналогічну напівнескінченну перешкоду, а наступні шари виконані з композиційних матеріалів (густиною від 340 до 1800 кг/м³, межею міцності на розрив від 0,8 до 474 МПа). Застосовність моделі та методики встановлена для товщин багатошарової перешкоди: s_1 до 5 мм, s_2 до 5 мм, s_3 до 8 мм. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, розроблені математичні моделі, напівемпіричні залежності, а також розроблені методики і алгоритм визначення основних проєктних параметрів знайшли практичне використання у виробничому процесі ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля (м. Дніпро) при проєктуванні та розробці робочої конструкторської документації на систему розділення корпусного відсіку нової розробки та систему автоматичного припинення польоту, а також використовуються у навчальному процесі в аспірантурі підприємства (підтверджено актами впровадження, наведено у додатку А).

Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка та верифікація комплексної математичної моделі процесу взаємодії КС ЛКЗ з багатошаровими перешкодами кінцевої товщини в сучасному програмному середовищі (наприклад, ANSYS Explicit Dynamics) з уточненням моделей матеріалів (зокрема, типу Джонса-Кука) та критеріїв руйнування на основі отриманих експериментальних даних.

Отримані результати мають важливе науково-практичне значення для ракетно-космічної галузі України при розробці та вдосконаленні ефективних піротехнічних систем розділення ракет-носіїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Болюбаш Є.С. Зменшення зони можливого падіння аварійних РН за рахунок використання систем розділення ракетно-космічних елементів оснащених піротехнічними пристроями. *XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»:* Збірник тез. Дніпро, 2023. С. 229.

2. Lohvynenko A., Boliubash Y. Using pyrotechnic devices in the development of separation systems for rocket and space technologies. *75th International Astronautical Congress*. Milan, 2024. IAC-24,C2,IP,7,x83209. 1 p.

 3.
 Список
 космических
 запусков.
 Wikipedia.
 URL:

 https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0
 %B8%D1%81%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%
 %B8%D1%87%D0%B5%D1%

 %BA_%D0%BA%D0%BE%D1%85_%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D1%83%D1%81
 %D0%BA%D0%BE%D0%B2 (Дата звернення 01.04.2025р.).
 %D1.04.2025p.).

4. Володарский Е. Т., Малиновский Б. Н., Туз Ю. М. Планирование и организация измерительного эксперимента : учебное пособие. К.: Вища школа. Головное издательство, 1987. 280 с.

5. Деденко Л. Г., Керженцев В. В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента: в лабораториях общего физического практикума. М., 1977. 111 с.

6. Boliubash Y. Experimental determination of the focal distance of the cumulative pyrotechnic device of the separation system of the launch vehicle. *Tehnički glasnik. Technical Journal.* 2025. Vol. 19, No. 1. P. 142-148. URL: https://doi.org/10.31803/tg-20240516182956.

7. Дружинина О. А., Болюбаш Е. С. Термодеформационные процессы (усадка) в металле при проведении сварочных работ при изготовлении корпусных отсеков. *Вісник дніпровського університету.* № 4 том 26. Серія: Ракетно-космічна техніка. Дніпро, 2018. Вип. 21. С. 27-33. URL: https://doi.org/10.15421/451806.

8. Болюбаш Є.С. Експериментальне дослідження працездатності піротехнічних пристроїв системи розділення ракет-носіїв. *Космічна техніка*.

Ракетне озброєння. Space Technology. Missile Armaments. Дніпро, 2024. Вип. № 1. С. 121-128. URL: https://doi.org/10.33136/stma2024.01.121.

9. Болюбаш Є.С. Формування ефективної фокусної відстані піротехнічних пристроїв систем розділення (відділення) ракети-носія. Огляд літератури. Вісник Дніпровського університету. Journal of Rocket-Space Technology. №4, Т.33, Серія: Ракетно-космічна техніка. Дніпро, 2024. Вип. 28. С. 26-37. URL: https://doi.org/10.15421/452421.

10. Болюбаш Є.С. Визначення глибини проникнення кумулятивного струменю в перешкоду змінної товщини. *Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. «Наука і металургія»*, м. Дніпро, 19-20 лис. 2024 р. Дніпро, 2024. С. 47. URL: https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-conferens.

11. Дружинина О. А., Болюбаш Е. С. Термодеформационные процессы (усадка) в металле при проведении сварочных работ при изготовлении корпусных отсеков. Збірник тез: ХХ міжнародна молодіжна науковопрактична конференція «Людина і космос», 11-13 квітня 2018 року. Дніпро, 2018. С. 202.

12. Болюбаш Є.С. Кумулятивний ефект та його використання для розділення ракетно-космічних елементів за допомогою піротехнічних пристроїв. Збірник доповідей. Матеріали XVII Наукових читань «Дніпровська орбіта — 2022» (26-28 жовтня). Дніпро, 2022. С. 10-15.

13. Boliubash Y. Section of a sheet metal by a shaped charge jet of a pyrotechnical device in rocket and space technology. *All-Ukrainian scientific and technical conference «Наука і металургія» 22-24 november*. Ukrainian State University of Science and Technology of the MES of Ukraine. Dnipro, 2022. P. 65-66.

14. Болюбаш Є.С. Методологія визначення зазорів між елементами піротехнічних пристроїв системи розділення відсіку корисного навантаження ракет-носіїв. Збірник матеріалів. Молодь: наука та інновації: матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих

вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 422-423.

15. Болюбаш Є.С. Методика дослідження глибини проникнення кумулятивного струменя піротехнічного пристрою системи розділення ракетиносія. *Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. «Наука і металургія»*, м. Дніпро, 14-16 лис. 2023 р. Дніпро, 2023. С. 77.

16. Болюбаш Є.С. Вплив фокусної відстані встановлення кумулятивного піротехнічного пристрою на розділення елементу конструкції ракети-носія. *XXVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»:* Збірник тез. Дніпро, 2024. С. 240-241.

17. Болюбаш Є.С. Використання лінійних кумулятивних зарядів для систем розділення в ракетно-космічній техніці. *Збірник доповідей. Матеріали XIX Наукових читань «Дніпровська орбіта – 2024»* (23-25 жовтня). Дніпро, 2024. С. 16-21.

18. Boliubash Y., Lohvynenko A. Using pyrotechnic devices in the development of separation systems for rocket and space technologies. *75th International Astronautical Congress*. Milan, 2024. IAC-24,C2,IP,7,x83209. 9 p.

19. Колесников К.С., Козлов В.И., Кокушкин В.В. Динамика разделения ступеней летательных аппаратов. М. 1977, 224 с.

20. Близниченко В. В. Проектування і конструкція ракет-носіїв: Підручник. В. В. Близниченко, Є. О. Джур, Р. Д. Краснікова, Л. Д. Кучма, А. К. Линник та ін.; за ред. акад. С. М. Конюхова. Д.: Вид-во ДНУ, 2007. 504 с.

21. Гладкий Е.Г. Нові підходи до комплексного оцінювання польотної безпеки і надійності ракетно-космічних систем // Дисертація. Дніпро: ДНУ ім. О.Гончара, 2020. 370 с.

22. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. Frank B. Pollard, Jack H. Arnold, Jr. Справочное пособие. Перевод с английского H. B. Обезьяева и М. С. Шура. Под редакцией профессора И. В. Тишунина. М.: Мир, 1970. 400 с.

23. Ефанов В.В., Шевалев И.Л. Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Под ред. В.В. Ефанова, К.М. Пичхадзе: В 2-х т. Т. 1. М. 2012. 526 с.

24. Логвиненко А. І. Вибір функціональних елементів системи розділення ступенів РКП «Циклон-4М» / Логвиненко А. І., Макаренко А. О., Хомяк В. О., Олесіюк А. А. // Ракетне озброєння. Космічна техніка. Space Technology. Missile Armaments. Дніпро, 2024. Вип. № 1. С. 61-71. URL: https://doi.org/10.33136/stma2024.01.061.

25. Harris G., Renfro S. (2013). An adaptable frangible separation joint From. URL: https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/1993/all1993/38/ (Дата звернення 03.01.2025р.).

26. Brown E.N., Borovina D.L. The Trinity High-Explosive Implosion System: The Foundation for Precision Explosive Applications. *Nuclear technology*. Volume 207. Supplement 1, 2021. S204–S221. DOI: https://doi.org/10.1080/00295450.2021.1913954.

27. ISO 24113:2019. Space systems – Space debris mitigation requirements. International Organization for Standardization, 2019. 22 p.

28. Подиновский В. В. Многокритериальные задачи с упорядоченными по важности критериями. *Автоматика и телемеханика*, №11, 1976. С.118-127.

29. Гиг Дж., ван. Прикладная общая теория систем. М.: Мир, 1981. 733 с.

30. James L.S. Pyrotechnic shock: a literature survey of the linear shaped charge (LSC). NASA TM - 82583. Systems Dynamics Laboratory. Science and Engineering. May 1984. 56 p.

31. Петушков В. Г. Применение взрыва в сварочной технике. К.: Наукова думка, 2005. 753 с.

Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. Гос. изд.
 ФМ лит. М. 1959, 800 с.

33. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принципы его работы, УМН, 1957, том 12, выпуск 4, С. 41–56. 34. Физика взрыва. Изд. третье, том І. Под ред. Л. П. Орленко. Изд. «Наука», м. 2004, 828 с.

35. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.. Проблемы гидродинамики и их математические модели. Изд. Наука, М. 1973, 416 с.

36. Физика взрыва. Изд. третье, том II. Под ред. Л. П. Орленко. Изд. «Наука», м. 2004, 644 с.

37. Ефанов В.В. Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Под ред. В.В. Хартова, К.М. Пичхадзе: В 3-х т. Т. 3. М.: Изд-во МАИ-Принт, 2014. 464 с.

38. Войтенко Ю.І., Гошовський С.В., Костюк О.О., Пасічник А.М. Про оптимальні конструкції і матеріали кумулятивних зарядів для деяких практичних застосувань. *Технічна інженерія*. 2023. № 1(91). С. 287–297. DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-287-297.

39. Войтенко, Ю. І., Гошовський, С. В., Закусило, Р. В. (2022). Матеріалознавчі аспекти ефективності вибухової кумуляції. Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво», м. Шостка, 23 - 25 листопада 2022 року. Суми : Сумський державний університет, 2022. С.56-59.

40. Толкунов, І.О., Смирнов, О.М. Обґрунтування параметрів та визначення показників ефективності кумулятивних зарядів. *Проблеми надзвичайних ситуацій*: Збірка наукових праць. Випуск 26, 2017. Харків, 2017. С. 153-169.

41. Барбашин, В.В., Назаров, О.О., Ротін, В.В., Толкунов, І.О. Основи організації піротехнічних робіт: Навчальний посібник. Під ред. Садкового В.П. Харків, 2010. 353 с.

42. Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident. NASA. URL: https://history.nasa.gov/rogersrep/v1ch9.htm (дата звернення: 20.06.2023).
43. Методична розробка (інформаційних матеріал). Головне управління ДСНС України у Київській області. URL: https://kv.dsns.gov.ua/upload/2/2/0/5/3/2/6/vibuxovi-sumisi-ta-recovini-klasifikaciia-vibuxovix-recovin-osnovni-vlastivosti-vibuxovix-recovin.docx (Дата звернення 22.03.2025р.).

44. Крупин А.В. Обработка металлов взрывом / А.В. Крупин, В.Я. Соловьев, Г.С.Попов, М.Р. Кръстев. М.: Металлургия, 1991. 496 с.

45. Биркгоф Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Подобие. 1963. М. 244 с.

46. Flexible linear shaped charge (FLSC). *Psemc emc*. URL https://psemc.com/products/flexible-linear-shaped-charge-flsc/ (дата звернення: 05.07.2023).

47. Балаганский И.А., Мержневский Л.А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2004. 408 с.

48. Волгин Л. А. Технические средства для резки взрывом при ремонтно-восстановительных и демонтажных работах / Л. А. Волгин, Б. И. Паламарчук, А. Т. Малахов, С. Г. Лебедь, В. А. Кулешов // Сварщик. 2006. № 1 (47). Київ, 2006. С. 6-9.

49. Ensign-Bickford Aerospace & Defense Company. URL: www.ebad.com. (дата звернення: 19.06.2023).

50. We Are Energetics. Comprehensive & mission-specific. From molecular to systems solutions. *Psemc emc*. URL: https://psemc.com/who-we-are/ (дата звернення: 05.07.2023).

51. Вологжанин Р.О., Вологжанин О.Ю., Рыбаков А.П. Взаимодействие удлиненного тела с преградой конечной толщины при нормальном соударении. *Вестник ПНИПУ*. 2011. С. 29-36.

52. Балакин, А. А., Кузин, Е. Н. Удлиненный кумулятивный заряд для системы коллективного спасения : патент РФ № RU 2 361170 C1 / заявл. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального

образования Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого 1; опубл. 10.07.2009. М. 2009. 7 с.

53. Охочинский М.Н., Афанасьев К.А. Системы разделения в ракетной технике. Ч. 2. Системы отделения полезных нагрузок и обтекателей: учебное пособие. СПб., 2013. 55 с.

54. Кобелев В. Н., Милованов А. Г. Средства выведения космических аппаратов, М. 2009. 528 с.

55. Skylab saturn ib flight manual. MSFC-MAN-206. NASA. Huntsville, Alabama. September 30, 1972. p. 276 URL: https://web.archive.org/web/20070811121204/http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.n trs.nasa.gov/19740021163_1974021163.pdf.

56. Дегтярев А.В., Горбулин В.П. Эволюция ракетно-космических разработок КБ «Южное». *Вісник НАН України*, 2014, № 6. С. 51-76.

57. RT-23 / SS-24 Scalpel. *Federation of American Scientists*. URL: https://nuke.fas.org/guide/russia/icbm/rt-23.htm (Дата звернення 30.10.2024р.).

58. UR-100MR / SS-17 Spanker. *Federation of American Scientists*. URL: https://nuke.fas.org/guide/russia/icbm/ur-100mr.htm (Дата звернення 30.10.2024р.).

59. Колесников К.С. Расчет и проектирование систем разделения ступеней ракет: Учеб. пособие / К.С. Колесников, В.В. Кокушкин, С.В. Борзых, Н.В. Панкова. // М. 2006. 376 с.

60. Flight Termination System Testing SpaceNews. URL: https://spacenews.com/flight-termination-system-testing-drives-falcon-9-schedule/ (дата звернення: 19.05.2024).

61. Кузин Е.Н., Загарских В.И. Творческий путь длиною почти в пол века. *Научно-технический журнал НПО им. С.А. Лавочкина Вестник*. Випуск 4 (15) 2012. С. 157-163.

62. Кузин Е.Н., Загарских В.И., Ефанов В.В., Кондакова Л.В. Многофункциональные пиромеханические устройства - новый тип средств разделения бортовой автоматики. *Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина»*. № 1 (59). X, 2023. C.45-52. DOI: 10.26162/LS.2023.59.1.005.

63. Нестеренко Є. Ілон Маск готує польоти на Марс: коли старт і скільки це коштуватиме. 2024. *2plus2*. URL: https://2plus2.ua/ukrayina-sogodni/novyny/ilon-mask-gotue-poloti-na-mars-koli-start-i-skilki-ce-koshtuvatime (дата звернення: 22.11.2024).

64. Минин, И. В., Минин, О. В. Способ добычи полезных ископаемых на астрономическом объекте : патент на изобретение Российской Федерации № RU 2777050 C1 : заявл. 19.07.2021 ; опубл. 18.04.2022. Бюл. № 11. 18 с.

65. Гадюченко А.Г., Болюбаш Е.С.. Целесообразность внедрения возвращаемых ступеней РН. Збірник тез: ХХІ міжнародна молодіжна науковопрактична конференція «Людина і космос» 10-12 квітня 2019 року. Дніпро, 2019. С. 239.

66. Обломки китайской ракеты упали на жилые дома. *bigmir)net*. URL: https://techno.bigmir.net/technology/5928501-oblomki-kitajskoj-rakety-upali-na-zhilye-doma (Дата звернення 24.05.2024р.).

67. У Китаї шматок ракети впав і вибухнув біля житлових будинків. *Kopecnoндент.net*. URL: https://ua.korrespondent.net/world/3928331-u-kytaishmatok-rakety-vpav-i-vybukhnuv-bilia-zhytlovykh-budynkiv (дата звернення: 24.05.2024).

68. Асриев, Ю. И. Устройство для испытаний удлиненных кумулятивных зарядов: патент на изобретение Российской Федерации № RU 2284463 C2: заявл. 12.07.2004; опубл. 27.09.2006. Бюл. № 27. Заявитель: Открытое акционерное общество "Ракетно-космическая корпорация 'Энергия' им. С.П. Королева". 7 с.

69. Загарских, В. И., Кузин, Е. Н., Балакин, А. А., Дахно, Е. А. Удлиненный кумулятивный заряд: патент РФ № RU 2330427 1 C1 / заявл. Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого; опубл. 10.08.2007. М. 2007. 6 с. 70. Ефанов В. В., Кузин Е. Н. Линейное устройство разделения на удлиненном кумулятивном заряде : патент РФ № RU 2 463 544 C1 / заявл. Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина"; опубл. 10.10.2012. М. 2012. 8 с.

71. Fundamentals of shaped charges. William P. Walters and Jonas A. Zukas . John Wiley & Sons, New York 1989, 398 p.

72. Bohanek V., Dobrilović M., Škrlec V. The efficiency of linear shaped charges // *Tehnički vjesnik*. 21, 3(2014). Slavonski Brod, Croatia, P. 525-531.

73. А.А. Мойшеев, А.Е. Ширшаков. К 50-летнему юбилею запуска космических аппаратов «Луна-16», «Луна-17» и «Венера-7». *Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина»*. № 3 (49), Х., 2020. С. 3-9. DOI: 10.26162/LS.2020.49.3.001.

74. Lim S., Baldovi P., Rood C. Jet Grouping of Linear-Shaped Charges and Penetration Performance. Applied Sciences. 2022.12, 12768. 11 p. https://doi.org/10.3390/app122412768.

75. Lim, S. Steady state equation of motion of a linear shaped charges liner. *Int. J. Impact Eng.* 2012, 44, P. 10–16.

76. Ладов С. В., Фёдоров С. В., Загрядцкий Ф. С. Расчет действия кумулятивных зарядов с полусферическими и сегментными облицовками: методические указания к выполнению домашних работ. М. 2016. 49 с.

77. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов. 2-е изд. Прикладная механика сплошных сред ; Т. 3. М. 2006. 520 с.

78. 2219 (AlCu6Mn, A92219) Aluminum. *MakeItFrom*. URL: https://www.makeitfrom.com/material-properties/2219-AlCu6Mn-A92219-Aluminum (Дата звернення 13.08.2024р.).

79. ГОСТ 4784-97. Алюминии и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Стандартинформ. М. 2009. 15 с.

80. ДСТУ ISO 209-1:2002. Алюміній та алюмінієві сплави здеформовні хімічний склад та види продукції. Частина 1. Марки. Держспоживстандарт України. Київ. 2004. 15 с.

81. Wang, H., Qin, G., Li, C. A modified Arrhenius constitutive model of 2219-O aluminum alloy based on hot compression with simulation verification. *Journal of Materials Research and Technology*, 1 19, 2022. P. 3302-3320. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.080.

82. ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International. 1990. 3470 p.

83. Marks, L. S., Avallone, E. A., Baumeister, T. (Eds.). Marks' standard handbook for mechanical engineers. New York: McGraw-Hill. 1996. 1383 p.

84. Joseph R. Davis. Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International, Technology & Engineering. Jan 1, 1993. 784 p.

85. 2219 Aluminium Technical Datasheet. *Smiths Metal Centers Limited*. URL: https://www.smithmetal.com/pdf/aluminium/2xxx/2219.pdf (Дата звернення 18.08.2024р.).

86. 2219 Aluminum Alloy Bar: 1 WixSteel Industrial International Trading Co. URL: https://www.wixsteel.com/products/aluminum-alloy/2000-seriesaluminum-alloy/2219 (Дата звернення 13.08.2024р.).

87. Aluminium Alloy 2219. *AircraftMaterials*. URL: https://www.aircraftmaterials.com/data/aluminium/2219.html (Дата звернення 13.08.2024р.).

88. ASTM B209-14 - Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate // ASTM International. *Jahanayegh*. URL: https://jahanayegh.com/home/images/standard/B-209.pdf (Дата звернення 18.08.2024p.).

89. AlcladAluminum2219-O.MatWeb.URL:https://matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=2219(датазвернення:18.10.2024).

90. Spacelab to Gateway: 40 years of modules for people in space. *European Space Agency*. URL: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_ Technology/Spacelab_to_Gateway_40_years_of_modules_for_people_in_space (Дата звернення 13.08.2024р.).

91. Columbus: Europe's Laboratory on the International Space Station. BR-144. ESA, October 1999. P. 39. URL: https://www.esa.int/esapub/br/br144/br144.pdf.

92. Jeffery C. Pilet. AIAA Technical Paper – External Tank Program – Legacy of Success. Jeffery C. Pilet, Dawn Diecidue-Conners, Michelle Worden, Michelle Guillot, Lockheed Martin. Space Systems Company, New Orleans, LA, 70129 and Kenneth Welzyn. NASA, Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL 35812.51 p.

93. D. C. G. Eaton, D. P. Bashford. The Materials Challenges Facing Europe Structures and mechanisms Division, European Space Research & Technology Centre (ESTEC), Noordwijk. The Netherlands ERA Technology Ltd., Leatherhead, United Kingdom. *ESA*. URL: https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet79/eaton.htm.

94. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

95. Геллер, Ю. А., Рахштадт А. Г. Материаловедение : (методы анализа, лабораторные работы и задачи). М. : Металлургия, 1975. 448 с.

96. Гуляев, А.П. Металловедение: Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

97. Мідь, її властивості та методи одержання. *Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника*. URL: https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2020/09/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%86%D1%96 %D1%8F-8.-%D0%92%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0% B8%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%BE-D0%BC%D1%96%D0%B4%D1%96.pdf (Дата звернення 13.08.2024р.).

98. Практична робота № 12. Сплави міді (латунь, бронза і спецсплав). *Технічний фаховий коледж ЛНТУ*. URL: https://e-tk.lntu.edu.ua/pluginfile.php/ 10302/mod_resource/content/0/%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D 0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96%20%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D 1%82%D0%B8.pdf (Дата звернення 13.08.2024р.).

99. ГОСТ 859-2014. Медь. Марки. М.: Стандартинформ, 2015. 9 с.

100. Гусарова І.О., Манько Т.А. Матеріали, технології виготовлення ракет-носіїв та космічних апаратів. неруйнівний контроль якості виробів ракетно-космічної техніки / Методичні матеріали з навчальної дисципліни. Дніпро, 2022. 134 с.

101. Meyer R., Köhler J., Homburg A. Explosives. Wiley, Explosives, 7th Edition. 2016. p. 442.

102. ULTEM 9085. *MatWeb*. URL: https://matweb.com/search/ QuickText.aspx?SearchText=ultem%209085 (дата звернення: 18.10.2024).

103. ГОСТ 12652-74. Стеклотекстолит электротехнический листовой. Технические условия. - М.: Издательство стандартов, 1974. С. 96-108.

104. ГОСТ 6308-71. Войлок технический полугрубошерстный и детали из него для машиностроения. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1971. 14 с.

105. Гречишкіна, А. А. Основи наукових досліджень: Методичні вказівки до практичної, самостійної та індивідуальної роботи студентів. Харків: Українська державна академія залізничного транспорту, 2014. 29 с.

106. Корнєва, А. В. Загальна методика наукової творчості. *Сучасні* виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути: матеріали X міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Київ, 13 листопада 2020 р.). Київ, 2020. С. 379-388.

107. Повідайчик О., Жиленко Р. Методи досліджень у соціальній роботі: навчальний посібник. Ужгород. 2018. 164 с.

108. Основи наукових досліджень [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Г. Г. Стрелкова, М. М.

Федосенко, А. I. Замулко, О. С. Іщенко. – Електронні текстові дані (1 файл: 500 Кбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 120 с. URL: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d1ae877a-3fc0-4875-8846-7c193b8dd727/content.

109. Бєлкіна С. Д. Методичний супровід формування дослідницької компетентності майбутніх інженерів у процесі викладання природничонаукових навчальних дисциплін. *Вісник Житомирського державного університету імені Івана Франка*. 2015. № 4 (82). С. 10-14.

110. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1976.479 с.

111. Білим П. А. Основи наукових досліджень: конспект лекцій для студентів денної та заочної форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 263 – Цивільна безпека. Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 40 с.

112. Ушаков, Л. С., Рябчук, С. А., Котлєв, Ю. Є. Активный факторный эксперимент: Математическое планирование, организация и статистический анализ результатов. Орел, 2002. 39 с.

113. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк; перевод с английского Е. Г. Коваленко; под редакцией чл.-корр. АН СССР Н. П. Бусленко. М.: Мир, 1972. 381 с.

114. Крылова, А.В. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие / А.В. Крылова, Е.И. Шмитько, Т.Ф. Ткаченко // Воронеж, 2011. 116 с.

115. Зажигаев Л. С, Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М., Атомиздат, 1978, с. 232.

116. Шкіль М.І. Алгебра і початки аналізу: Підруч. для 10 кл. загальноосвіт. навч. закладів/ М. І. Шкіль, З. І. Слєпкань, О. С. Ду-бинчук. К.: Зодіак-ЕКО, Харків. 2006. 272 с. 117. Кухлинг, Х. Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. / Пер. Д. Х. Абдрашитова, Б. Г. Карташева, Е. В. Мозжухина. М.: Мир., 1985. 520 с.

118. Асриев, Ю.И., Асриев, А.Ю. Устройство для испытаний удлиненных кумулятивных зарядов: авторское свидетельство СССР № SU 1779902 А1: заявл. 31.01.91; опубл. 07.12.92. Бюл. № 45. - Заявитель: Головное конструкторское бюро Научно-производственного объединения "Энергия". 2 с.

119. LinearShapedCharge.Psemcemc.URL:https://psemc.com/products/linear-shaped-charge/ (дата звернення: 04.04.2024).

120. Linear shaped charge. *Accurate Energetic Systems*. URL: https://www.aesys.biz/linear-shaped-charge (дата звернення: 23.11.2024р.).

121. Ткачов А. Метод визначення оптимальної кількості експериментівдля моделювання сонячних елементів. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 347(1), 2025. С. 410-416. URL: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-56.

122. Самборський, О. С., Слободянюк, М. М., Шуванова, О. В. Обґрунтування вибору методу формування вибірки у дослідженнях фармацевтичного ринку (Наукові методичні рекомендації). Харків: Національний фармацевтичний університет, 2017. 27 с.

123. Sample Size Computation. *The Pennsylvania State University*. URL: https://online.stat.psu.edu/stat500/lesson/5/5.4/5.4.5 (Дата звернення 29.03.2025р.).

124. Куренков, В. И., Капитонов В. А. Методы обеспечения надёжности и экспериментальная отработка ракетно-космической техники. Самара, 2012, 258 с.

125. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Лук'яненко Ю.В. Основи теорії планування експерименту. Лабораторний практикум. Вінниця: ВНТУ, 2006. 167 с.

126. РД 50-690-89. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. М., 1990. 132 с.

127. Аналіз використання альбому типових графіків електричних навантажень з програмним забезпеченням user graph. *Проекти та події ДВНЗ* "ПДТУ". URL: https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2019/03/User-Graph.pdf (Дата звернення 15.03.2025р.).

128. Супрунович С. В., Кормош Ж. О., Сливка Н. Ю. Статистичні та хемометричні методи в хімії: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Луцьк: ВНУ імені Лесі Українки, 2022, 210 с.

129. ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. М., 2006, 8 с.

130. ГОСТ 6636-69. Основные нормы взаимозаменяемости. Нормальные линейные размеры. М.: Издательство стандартов, 1969. 7 с.

131. Hugh West (2023). Як розрахувати стандартну помилку регресії в Excel (з простими кроками). *#Exel.Wiki*. URL: https://exel.wiki/uk/iak-rozrakhuvati-standartnu-pomilku-regresiyi-v-excel-z-prostimi-krokami (дата звернення: 08.12.2024).

132. Лекція 6-7. Регресійний аналіз. *Факультет психології*. URL: https://psychology.karazin.ua/dist2020/materialy/Kryazh/MMAL67.pdf (дата звернення: 30.12.2024).

133. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных : пер. с англ. Л. : Судостроение, 1980, 384 с.

134. ISO 16269-6:2003 Statistical interpretation of data - Part 6: Determination of statistical tolerance intervals (IDT). 46 p.

135. Кобзар А.Н. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006, 816 с.

136. Вовк О. Б., Шаховська Н. Б. Формування факторів впливу на поведінку інформаційного продукту. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, (2), 2012. С. 82-88.

137. Гірничий енциклопедичний словник. Адитивність. *SLOVARonline*. URL: 162.slovaronline.com/170-адитивність (Дата звернення: 09.03.2025).

138. Лаврентьев, М. А. Исследование сопротивления броневой преграды кумулятивной струи / М. А. Лаврентьев, И. П. Спирихин, Е. А. Кузьмичева [и др.] // Вестник бронетанковой техники. 1979. № 6. Репринт на сайті: *Сталь и огонь: современные и перспективные танки*. URL: https://btvt.info/5library/vbtt_1979_06_lavrentiev.htm (дата звернення: 09.03.2025).

139. Лазарєв Ю. Ф. Лекції з навчальної дисципліни "Основи теорії чутливих елементів систем орієнтації – 3". Ч. 1. Лекції 1–5. Київ : НТУУ "Київський політехнічний інститут", 2015. 50 с.

140. Морченко Д. М. Аналіз можливостей з розмінування територій від вибухонебезпечних предметів. *Національна безпека України. Збірник наукових праць курсантів і студентів*. Одеса: ВА, 2020. Вип. 3. С. 22-27.

141. Мещеряков Ю.И. Формирование многомасштабной мезоструктуры в условиях ударного нагружения / Ю.И. Мещеряков, Н.И. Жигачева, А.К. Диваков, Г.В. Коновалов, Е.П. Осокин // *Физическая мезомеханика*. Т. 22, № 3. 2019, С. 44–53.

ДОДАТОК А

ДОКУМЕНТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ



результатів дисертаційної роботи Болюбаша Євгена Сергійовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії «Удосконалення системи розділення ракетно-космічних елементів за допомогою піротехнічних пристроїв»

Результати досліджень Болюбаша Євгена Сергійовича, що представлені в дисертаційній роботі «Удосконалення системи розділення ракетнокосмічних елементів за допомогою піротехнічних пристроїв», у вигляді методичних та практичних результатів застосовуються у ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля при проведені робіт з розробки спеціальних виробів та ракетносіїв.

Розроблені математичні моделі, коефіцієнт корекції, коефіцієнти впливу фокусної відстані та технологічних факторів були використані під час розробки програм та методик для проведення експериментальних досліджень, розробці дослідних конструкцій для відпрацювання проєктних параметрів виконавчого елементу піротехнічної системи розділення та аналізі отриманих результатів.

Відповідні напрацювання використані при проєктуванні та розробці робочої конструкторської документації на систему розділення корпусного відсіку нової розробки та систему автоматичного припинення польоту.

Заступник Генерального конструктора з конструювання і супроводження конструкцій – головний конструктор і начальник КБ

ерся Е.Н. Шевцов

Начальник відділу 215

С.Д. Солод

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний конструктор – перший заступник Генерального лиректора ДП «КБ «Південие» им. М.К. Янгеля (підпис) он угоського « 24 » 24 2025 р

АКТ

впровадження дисертаційного дослідження аспіранта PhD Болюбаша Євгена Сергійовича у навчальний процес аспірантури Державного підприємства «Конструкторського бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля»

Науково-методична комісія науково технічної ради Центру 2 ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля у складі голови – кандидата технічних наук Потапович Л.П. та членів комісії: кандидата технічних наук Позднишева М.О., завідувача аспірантури Зикової Н.П., констатує, що результати досліджень і розробки, які відображені в дисертаційній роботі Болюбаша Євгена Сергійовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) «Удосконалення системи розділення ракетно-космічних елементів за допомогою піротехнічних пристроїв» використовуються при проведенні лекційних та практичних занять, що викладаються у відповідності з навчальною програмою дисципліни «Моделювання процесів у системах та агрегатах ракетно-космічної техніки» спеціальності 134 – «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Автором вирішено науково-технічні задачі: розроблено дослідну конструкцію та досліджено на ній процес проникнення кумулятивного струменю лінійного кумулятивного заряду з напівциліндричною кумулятивною виїмкою у перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219, встановлено нову математичну залежність глибини проникнення КС від фокусної відстані, розроблено нову методику визначення раціонального типорозміру лінійного кумулятивного заряду піротехнічної системи розділення ракети, чим підвищено її ефективність.

Застосування вказаних розробок в навчальному процесі дозволило підвищити якість курсу, що викладається.

Голова комісії

Члени комісії:

Man M.S

Лариса ПОТАПОВИЧ

Микола ПОЗДНИШЕВ

Ніна ЗИКОВА

ДОДАТОК Б

ОЦІНКА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ГРУП ВИКОНАВЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ СР МЕТОДОМ ЛІНІЙНОГО ЗГОРТАННЯ ЧАСТИННИХ КРИТЕРІЇВ

Метод лінійного згортання частинних критеріїв використовується для комплексної оцінки альтернатив за кількома критеріями. Узагальнений критерій вибору СР розраховується за формулами [20]:

$$W(\varphi(\alpha)) = \sum_{i=1}^{N} C_{i} \omega_{i}(\varphi_{i}(\alpha)), W(\varphi(\alpha)) \to min;$$
(5.1)

$$\omega_{i}(\varphi_{i}(\alpha)) = \frac{\varphi_{i}(\alpha) - \varphi_{i\min}}{\varphi_{i\max} - \varphi_{i\min}}$$
(Б.2)

де $W(\phi(\alpha))$ – значення узагальненого критерію для альтернативи α ; N – кількість частинних критеріїв;

 C_i – ваговий коефіцієнт *i*-го критерію ($\sum C_i = 1$);

 $\phi_i(\alpha)$ – оцінка за *i*-м частинним критерієм для альтернативи α ;

 $\phi_{i max}$ – найбільше значення *i*-го частинного критерію серед усіх альтернатив;

φ_{i min} – найменше значення *i*-го частинного критерію серед усіх альтернатив;

 $\omega_i(\phi_i(\alpha))$ – нормоване значення *i*-го критерію для альтернативи α .

Процедура оцінювання включає наступні етапи [20,28,29]:

1. Ранжирування варіантів за критеріями $\varphi_i(\alpha)$ за методом Подиновського;

2. Розробка шкали оцінок (1 бал – найкраща оцінка, 10 балів – найгірша);

3. Класифікація альтернатив α за критеріями $\varphi_i(\alpha)$ за шкалою оцінок;

4. Розрахунок бальних оцінок альтернатив.

Ранжируванням здобудемо таку послідовність альтернатив: на першому місці – α_1 , на другому – α_2 , на третьому – α_3 , що відповідають 1, 2, 3 функціональній групі виконавчих елементів СР відповідно (класифікація згідно з розділом 1.1). Для критеріїв складності, надійності і безпеки прийнято 10-бальну шкалу оцінок, де 1 бал – найкраща оцінка, 10 балів – найгірша. Оцінку ваги використано за даними [24], де вказано масу різних систем відділення. Прийнято, що вага систем розділення додатково додає 30% ваги. Ціну 1 кг маси конструкції оцінено в 2,5 тис. доларів США.

Критерії, їх вагові коефіцієнти і оцінки альтернатив за кожним критерієм наведено в таблиці Б.1. Бали присвоєно за результатами аналізу різних варіантів конструкції СР, наведених в [19,24,42,46,53–59].

Таблиця Б.1

Вхідні дані											
Критерій	Ваг. коеф. С _і	α ₁ (група 1)	α ₂ (група 2)	α ₃ (група 3)	Фi max	φ i min					
Маса конструкції $\varphi_1(\alpha)$, кг	0,5	500	175	125	500	125					
Надійність $\varphi_2(\alpha)$	0,1	1,5	1,5	1	1,5	1,0					
Складність конструкції $\varphi_3(\alpha)$	0,1	3	2	1	3	1,0					
Вартість $\varphi_4(\alpha)$	0,2	1250	437,5	312,5	1250	312,5					
Безпека $\varphi_5(\alpha)$	0,1	1	1	2	2	1,0					

Розрахунок. Для прикладу розрахуємо $\omega_1(\phi_1(\alpha)), W(\phi(\alpha_1))$ для групи 1:

$$\omega_{1}(\phi_{1}(\alpha)) = \frac{\phi_{1}(\alpha) - \phi_{i_{min}}}{\phi_{i_{max}} - \phi_{i_{min}}} = \frac{500 - 125}{500 - 125} = 1.$$

$$W(\phi(\alpha_{1})) = \sum_{i=1}^{5} C_{i}\omega_{1}(\phi_{i}(\alpha)) = 0, 5 \cdot 1 + 0, 1 \cdot 1 + 0, 2 \cdot 1 + 0, 1 \cdot 0 = 0, 9.$$

Аналогічно проводиться розрахунок для інших величин, результати розрахунку наведено в таблиці Б.2.

Таблиця Б.2

Оцінка варіантів виконавчих елементів СР, за оцінкою альтернатив

Критерій	$\omega_i(\varphi_i(\alpha_1))$	$\omega_i(\phi_i(\alpha_2))$	$\omega_i(\phi_i(\alpha_3))$	$C_i\omega_i(\phi_i(\alpha_1))$	$C_i\omega_i(\phi_i(\alpha_2))$	$C_i\omega_i(\phi_i(\alpha_3))$
Маса конструкції	1.00	0.13	0.00	0.50	0.07	0.00
$\varphi_1(lpha),$ кг	1,00	0,15	0,00	0,50	0,07	0,00
Надійність $\varphi_2(\alpha)$	1,00	1,00	0,00	0,10	0,10	0,00
Складність						
конструкції	1,00	0,50	0,00	0,10	0,05	0,00
$\varphi_3(\alpha)$						
Вартість $\varphi_4(\alpha)$	1,00	0,13	0,00	0,20	0,03	0,00
Безпека $\varphi_5(\alpha)$	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,10
$W(\phi(lpha_i))$				0,900	0,243	0,100

Аналіз результатів розрахунку показує, що альтернатива *α*₃ (піротехнічні пристрої лінійної дії) має найменше значення узагальненого критерію *W*(φ(α)), що свідчить про її перевагу з погляду розглянутих критеріїв. Отримані результати мають оцінювальний характер.

ДОДАТОК В

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕРМІЧНОГО РОЗШИРЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ В ПОЛЬОТІ НА ВЕЛИЧИНУ ФОКУСНОЇ ВІДСТАНІ

Термічне розширення матеріалів, що входять до СР на ЛКЗ, впливає на зміну фокусної відстані *F*. У даному розрахунку оцінено зміну *F* при зміні температури від -50°C до +220°C (ΔT =270°C).

Зміна довжини тіла (*ДL*) визначається за формулою [14,117]:

 $\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = L_0 \cdot \alpha \cdot (T_{max} - T_{Hay}), \qquad (B.1)$ де ΔL – величина зміни довжини тіла;

 L_0 – початкова довжина тіла при температурі T_0 ;

 ΔT – температурний інтервал, що розраховується як:

де *T_{max}* – максимальне значення температури в процесі польоті;

*T*₀ – початкове значення температури.

Елементи СР, що впливають на зміну фокусної відстані:

- втулка зі сталі 3 збільшує *F*; *L*_{0 втулки} = 8,5 мм;
- кронштейн (Ultem 9085) зменшує F; $L_{0 \text{ кронштейна}} = 2,5 \text{ мм}$;
- корпус ЛКЗ з міді М1 зменшує F; $L_{0 \text{ ЛКЗ}} = 1,8 \text{ мм.}$

Коефіцієнти лінійного теплового розширення (а) [102,117]:

- Сталь 3: $\alpha = 11, 7 \cdot 10^{-6} \circ C^{-1};$
- Ultem 9085: $\alpha = 65,27 \cdot 10^{-6} \circ C^{-1}$;
- Мідь М1: $\alpha = 16,5 \cdot 10^{-6} \circ C^{-1}$.

Визначимо зміну довжини *ДL* для кожного елементу [11]:

Для втулки зі сталі 3: $\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 8,5 \cdot 11,7 \cdot 10^{-6} \cdot 270 = 0,0267$ мм; Для кронштейна з Ultem 9085: $\Delta L = 2,5 \cdot 65,27 \cdot 10^{-6} \cdot 270 = 0,0441$ мм; Для корпусу ЛКЗ з міді М1: $\Delta L = 1,8 \cdot 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot 270 = 0,008$ мм.

Визначено сумарний вплив термічного розширення на фокусну відстань:

$$\Delta F_{\text{терм.}} = \sum_{i=1}^{n} \pm \Delta L_{i} = 0,0267 - 0,0441 - 0,008 = -0,0254 \text{ MM}.$$

Результати розрахунку встановили, що фокусна відстань конструкції зменшується на 0,025 мм. Вплив теплового розширення на фокусну відстань є незначним і ним можна знехтувати.

ДОДАТОК Г

ВИМІРЮВАННЯ ГЛИБИНИ ПРОНИКНЕННЯ КС В НАПІВНЕСКІНЧЕННУ ПЕРЕШКОДУ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ МАРКИ 2219

Приклад процесу вимірювання глибини проникнення КС в напівнескінченну перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219 фрагменту № 1.1 по методиці наведеній в розділі 2.3.1 (Рис. Г.1).



Рис. Г.1. Результати вимірювання глибини проникнення КС для фрагмента № 1.1: а, б, с – ліва, середня та права частини фрагмента відповідно (збільшено)

ДОДАТОК Д

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ І ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

Статті, опубліковані в періодичних виданнях, проіндексованих у базах Scopus ma/aбo Web of Science або включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України:

1. Boliubash Y. Experimental determination of the focal distance of the cumulative pyrotechnic device of the separation system of the launch vehicle. *Tehnički glasnik. Technical Journal.* 2025. Vol. 19, No. 1. P. 142-148. URL: <u>https://doi.org/10.31803/tg-20240516182956</u> (Індексована: *Web of Science Core Collection (Emerging Sources Citation Index - ESCI); Scopus; EBSCOhost Academic Search Complete; EBSCOhost – One Belt, One Road Reference Source Product; ERIH PLUS etc.* Імпакт-фактор журналу: JIF(2023) = 0.7 (Q3)), [in English].

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

2. Дружинина О. А., Болюбаш Е. С. Термодеформационные процессы (усадка) в металле при проведении сварочных работ при изготовлении корпусных отсеков. Вісник дніпровського університету. № 4 том 26. Серія: Ракетно-2018. космічна техніка. Дніпро, Вип. 21. C. 27-33. URL: (Індексована Ulrichsweb (Ulrich's Periodicals https://doi.org/10.15421/451806 Directory, WorldCat, Index Copernicus, CrossRef, Vernadsky National Library of Ukraine, ResearchBible), [in Russian]. Особистий внесок здобувача: розробка концепції статті, визначення величини усадки матеріалу, зумовленої деформаціями та залишковими напруженнями, формулювання висновків.

3. Болюбаш Є.С. Експериментальне дослідження працездатності піротехнічних пристроїв системи розділення ракет-носіїв. *Космічна техніка*. *Ракетне озброєння. Space Technology. Missile Armaments*. Дніпро, 2024. Вип. № 1.

C. 121-128. URL: <u>https://doi.org/10.33136/stma2024.01.121</u> (Індексована *Crossref, Google, Ouci, Duckduckgo)*, [in Ukrainian].

4. Болюбаш Є.С. Формування ефективної фокусної відстані піротехнічних пристроїв систем розділення (відділення) ракети-носія. Огляд літератури. Вісник Дніпровського університету. Journal of Rocket-Space Technology. №4, Т.33, Серія: Ракетно-космічна техніка. Дніпро, 2024. Вип. 28. С. 26-37. URL: <u>https://doi.org/10.15421/452421</u> (Індексована Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Index Copernicus, CrossRef, Vernadsky National Library of Ukraine, ResearchBible), [in Ukrainian].

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Дружинина О. А., Болюбаш Е. С. Термодеформационные процессы (усадка) в металле при проведении сварочных работ при изготовлении корпусных отсеков. Збірник тез: ХХ міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», 11-13 квітня 2018 року. Дніпро, 2018. С. 202. Особистий внесок здобувача: ідея дослідження, розробка структури тез.

6. Болюбаш Є.С. Кумулятивний ефект та його використання для розділення ракетно-космічних елементів за допомогою піротехнічних пристроїв. Збірник доповідей. Матеріали XVII Наукових читань «Дніпровська орбіта — 2022» (26-28 жовтня). Дніпро, 2022. С. 10-15.

7. **Boliubash Y.** Section of a sheet metal by a shaped charge jet of a pyrotechnical device in rocket and space technology. *All-Ukrainian scientific and technical conference «Наука і металургія» 22-24 november. Ukrainian State University of Science and Technology of the MES of Ukraine.* Dnipro, 2022. P. 65-66.

8. Болюбаш Є.С. Методологія визначення зазорів між елементами піротехнічних пристроїв системи розділення відсіку корисного навантаження ракет-носіїв. Збірник матеріалів. Молодь: наука та інновації: матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року. Дніпро, 2022. С. 422-423.

9. Болюбаш Є.С. Зменшення зони можливого падіння аварійних РН за рахунок використання систем розділення ракетно-космічних елементів оснащених піротехнічними пристроями. *XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Збірник тез.* Дніпро, 2023. С. 229.

10. Болюбаш Є.С. Методика дослідження глибини проникнення кумулятивного струменя піротехнічного пристрою системи розділення ракетиносія. *Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. «Наука і металургія», м. Дніпро, 14-16 лис. 2023 р.* Дніпро, 2023. С. 77.

11. Lohvynenko A., **Boliubash Y**. Using pyrotechnic devices in the development of separation systems for rocket and space technologies. *75th International Astronautical Congress*. Milan, 2024. IAC-24,C2,IP,7,x83209. 1 р. *Особистий внесок здобувача: основна частина написання тексту тез, аналіз матеріалу*.

12. Болюбаш Є.С. Вплив фокусної відстані встановлення кумулятивного піротехнічного пристрою на розділення елементу конструкції ракети-носія. XXVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Збірник тез. Дніпро, 2024. С. 240-241.

13. Болюбаш Є.С. Використання лінійних кумулятивних зарядів для систем розділення в ракетно-космічній техніці. Збірник доповідей. Матеріали XIX Наукових читань «Дніпровська орбіта — 2024» (23-25 жовтня). Дніпро, 2024. С. 16-21.

14. **Boliubash Y**., Lohvynenko A. Using pyrotechnic devices in the development of separation systems for rocket and space technologies. *75th International Astronautical Congress*. Milan, 2024. IAC-24,C2,IP,7,x83209. 9 р. Особистий внесок здобувача: основна частина написання тексту доповіді, аналіз матеріалу, підготовка висновків.

15. Болюбаш Є.С. Визначення глибини проникнення кумулятивного струменю в перешкоду змінної товщини. *Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф.* «Наука і металургія», м. Дніпро, 19-20 лис. 2024 р. Дніпро, 2024. С. 47.