

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ПЕТРУЧЕНКО Оксана Степанівна



УДК 623.4.012

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОШАРОВОЇ ЗАХИСНОЇ  
КОНСТРУКЦІЇ БОЙОВИХ МАШИН НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНИХ  
МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора філософії (кандидата технічних наук)

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національній академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного Міністерства оборони України, м. Львів.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Величко Лев Дмитрович**,  
професор кафедри інженерної механіки (озброєння та техніки інженерних військ) факультету підготовки спеціалістів бойового (оперативного) забезпечення Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Ярошевич Микола Павлович**,  
завідувач кафедри обладнання лісового комплексу та теорії механізмів машин  
Луцького національного технічного університету

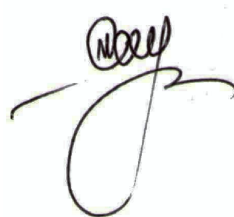
кандидат технічних наук, доцент  
**Гелетій Володимир Миколайович**,  
доцент кафедри технічної механіки та динаміки машин  
Національного університету «Львівська політехніка»

Захист відбудеться „18” квітня 2018 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1а, корпус 14, ауд. 61.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1) та на сайті Національного університету «Львівська політехніка» в розділі «Наука».

Автореферат розісланий „15” березня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06 к.т.н., доцент



Ю.П. ШОЛОВІЙ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Найбільш розповсюдженим захистом для військової техніки є броня та додатковий захист. Наявність бойових машин і їх роль у військових діях різко зросла, тому є потреба у захисті від дії елементів ураження (стрілецької зброї, гранат та снарядів), в умовах ведення ближнього бою.

Наявні теоретичні основи з проектування відповідної захисної конструкції вже не відповідають сучасним вимогам. Незважаючи на певні успіхи в дослідженні співудару твердих тіл, відомі результати теоретичних та експериментальних досліджень не описують цілісну картину взаємодії елементу ураження та перешкоди. Тому при розробці захисної конструкції для бойових машин (мається на увазі додатковий захист) враховують лише певні аспекти ударної взаємодії, в основі яких закладено поглинання кінетичної енергії елементу ураження. Дослідження впливу явища рикошету, наявності пружних зв'язків між елементами захисної конструкції, та кута нутації елементу ураження не в повній мірі враховані при розробці захисту.

Врахування цих факторів вимагає формулювання та розв'язання задач, оптимізації функціональних параметрів при створенні принципово нових і модернізації існуючих конструкцій. Дослідження впливу нелінійних залежностей пружних зв'язків, теорії непрямого пружно-пластичного удару, поведінки елементу ураження після пробиття частини захисної конструкції вимагають нових науково-технічних досліджень при розробці методики аналізу рівня захисту конструкції. На рівень захищеності також впливають як фізико-механічні властивості матеріалів, так конструктивні параметри елементу ураження і захисної конструкції. Під час їх взаємодії змінюється форма, маса та кінетична енергія елементу ураження, відбувається його фрагментування.

Так, розвиток досліджень процесу взаємодії елементу ураження і перешкоди, на етапах проникнення, пробивання і його вильоту, дозволить розробити нові зразки конструкції захисту, що є актуальним для військової промисловості України. Все це сприятиме підвищенню рівня захищеності та забезпеченню надійного і ефективного функціонування бойових машин.

Викладене дозволяє сформулювати важливе науково-технічне завдання: розробити методику оцінки дії елементу ураження на об'єкт захисту з метою обґрунтування вибору геометричних, фізико-механічних параметрів захисної конструкції, яка б підвищила рівень захищеності бойових машин від дії елементу ураження стрілецької зброї, гранат та снарядів.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана відповідно до Закону України № 3715-VI від 08.02.2011 р. «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» і спрямована на підвищення рівня захищеності особового складу і військової техніки. Основні теоретичні та практичні дослідження автор проводила у Національній академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного упродовж 2011-2018рр. відповідно до річних планів науково-технічної діяльності за тематикою «Аналіз експлуатації нових зразків озброєння та військової техніки»

номенклатури Сухопутних військ, прийнятих на озброєння у Збройних силах України”, (шифр “Експлуатація-СВ” № державної реєстрації 0101u001578).

Сформульоване завдання узгоджується з пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки в Україні на період до 2020 року, а саме: «Фундаментальні наукові дослідження з найважливіших проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави» (Закон України № 2519-VI від 9 вересня 2010 року).

**Мета і завдання дослідження.** *Метою дослідження є обґрунтування параметрів багатошарової захисної конструкції для підвищення рівня захищеності бойових машин від дії елемента ураження стрілецької зброї, гранат та снарядів з врахуванням багатофакторності процесу їх взаємодії на основі нелінійних математичних моделей.*

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан науково-технічних, технологічних, методологічних і практичних рішень, пов'язаних з процесами ударної взаємодії елемента ураження з перешкодою.

2. Дослідити вплив фізико-механічних і кінетичних характеристик елемента ураження та перешкоди на процеси їх взаємодії, якщо на переміщення перешкоди накладені геометричні обмеження.

3. Здійснити комплексне дослідження взаємодії елементів ураження і захисної конструкції на основі відповідних математичних моделей.

4. Дослідити вплив динаміки елемента ураження та фізико-механічних характеристик захисної конструкції на її геометричні параметри.

*Об'єкт дослідження* – процес взаємодії елемента ураження із захисною багатошаровою конструкцією.

*Предмет дослідження* – вплив геометричних та фізико-механічних параметрів багатошарової конструкції на підвищення рівня захисту бойових машин (об'єкту).

**Методи досліджень.** Методологічну основу викладених у дисертаційній роботі результатів досліджень складає системний підхід до аналізу рівня захисту бойових машин багатошаровою конструкцією. Створення математичних моделей, опису ударної взаємодії елемента ураження з пластинами конструкції, та теоретичних узагальнень базуються на загальній теорії пружності та пластичності, теоретичній механіці, методах інтегрального та диференціального числення, чисельних методах та використанні програмного забезпечення сучасних засобів обчислювальної техніки.

Основні теоретичні положення методу розрахунку захисної конструкції підтверджуються узгодженістю між теоретичними результатами та експериментальними дослідженнями.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що в дисертаційній роботі вперше:

- досліджено динаміку багатошарової захисної конструкції з підпружиненими пластинами та встановлено взаємозв'язок між властивостями їх матеріалів та нелінійно-пружної взаємодії елементів конструкції, що дало можливість сформулювати математичну модель взаємодії елемента ураження з конструкцією;

- удосконалено методи розрахунку ударної взаємодії елемента ураження із захисною конструкцією та досліджено характеристики їх етапів (проникнення, пробиття і вильоту), що дало можливість обґрунтувати параметри захисної конструкції з рознесеними пластинами;

- враховано положення теорії непрямого пружного та пружно-пластичного удару для визначення геометричних і фізико-механічних параметрів двошарової захисної конструкції та встановлено вплив характеристик елемента ураження на етапі вильоту з першої пластини конструкції, що використовується при визначенні віддалі між рознесеними пластинами.

**Достовірність результатів** отриманих в дисертаційній роботі забезпечується:

- коректністю математичного формулювання досліджених задач та використанням широко апробованих аналітичних методів;
- узгодженістю отриманих результатів з результатами інших авторів;
- несуперечністю отриманих результатів фізичним явищам, які є у захисних конструкціях;
- достатньою збіжністю теоретичних результатів з результатами експериментів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Захисні конструкції використовують як у цивільній, так і у військовій сфері для захисту різного роду об'єктів. Вони підвищують живучість об'єкту при виконанні поставлених перед ними завдань. Тому результати досліджень, що представлені в роботі у вигляді методики розрахунку і конструювання захисного спорядження, спрощують процес його проектування, що має важливе практичне значення. Теоретичні положення роботи доведені до практичної реалізації у вигляді нелінійних математичних моделей, які дозволяють визначити параметри захисної конструкції. Запропоновано алгоритм визначення геометричних та фізико-механічних параметрів захисної конструкції з урахуванням як прямого, так непрямого ударів елемента ураження по ній, а також впливу пружних характеристик матеріалу, з якого вона виготовлена.

Ця методика розрахунку використана при проектуванні експериментального зразка конструкції та знайшла практичне застосування при проведенні проектно-конструкторських робіт зі створення нових колісних транспортних засобів спеціального призначення на Державному підприємстві «Київський бронетанковий завод», (акт впровадження від 03.02.2017 р.); використана у навчальному процесі Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів (акт впровадження від 07.07.2017 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення, що становлять суть дисертаційної роботи, автор сформулювала й вирішила самостійно. У статтях виконаних у співавторстві, внесок автора вирішальний. Зокрема, автору належить у роботах: [1, 2] – опис математичної моделі динаміки бойового модуля, який розміщений на бойовій машині, та спосіб його захищеності; [3] – розроблений алгоритм вибору параметрів пружного шару; [7] – методика дослідження ступеня захищеності ствола вогневого засобу під дією високого внутрішнього тиску з врахуванням залишкових напружень; [8, 21] – дослідження впливу нелінійного підпружинення бойового модуля на його амплітудно-частотні характеристики; [9, 10] – порівняльний аналіз дії елемента ураження для різних типів захисної конструкції; [11, 17] – методика дослідження дії елемента ураження на пластину

захисної конструкції, яка побудована на теорії непрямого пружно-пластичного удару, та отримано аналітичне співвідношення для визначення максимального кута зіткнення, при якому відбувається явище відбиття (рикошет); [13, 18, 20] – математичне моделювання процесу взаємодії елемента ураження та багатошарової конструкції, в основі якої лежить нелінійно-пружна властивість шару, вибір її фізико-механічних параметрів та визначення величини силового навантаження захисної конструкції на об'єкт захисту; [14, 15, 16] – обґрунтування оптимальних геометричних параметрів захисної конструкції з врахуванням фізико-механічних властивостей матеріалу її елементів; [19, 22, 23] – формулювання задач, концепції напрямів досліджень, алгоритм аналітичного дослідження.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації були висвітлені в доповідях та обговореннях на науково-технічних конференціях: Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ, (м. Львів, 2013-2017 рр). [14, 16, 17, 20, 22];

LXXI науково-практичній конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету, (м. Київ, 2015 р.) [21];

VII–VIII науково-практичних конференціях «Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України», (м. Харків, 2016-2017 рр.) [15, 23];

третій всеукраїнській науково-практичній конференції, (м. Одеса, 2016 р.) [18].

Наукові результати доповідались у 2013-2017 рр. на щорічних наукових семінарах Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, а в повному обсязі – на науково-методичних семінарах кафедри інженерної механіки (озброєння та техніки інженерних військ) Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного (м. Львів) та кафедри механіки та автоматизації машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 23 наукові праці, в т.ч. 10 статей – у наукових фахових виданнях України (із них 3 – без співавторів, 1 – у виданні України, яке входить до міжнародної наукометричної бази РІНЦ), а також додатково відображено у 9 тезах доповідей на науково-технічних і науково-практичних конференціях та 4 патентах.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків та нараховує 134 сторінок основного тексту, 36 рисунків, 21 таблиця по тексту та переліку літератури з 138 позицій та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 160 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, її зв'язок з науково-дослідними темами установи, де вона виконана, сформульовано мету і завдання досліджень, висвітлено наукову новизну та достовірність отриманих результатів, їх теоретичне та практичне значення, зазначено кількість публікацій за темою

дисертації та особистий внесок здобувача у них, наведено відомості про апробацію результатів дисертації, її структуру та обсяг.

У **першому розділі** наведено огляд наукових праць, в яких розглядаються питання близькі до теми дослідження, тобто висвітлено стан проблеми рівня захищеності бойових машин та роботи пов'язані з визначенням кінематичних та динамічних характеристик взаємодії елемента ураження з твердим тілом.

Теорія, яка дозволяє досліджувати явище ударної взаємодії елемента ураження та перешкоди з врахуванням їх фізико-механічних властивостей, геометричних параметрів, динамічних, термодинамічних процесів та інших факторів у повному поєднанні не висвітлена.

Фундаментальні результати дослідження ударної взаємодії елемента ураження з твердим тілом досягнуто на основі експериментальних та аналітичних досліджень і наведені у працях Алексєєва П.Т., Битенського І.А., Буланова М.Д., Войцеховського В.Л., Голуба В.А., Гольдсмита В., Грещука Л.Б., Григоряна В.А., Забабахіна Є.І., Зукаса Дж.А., Іоффе А.Ф., Істоміна Б.В., Куррана Д.Р., Ламберта Дж.П., Миронова Г.В., Ніколаса Т., Платова А.І., Рототаєва Д.А., Свіфта Х.Ф., Форенталя М.В., Чепкова І.Б. та інших.

У них розглянуті:

- 1) експериментальні методи визначення фізико-механічних параметрів механічних систем при ударних навантаженнях;
- 2) аналітичні підходи дослідження динамічної взаємодії елемента ураження та перешкоди при використанні емпіричних формул;
- 3) методи скінченних елементів у дослідженні процесу пробиття перешкоди елементом ураження при ударному навантаженні;
- 4) методи зміцнення матеріалу перешкоди термічною обробкою її фронтальної частини.

Захисні конструкції, переважно, скеровані на зменшення вихідної кінетичної енергії елемента ураження. У цьому випадку покращення захисту досягають підвищенням міцності матеріалу, збільшенням товщини, пакетною структурою елементів конструкції, що тягне за собою зростання її маси, а це негативно впливає на тактико-технічні характеристики об'єкту захисту.

Наведене дозволяє стверджувати, що розробка технічних засобів для додаткового захисту бойових машин від ураження не знайшла повного висвітлення у наукових працях, тому виникла потреба комплексного підходу до вирішення вказаного завдання. Саме це і є предметом дисертаційної роботи і звідки впливає її актуальність.

У **другому розділі** розглядається задача зовнішньої балістики – визначення кінематичних параметрів елемента ураження в процесі його лету та в момент зіткнення з перешкодою. Запропонована емпірична формула лобового опору повітря

$$R_{\text{нов}}(t) = c \rho s \cdot (V(t))^{2+\gamma_i} \left( \frac{V(t)}{340,2} \right)^{\beta_i}, \text{ де величини } (\gamma_i, \beta_i; i=1,2) \text{ мають різні значення}$$

при надзвукових та дозвукових швидкостях елемента ураження. Для кулі випущеної з СВД теоретичні та експериментальні значення швидкості вказані в таблиці 1, в якій  $x$  – повна горизонтальна віддаль, яку пролетіла куля;  $V_{\text{теор}}$  – теоретична

швидкість кулі в момент обнуління траєкторії;  $V_{екс}$  – експериментальне значення швидкості кулі;  $\Delta$  – відносна різниця між теоретичними та експериментальними значеннями швидкостей кулі оцінена у відсотках.

Таблиця 1.

| $x, м$          | 200   | 300   | 400   | 500   | 600   | 700   | 800   | 900   | 1000  |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $V_{теор}, м/с$ | 680,2 | 613,3 | 551,5 | 494,5 | 442,0 | 393,8 | 349,7 | 322,1 | 302,2 |
| $V_{екс}, м/с$  | 685   | 618   | 554   | 495   | 441   | 392   | 350   | 320   | 302   |
| $\Delta, \%$    | -0,71 | -0,76 | -0,45 | -0,10 | 0,24  | 0,47  | -0,09 | 0,66  | 0,07  |

Також проведені дослідження про взаємодію елемента ураження з нерухомою та рухомою перешкодами у вигляді пластини. При цьому можливі такі випадки: відбиття (рикошет – елемент ковзає по поверхні перешкоди і змінює свій напрям руху); проникнення (елемент проникає в перешкоду і в ній застрягає); пробивання (елемент пробиває перешкоду і вилітає з її тилової сторони). Процес пробивання поєднує етапи: проникнення елемента в поверхню металевої пластини; пробивання її; виліт елемента із пластини.

У даному розділі розглядаються перших два етапи, тобто задачі проникнення елемента ураження в поверхню металевої пластини та пробивання ним нерухомої або рухомої пластини.

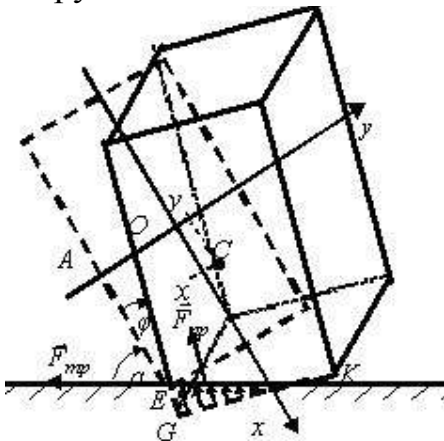


Рис. 1. Схема взаємодії моделі елемента ураження з металевою пластинною на етапі проникнення

Елемент ураження (стрілецької зброї, гранат та снарядів), на етапі проникнення в металеву пластину, моделюємо прямокутним паралелепіпедом з основою ( $b \times b$ ) та висотою  $L$ . Його маса  $m_1$  та швидкість, в момент торкання передньої поверхні нерухомого тіла, –  $\vec{V}_{10}$ . За умов:

- модель елемента ураження не ковзає по поверхні металевої пластини (рис. 1);

- деформується тільки елемент ураження (деформація вказана  $\Delta EGK$ );

- під час проникнення елемента ураження в тіло, зміна моменту інерції його незначна і нею нехтують;

- вважаємо, що елемент ураження перебуває у плоскому русі.

Положення елемента ураження в довільний момент часу визначається координатами:  $x$ ,  $y$  – переміщення центру мас елемента ураження;  $\varphi$  – кут обертання елемента ураження.

Система диференціальних рівнянь, яка описує динаміку взаємодії елемента ураження та металевої пластини, має вигляд

$$m_1 \ddot{x} = -F_{np} \cos \varphi - F_{mp} \cos \alpha; \quad (1)$$



$$I_C \ddot{\varphi} = F_{np} \left( 0,5b - \frac{\Delta l_{\max} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{3} \right) + F_{mp} \left( 0,5\sqrt{b^2 + L^2} \sin(\alpha + \gamma + \varphi) - \Delta l_{\max} \sin(\alpha + \varphi) \right),$$

при початкових умовах  $x(0) = 0, \dot{x}(0) = V_{10}, \varphi(0) = 0, \dot{\varphi}(0) = 0$ . Де  $\alpha$  – кут між напрямком швидкості елемента ураження, в момент співудару тіл, з дотичною до поверхні металевої пластини;  $\gamma = \angle AEO$ ,  $O$  – положення центру мас елемента ураження в початковий момент її дотику до поверхні пластини і є центром вибраної системи координат  $Oxy$ ; вісь  $x$  скерована за напрямком швидкості елемента ураження в початковий момент часу;  $C$  – положення центру мас елемента ураження в довільний момент часу, ( $O=C$  в початковий момент часу),  $I_C$  – момент інерції елемента ураження відносно осі, перпендикулярної до площини  $Oxy$ , яка проходить через її центр мас,  $F_{np}(t)$  – сила пружності зумовлена деформацією елемента ураження, ( $\Delta l_{\max} = EG$  – деформація елемента ураження на рис.1)  $F_{mp}(t)$  – сила тертя в зоні контакту елемента ураження з поверхнею металевої пластини.

Вважаємо, що елемент ураження не проникатиме в тіло до того моменту, поки виконується нерівність

$$F_{np}(t) \sin(\alpha + \varphi(t)) \leq R_{on}, \quad (2)$$

де  $R_{on}$  – середнє значення сили опору металевої пластини, величина якої залежить від фізико-механічних властивостей взаємодіючих тіл та геометричних параметрів елемента ураження.

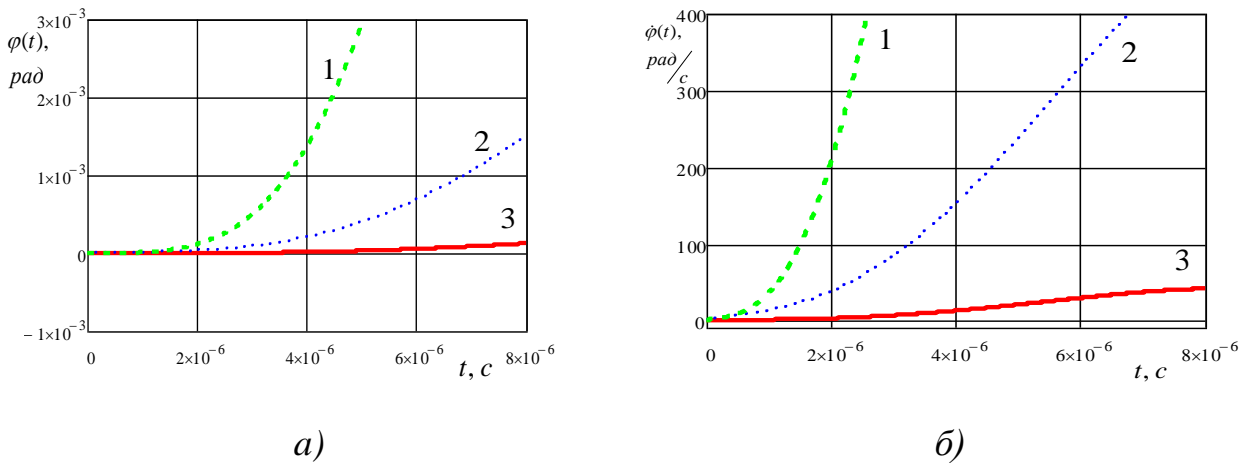


Рис. 2. Зміни в часі а) кута обертання та б) кутової швидкості елемента ураження за різних значень пружності його матеріалу ( $c$ ):  $1 - c = 36 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$ ,

$$2 - c = 36 \cdot 10^8 \text{ Н/м}, 3 - c = 36 \cdot 10^7 \text{ Н/м}.$$

При побудові графіків надавались такі значення величинам:  $F_{mp} = 500 \text{ Н}$ ,  $R_{on} = 40000 \text{ Н}$ ,  $\alpha = 60^\circ$  і  $V_{10} = 800 \text{ м/с}$ ,  $F_{np}(t)$  – змінна величина, яка залежить від  $c$ .

Отримані результати при різних значеннях параметрів  $F_{mp}$ ,  $c$ ,  $\alpha$  і  $R_{on}$  дозволяють стверджувати:

- величина кута обертання  $\varphi(t_k)$  та кутова швидкість  $\dot{\varphi}(t_k)$  елемента ураження в кінці першого етапу зростають при збільшенні його пружності матеріалу;

- на етапі проникнення елемент ураження намагається зайняти перпендикулярне положення до площини поверхні металевої пластини;

- збільшення величини сили опору металевої пластини супроводжується збільшенням тривалості етапу проникнення;

- суттєвим під час співудару тіл є велике значення кутової швидкості елемента ураження  $\dot{\varphi}(t_k)$ , і чим більша його початкова швидкість  $V_{10}$ , тим менша буде величина кутової швидкості;

- при зменшенні кута  $\alpha$  тривалість етапу проникнення збільшується.

**На етапі пробивання** розглянуто взаємодію елемента ураження з нерухомим та рухомим тілами. У випадку рухомого тіла досліджено вплив силових характеристик підпружинення на кінематичні та динамічні параметри взаємодії тіл. Для цього, відповідно до фізичної моделі (рис. 3), побудовано математичну модель динаміки процесу за умови нелінійно-пружних характеристик системи підпружинення

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) &= -R_{on}; \\ m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_2\ddot{x}_2 &= -cx_2^\gamma, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $x_1$  – координата елемента ураження відносно рухомої системи координат, початок якої закріплений на передній поверхні  $AB$  тіла,  $x_2$  – координата передньої поверхні  $AB$  тіла відносно нерухомої системи координат  $Oxz$ ,  $m_2$  – маса перешкоди,  $F_{np} = -cx_2^\gamma$  – сила пружності,  $c$  – коефіцієнт пружності матеріалу, а  $\gamma > 0$  характеризує нелінійність пружних властивостей проміжного шару.

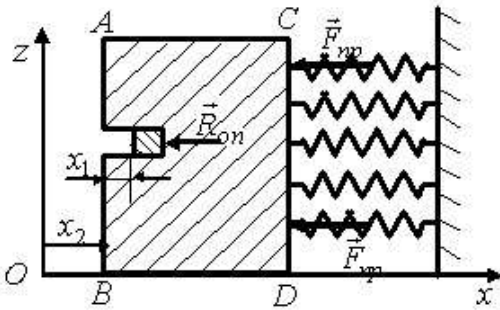


Рис. 3. Схематичне зображення взаємодії елемента ураження з підпружиненою перешкодою

Початкові умови, які відповідають диференціальним рівнянням (3), наступні:  $x_1(0) = 0$  і  $\dot{x}_1(0) = V_{10}$ ,  $x_2(0) = 0$  і  $\dot{x}_2(0) = 0$ .

Зінтегрувавши рівняння (3), за наведених вище умов, отримуємо неявну залежність переміщення та швидкості тіла від часу

$$\begin{aligned} \dot{x}_2(t) &= \sqrt{\frac{2R_{on}}{m_2} x_2 - \frac{2c}{m_2} \frac{x_2^{\gamma+1}}{\gamma+1}}, \\ t &= \int_0^{x_2} \frac{dx}{\sqrt{\frac{2R_{on}}{m_2} x - \frac{2c}{m_2} \frac{x^{\gamma+1}}{\gamma+1}}}; \end{aligned} \quad (4)$$

Тривалість руху елемента ураження  $t_k$  у пластині визначається з рівнянь:

$$\begin{cases} V_{10}t_k - \frac{R_{on}t_k^2}{2m_1} - x_2(t_k) = l_2 - \text{для випадку пробивання ЕУ перешкоди,} \\ V_{10} - \frac{R_{on}}{m_1}t_k - \sqrt{\frac{2R_{on}}{m_2}x_{2k} - \frac{2c}{m_2}\frac{x_{2k}^{\gamma+1}}{\gamma+1}} = 0 - \text{для випадку проникнення (застрягання),} \end{cases} \quad (5)$$

де  $l_2$  – товщина металевої пластини,  $x_{2k} = x_2(t_k)$  – величина стиску підпружинення.

Величина максимального тиску підпружинення на поверхню об'єкту захисту, коли елемент ураження застрягає у твердому тілі, дорівнює

$$F_{\text{тиску}} = c \left( x_{2k}^{\gamma+1} + \frac{(m_1 + m_2)(\gamma + 1)(\dot{x}_2(t_k))^2}{2c} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}}. \quad (6)$$

Тривалість  $t_k$  пробиття кулею, випущеної з СВД, пластини при значеннях  $c = 4 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ,  $m_2 = 0,5 \text{ кг}$ ,  $V_{10} = 700 \text{ М/с}$  і  $l_2 = 0,03 \text{ м}$  в залежності від величини опору  $R_{on}$  матеріалу пластини

|                            |       |       |       |        |       |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| $R_{on}, \text{Н}$         | 10000 | 20000 | 30000 | 40000  | 50000 | 60000 | 70000 |
| $t_k \cdot 10^5, \text{с}$ | 4,435 | 4,609 | 4,818 | 5,0775 | 5,420 | 5,919 | 6,790 |

Отримані аналітичні залежності показують, що:

- у випадку застрягання елемента ураження в тілі або його пробиття вплив сумарної пружності  $c$  підпружинення на величини  $t_k$ ,  $\dot{x}_2(t_k)$ ,  $x_2(t_k)$  не є суттєвим;
- зі збільшенням пружності підпружинення величина його максимальної деформації  $x_{\text{max}}$  зменшується, а сила тиску  $F_{\text{тиску}}$  на нерухому поверхню, до якої він торкається, зростає;
- зменшення максимальної величини тиску підпружинення на нерухому поверхню, при обмеженні на величину деформації, досягається тоді, коли закон нелінійності між величиною сили пружності та деформацією має регресивну залежність, тобто  $F_{np} = -cx_2^\gamma$ , де  $\gamma < 1$ .

**Третій розділ** присвячений дослідженню дії елемента ураження на об'єкт захисту у випадку явища рикошету:

- описано явище рикошету елемента ураження при його ударі об захисну пластину;
- сформульовано необхідні умови для здійснення цього явища;
- проаналізовано вплив підпружинення захисних пластин на величину кінетичних параметрів пластин та елемента ураження при їх взаємодії;
- проведено експериментальні дослідження, які підтверджують теоретичні розрахунки;
- досліджено взаємозв'язок між пластинами захисту у випадку непрямого удару елемента ураження в передні пластини.

Для дослідження явища рикошету використано теорему про зміну кількості руху матеріальної точки, гіпотезу Ньютона про співудар тіл і припущення, що елемент ураження відбивається від поверхні перешкоди, якщо величина її нормальної реакції  $F_{2n}$  менша від величини сили опору  $R_{2on}$  матеріалу перешкоди. В результаті отримали, що:

- величину кута  $\beta_1$ , під яким елемент ураження відбивається від поверхні перешкоди, визначають з рівності  $\text{tg}\beta_1 = k_1 \text{tg}\alpha_1$ , де  $k_1$  – коефіцієнт відновлення;

- швидкість елемента ураження після рикошету –  $V_{1k} = V_{10} \cos \alpha_1 \sqrt{1 + k_1^2 \tan^2 \alpha_1}$  ;

- сила нормального тиску елемента ураження на нерухому пластину захисної конструкції визначається з формули  $F_{2n} = \frac{m_1(1+k_1)V_{10} \sin \alpha_1}{t_1}$  ; а для рухомої –

$$F_{12n} = \frac{m_1(V_{1k} \sin \beta + V_{10} \sin \alpha)}{(1 + \sin^2 \alpha) t_k}$$

числове значення  $F_{12n}$  є менше від  $F_{12n}$  до 35% .

- величина кута падіння  $\alpha_{1\max}$  , при якому елемент ураження буде відбиватися від поверхні перешкоди (рикошет), визначається з співвідношення

$$\sin \alpha_{1\max} \leq \frac{R_{2on} t_1}{m_1(1+k_1)V_{10}} \quad (\text{рис.4}).$$

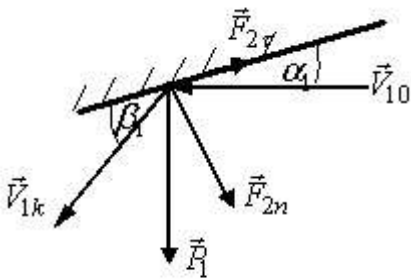


Рис. 4. Схема удару елемента ураження об поверхню перешкоди у випадку відбивання (рикошету)

а тому рикошет можливий при меншому куті падіння;

- при більшій швидкості елемента ураження, пробиття поверхні перешкоди зростає, а рикошет можливий при меншому куті падіння;

- при умові більшої тривалості контакту елемента ураження з поверхнею перешкоди, можливість пробиття поверхні перешкоди зменшується, отже, рикошет можливий при більшому куті падіння.

Були проведені експериментальні дослідження частини захисної конструкції, яка показана на рис. 5-7. Її пластини виготовлені зі Ст. 4 товщиною 0,004 м та підпружинені гумовим армованим шлангом.



Рис. 5. Жорстко закріплена металева пластина



Рис. 6. Підпружинена металева пластина



Рис. 7. Слід від явища рикошету елемента ураження на підпружиненій металевій пластині

Здійснювалась стрільба з СВД та АКМ-74 по експериментальному зразку встановленому на віддалі 50 м, при різних значеннях кута між напрямком швидкості і площиною пластини. Значення кута змінювалося від  $20^{\circ}$  до  $40^{\circ}$  з кроком  $5^{\circ}$ . Результати випробувань при стрільбі з СВД для випадків: 1. при жорстко закріпленій захисній пластині; 2. – підпружиненій захисній пластині наступні:

| кут   | $20^{\circ}$ |          | $25^{\circ}$ |          | $30^{\circ}$ |          | $35^{\circ}$ |          | $40^{\circ}$ |          |
|-------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| явище | Рикошет      | Пробиття | Рикошет      | Пробиття | Рикошет      | Пробиття | Рикошет      | Пробиття | Рикошет      | Пробиття |
| 1.    | 9            | 1        | 6            | 4        | 3            | 7        | 0            | 10       | 0            | 10       |
| 2.    | 10           | 0        | 8            | 2        | 6            | 4        | 1            | 9        | 0            | 10       |

Аналіз проведеного експерименту показав, що для металевої пластини з Ст.3 товщиною 0,004м, та жорстко закріпленої явище рикошету кулі випущеної з СВД має місце при  $\alpha < 18^{\circ}$ , а для підпружиненої –  $\alpha < 21^{\circ}$ . Тобто результати експерименту підтверджують теоретичні дослідження, що підпружинення пластини захисної конструкції дозволяє зменшити величину сили нормального тиску на неї.

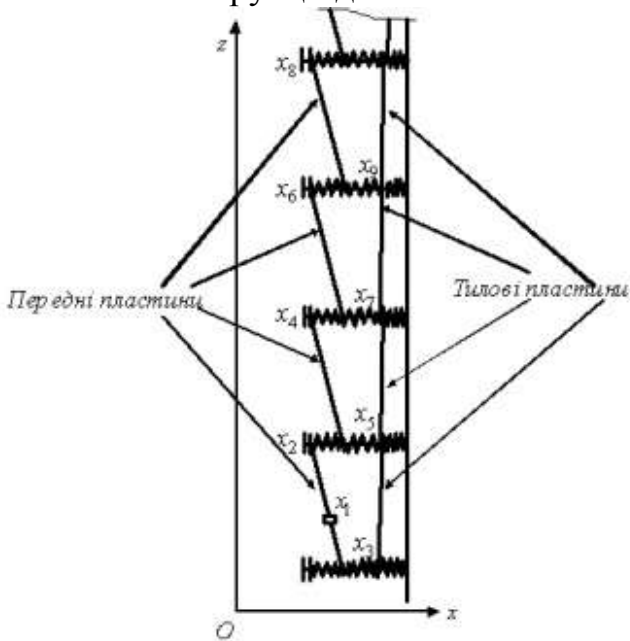


Рис. 8. Загальна схема захисної конструкції з рознесеними пластинами

Проведені аналітичні дослідження є базою для практичних рекомендацій, щодо створення захисної конструкції з рознесеними пластинами (рис. 8). Вважалось, що внаслідок динамічної дії елементу ураження на пластини, вони здійснюють лише горизонтальні переміщення.

Якщо  $n$  це кількість пластин, то механічна система має  $2n+1$  ступені вільності. Нехай  $x_1$  – координата руху елементу ураження відносно пластини,  $x_2, x_3, \dots, x_{2n+1}$  – узагальнені координати, які визначають положення пластин захисної конструкції. Рух механічної системи описується рівняннями:

$$\begin{aligned}
 m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) &= -R_{onip}, \\
 m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_2\ddot{x}_2 &= -c_1(x_2 - x_4) - c_2(x_2 - x_3), \\
 m_3\ddot{x}_3 &= c_2(x_2 - x_3) - c_3x_3, \\
 m_2\ddot{x}_4 &= -c_1(x_4 - x_6) - c_2(x_4 - x_5) + c_1(x_2 - x_4), \\
 m_3\ddot{x}_5 &= c_2(x_4 - x_5) - c_3x_5, \\
 m_2\ddot{x}_6 &= -c_1(x_6 - x_8) - c_2(x_6 - x_7) + c_1(x_4 - x_6) \text{ і т.д.},
 \end{aligned} \tag{7}$$

де  $m_2$  – маса кожної передньої пластини, які розміщені під кутом до горизонту,  $m_3$  – маса кожної тілової пластини, які розташовані вертикально,  $c_i$  ( $i=1,2,3$ ) – відповідно коефіцієнти пружності лівого, середнього і правого пружного елементів (рис. 8).

Результати аналізу розв'язку вказаної системи диференціальних рівнянь (для випадку  $n=1,2$ ), показують, що:

- при попаданні елемента ураження в передню пластину, інші пластини, в час взаємодії елемента ураження з нею, майже не сприймають силу удару;
- тільки пластина, в яку влучив елемент ураження, отримує швидкість певної величини;
- якщо ж елемент ураження пробиває передню пластину захисної конструкції з рознесеними пластинами, то спрацьовує наступна (тилова).

У **четвертому розділі** проведено математичне моделювання та аналіз динаміки системи (елемент ураження – захисна конструкція) для того, щоб обґрунтувати параметри двошарової конструкції. У ній передній шар – твердий метал, а тиловий – нелінійно-пружний матеріал. Залежність величини сили удару від фізико-механічних характеристик тилового шару, нелінійно-пружних властивостей, які описуються співвідношенням  $F_{пруж} = c(\Delta x_{\max})^\gamma$ , при обмеженнях на максимальну деформацію пружного шару  $\Delta x_{\max}$ , за умови, що елемент ураження застрягає в ньому ( $x_1(t_k) = l_2$ ,  $\dot{x}_1(t_k) = 0$ ), показано в таблиці 2.

Таблиця 2

Значення максимального тиску на об'єкт захисту  $F_{пруж} = F_{\max}$  за різних значень  $(c, \gamma)$  фізико-механічних характеристик тилового шару

| $c, \text{H/м}$ | $\gamma = 0,5$              |                      | $\gamma = 0,75$             |                      | $\gamma = 1$                |                      | $\gamma = 2$                |                      |
|-----------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|
|                 | $\Delta x_{\max}, \text{м}$ | $F_{\max}, \text{H}$ | $\Delta x_{\max}, \text{м}$ | $F_{\max}, \text{H}$ | $\Delta x_{\max}, \text{м}$ | $F_{\max}, \text{H}$ | $\Delta x_{\max}, \text{м}$ | $F_{\max}, \text{H}$ |
| 400             | 0,307                       | 222                  | 0,397                       | 200                  | 0,471                       | 188                  | 0,698                       | 195                  |
| 1000            | 0,167                       | 408                  | 0,235                       | 338                  | 0,301                       | 301                  | 0,514                       | 264                  |
| 4000            | 0,066                       | 1028                 | 0,106                       | 745                  | 0,149                       | 595                  | 0,324                       | 420                  |
| 8000            | 0,041                       | 1631                 | 0,072                       | 1107                 | 0,106                       | 852                  | 0,257                       | 529                  |
| 10000           | 0,036                       | 1893                 | 0,063                       | 1257                 | 0,095                       | 952                  | 0,239                       | 570                  |
| 40000           | 0,014                       | 4756                 | 0,028                       | 2776                 | 0,047                       | 1883                 | 0,150                       | 904                  |
| 60000           | 0,011                       | 6221                 | 0,023                       | 3499                 | 0,039                       | 2332                 | 0,131                       | 1035                 |

Із наведених результатів випливає, що найменша величина силової дії на об'єкт захисту, при обмеженій величині деформації тилового шару, буде при значеннях параметра  $\gamma < 1$ .

Стосовно захищеності об'єкту конструкцією, (рис. 8), то вплив фізико-механічних властивостей матеріалу захисних пластин, та геометричних їх параметрів на ділянки захищеності та ураження, отримано аналітично.

У цьому ж розділі розглянуто кінетику елемента ураження під час його вильоту з металеві пластини. У ній утворюється вирва, яка впливає на подальший рух елемента ураження, тобто відбувається зміна як величини, так і напрямку його швидкості. Цей чинник є дуже важливим під час проектування захисної конструкції з рознесеними пластинами (рис.9).

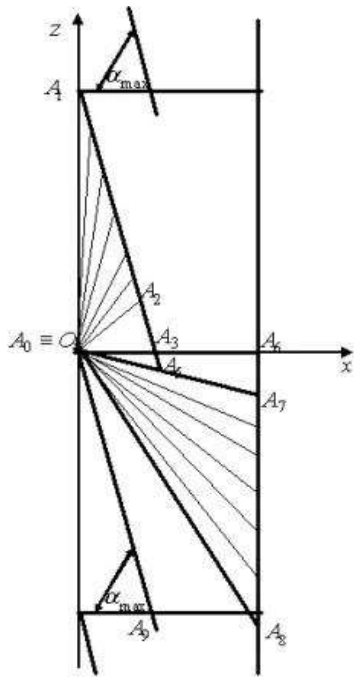


Рис. 9. Схематичне зображення ділянок захищеності та ураження захисної конструкції

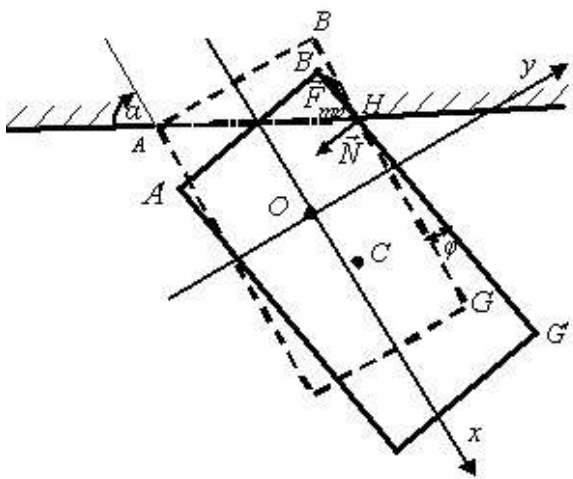


Рис. 10. Схематичне зображення елемента ураження та захисної пластини на етапі його вильоту з неї  
Диференціальні рівняння руху елемента ураження мають вигляд:

$$m\ddot{x} = -F_{mp} \cos\varphi + N \sin\varphi; I_C\ddot{\varphi} = 0,5F_{mp}b + N(0,5L - \Delta_k + \Delta l), \quad (9)$$

де  $x$  і  $y$  – координати центра мас тіла в довільний момент часу,  $\alpha$  – кут між швидкістю  $\vec{V}_{10z}$  і поверхнею пластини. Початкові умови для системи (9) мають вигляд  $\varphi(0) = 0, \dot{\varphi}(0) = 0, x(0) = 0, \dot{x}(0) = V_{10z}$ .

У формулах (9)  $I_C$  – момент інерції елемента ураження відносно осі перпендикулярної до площини рисунка, яка проходить через його центр мас,  $BH = \Delta_k$  – довжина частини елемента ураження, яка міститься в металевій пластині в початковий момент часу,  $\Delta l$  – величина переміщення точки  $B$  відносно осі  $Ox$ ,  $\varphi$

Наприклад, якщо елемент ураження проходить через точку  $A_0(0,0)$  і:

- влучає в ділянки  $A_1A_2$ ,  $A_3A_5$  і  $A_7A_8$ , то він відбивається від пластини;

- влучає в ділянку  $A_2A_3$ , то він застрягає або пробиває пластину (в залежності від швидкості елемента ураження).

Для того, щоб уникнути прямого влучення в тилову пластину, мінімальна довжина передньої захисної пластини, має визначатися з рівняння

$$l_{1min} = \frac{h(\sin(2\alpha_{max} - 90^\circ) + \text{ctg}\alpha_{max} \cos\alpha_{max})}{\sin\alpha_{max} \sin(2\alpha_{max} - 90^\circ)}, \quad (8)$$

де  $h$  – віддаль між точками  $O$  і  $A_1$ ,  $\alpha_{max}$  – кут нахилу пластин  $A_1A_5$  і  $OA_9$  до горизонту.

Для визначення віддалі між рознесеними пластинами вважається, що під час взаємодії елемента ураження з передньою металевою пластинною на нього, зі сторони пластини, діють сила тертя  $\vec{F}_{mp}$  і нормальна реакція  $\vec{N}$ . Якщо перша зумовлена трибологічними властивостями поверхонь тіл, що взаємодіють, то друга – пружними властивостями металевої пластини. Вважається, що елемент ураження є тверде тіло, яке перебуває у плоскому русі та в процесі вильоту з металевої пластини весь час її торкається в точці  $H$  (рис. 10).

– величина кута обертання елемента ураження (кута нутації) відносно його центра мас (додатна величина відліку кута проти руху стрілки годинника),  $V_{10z}$  – початкова швидкість вильоту елемента ураження з металевої пластини.

Розв'язок цієї задачі для кулі випущеної з СВД при  $V_{10z} = 500 \frac{m}{c}$  і  $\alpha = 60^0$  вказано в таблиці 3.

Таблиця 3.

|            | $F_{mp} = 5H$                       | $F_{mp} = 50H$                     | $F_{mp} = 500H$                    | $F_{mp} = 5000H$                  |
|------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| $N = 0,1H$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 0,20 c^{-1}$  | $\dot{\varphi}(t_k) = 1,91 c^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 19,0 c^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 191 c^{-1}$ |
| $N = 1H$   | $\dot{\varphi}(t_k) = 0,33 c^{-1}$  | $\dot{\varphi}(t_k) = 2,04 c^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 19,1 c^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 192 c^{-1}$ |
| $N = 10H$  | $\dot{\varphi}(t_k) = 1,583 c^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 3,29 c^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 20,4 c^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 193 c^{-1}$ |
| $N = 100H$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 14,1 c^{-1}$  | $\dot{\varphi}(t_k) = 15,8 c^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 32,9 c^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 205 c^{-1}$ |

Аналіз отриманого розв'язку системи рівнянь (9) дозволяє стверджувати, що впродовж вильоту елемента ураження з металевої пластини: величина його швидкості майже не змінюється; чим більша сила тертя між елементом ураження та металевою пластиною, тим його кутова швидкість нутації буде більшою; збільшення кута між вектором початкової швидкості центру мас елемента ураження і дотичною до поверхні металевої пластини приводить до зменшення кутової швидкості нутації елемента ураження; чим менша величина початкової швидкості елемента ураження, тим його кутова швидкість нутації буде більша.

У розділі також досліджено вплив геометрії вершини елемента ураження та величини кута нутації на рівень захищеності об'єкту. Визначена умова, при якій значно збільшується кулестійкість захисної конструкції з рознесеними пластинами.

У додатках міститься опис експериментальних досліджень здійснених на навчально-тренувальному комплексі (загальновійськовий) військової частини польова пошта В4264 в період з 26 по 29 квітня 2016 року згідно програми науково-дослідної роботи за шифром "Експлуатація-СВ", апробації теоретичних результатів щодо підвищення рівня захищеності бойових машин та план проведення експерименту; подано акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язане науково-технічне завдання, суть якого полягає у розробці методики оцінки дії елемента ураження на об'єкт захисту з метою обґрунтування геометричних, фізико-механічних параметрів конструкції, яка б забезпечувала максимальну захищеність особового складу та бойових машин від дії елемента ураження стрілецької зброї, гранат та снарядів.

Внаслідок проведених досліджень отримано нові наукові та практичні результати:



1. На підставі проведеного детального аналізу сучасного стану науково-технічних, технологічних, методологічних та практичних досліджень ударної взаємодії елемента ураження з перешкодою, встановлено, що існуючі захисні конструкції для бойових машин базуються на поглинанні кінетичної енергії елемента ураження. Однак вони не повністю забезпечують успішне виконання поставлених завдань у зв'язку з мобільністю бойових дій та з нарощенням пробивної здатності елемента ураження.

2. Здійснено комплексне дослідження взаємодії елемента ураження та пластин захисної конструкції з врахуванням їх геометричних, фізико-механічних та кінетичних параметрів на різних етапах і побудовано відповідні математичні моделі опису процесів. Отримано аналітичні залежності для визначення максимального кута непрямого удару; кута нутації елемента ураження, кінематичних параметрів взаємодіючих тіл та геометрії передньої пластини перешкоди, на етапах проникнення, пробиття та вильоту. Підтверджено експериментально доцільність використання пружних зв'язків між пластинами захисної конструкції, що дозволяє зменшити величину динамічної силової дії елемента ураження на них.

Аналіз проведеного експерименту показав, що для металевої пластини з Ст.3 товщиною 0,004м, та жорстко закріпленої явище рикошету кулі випущеної з СВД має місце при  $\alpha < 18^\circ$ , а для підпружиненої –  $\alpha < 21^\circ$ .

3. Вперше описано залежність сили лобового опору повітря від: коефіцієнту, який враховує аеродинамічність форми кулі; максимальної площі поперечного перерізу кулі площиною перпендикулярною до напрямку її швидкості; швидкості кулі; швидкості звуку в повітрі; густини повітря при надзвуковій та дозвуковій швидкостях. Різниця між теоретичними результатами і експериментальними даними кінематичних параметрів кулі не перевищує по модулю 1%.

4. Показано, що у випадку двошарової захисної конструкції наявність тилового шару з регресивно пружною характеристикою дозволяє зменшити силове навантаження на об'єкт захисту в 1,2-1,4 рази у порівнянні із одинарним захисним спорядженням з такого ж матеріалу і аналогічної товщини.

5. Досліджено вплив фізико-механічних, конструктивних, кінетичних характеристик елемента ураження і захисної конструкції на рівень захисту об'єкту та отримано аналітичні залежності для визначення оптимальних параметрів захисної конструкції. Проведені дисертаційні дослідження дають можливість розробити структуру пакету захисної конструкції для бойових машин.

6. Результати та висновки дисертації використані та підтверджені офіційними актами. Розроблений у дисертації комплексний підхід до дослідження взаємодії елемента ураження з металевою пластиною використано при виконанні науково-дослідної роботи шифру «Швидкість-Б», при проведенні проектно-конструкторських робіт зі створення нових зразків колісних транспортних засобів спеціального призначення фахівцями Державного підприємства Київського бронетанкового заводу, в наукових розробках кафедри Інженерної механіки (озброєння та техніки інженерних військ) Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ АВТОРОМ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Величко Л.Д. Оцінка впливу характеристик підпружинення на коливання встановлених на транспортні засоби об'єктів / Л.Д. Величко, О.С. Петрученко, А.О. Дзюба // *Машинобудування та металообробка, Інженерна механіка, Металургія та матеріалознавство*. – Луцьк: ЛНТУ. – 2014. – Вип. 46. – С. 50-54.

2. Сокіл Б.І. Коливні процеси гусеничного ободу військових машин під дією короткотривалих збурень та їх стійкість / Б.І. Сокіл, І.І. Верхола, О.С. Петрученко // *Вібрації в техніці та технологія*. – Всеукраїнський науково-технічний журнал. – Вінниця: ВНАУ. – 2014. – Вип. 4(76). – С. 85-89.

3. Петрученко О.С. Особливості вибору параметрів жорсткості рухомого об'єкта з урахуванням його багатомасовості / О.С. Петрученко, Л.Д. Величко, О.І. Хитряк // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2014. – Вип. 24. 11. – С. 357-362.

4. Пат. на корисну модель 95611 Україна, МПК (2014.01) Гасіння вимушених коливань / Л.Д. Величко, О.С. Петрученко, Б.І. Сокіл // *Заявник та власник АСВ–№u201408485 заяв. 25.07.14 // опубл.25.12.2014, Бюл. № 24.*

5. Пат. на корисну модель 103484 Україна, МПК(2015.01) Система зменшення кінетичної енергії кулі або осколка снаряду / Л.Д. Величко, О.С. Петрученко, Б.І. Сокіл // *Заявник та власник НАСВ–№u201500072 заяв. 05.01.15 // опубл.25.12.2015, Бюл. № 24.*

6. Пат. на корисну модель 110456 Україна, МПКF41H1/02 Бронезахист / Л.Д. Величко, О.С. Петрученко, В.В. Червінчак // *Заявник та власник НАСВ – №u201603601 заяв. 05.04.16// опубл.10.10.2016, Бюл. № 19.*

7. Сокіл Б.І. Залишкові напруження в циліндричному елементі ствола під тиском / Б.І. Сокіл, М.Г. Стащук, О.С. Петрученко // *Військово-технічний збірник / Академія сухопутних військ*. – №2(7). – Львів: АСВ, 2012. – С.112-116.

8. Петрученко О.С. Вплив нелінійного підпружинення бойового модуля на його амплітудно-частотні характеристики / О.С. Петрученко // *Військово-технічний збірник / Академія сухопутних військ*. – № 12. Львів: АСВ, 2015. – С. 45-49.

9. Петрученко О.С. Зменшення ефективної дії кулі, осколка снаряду на об'єкт захисту / О.С. Петрученко, Л.Д. Величко, О.І. Хитряк // *Військово-технічний збірник / Академія сухопутних військ*. – №12. – Львів: АСВ, 2015. – С. 65-69.

10. Величко Л.Д. Динаміка захисної конструкції при ударі кулі або осколка снаряда / Л.Д. Величко, О.С. Петрученко, В.Ф. Кондрат // *Військово-технічний збірник / Академія сухопутних військ*. – № 13. – Львів: АСВ, 2015. – С. 13-19.

11. Петрученко О.С. Щодо вивчення взаємодії кулі чи осколка снаряда з перешкодою / О.С. Петрученко // *Збірник наукових праць Військової академії*. – Одеса: ВА, 2015. – Вип. 2(4). – С.74-81.

12. Пат. на корисну модель 103351 Україна, МПКF41H5/00 Система захисту від дії куль, осколків снаряду на об'єкт / П.П. Ткачук, Л.Д. Величко, О.С. Петрученко,

Б.І. Сокіл // Заявник та власник НАСВ–№u201506395 заяв. 30.06.15 // опубл.10.12.2015, Бюл. № 23.

13. Петрученко О.С. Тиск броні на об'єкт захисту при дії куль чи осколків за нелінійності пружних властивостей підкріплюючого шару / О.С. Петрученко // Військово-технічний збірник / Національна академія сухопутних військ. – № 14. – Львів: НАСВ, 2016. – С. 44-50.

14. Петрученко О.С. До математичного моделювання взаємодії вражаючих факторів з плоскими броньовими листами / О.С. Петрученко, В.Ф. Кондрат, Л.Д. Величко // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – Львів: НАСВ, 2016. – С. 50.

15. Петрученко О.С. Вплив геометрії захисного обладнання на пробивну його здатність / О.С. Петрученко, Л.Д. Величко, В.Ф. Кондрат // Збірник тез доповідей VII науково-практичної конференції. – Харків: НАНГУ, 2016. – С. 106.

16. Пелех М.П. Вплив кінематичних параметрів елементів вібраційної машини на інтенсивність зміцнення деталей військової техніки / М.П. Пелех, О.С. Петрученко // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – Львів: АСВ, 2015. – С. 47.

17. Пак Р.М. Вплив характеристики підвіски транспортного засобу та способу підпружинення вантажу, що транспортується, на його коливання / Р.М. Пак, О.С. Петрученко // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – Львів: АСВ, 2014. – С. 66.

18. Петрученко О.С. Зміна напрямку кількості руху вражаючого фактору та рівень захищеності об'єкту / О.С. Петрученко, Л.Д. Величко // Збірник тез доповідей третьої всеукраїнської науково-практичної конференції. – Одеса: ВА, 2016. – С.176.

19. Петрученко О.С. Динамічні та кінематичні характеристики етапу проникнення кулі в броню / О.С. Петрученко, О.В. Флюд, Л.Д. Величко // Військово-технічний збірник / Національна академія сухопутних військ. – № 16. – Львів: НАСВ, 2017. – С. 8-11.

20. Петрученко О.С. Вплив пружного підкріплення в захисній конструкції на її характеристики / О.С. Петрученко, О.В. Флюд, Л.Д. Величко // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – № 15. – Львів: НАСВ, 2017. – С. 52.

21. Величко Л.Д. Вплив нелінійно-пружної характеристики підвіски транспортних засобів на динаміку об'єкту, що транспортується / Л.Д. Величко, О.І. Хитряк, О.С. Петрученко // LXXI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2015. – С. 529.

22. Петрученко О.С. Розрахункова модель для визначення впливу пружних деформацій на електронний потенціал вздовж поверхонь та заповнених середовищем концентраторів напружень / О.С. Петрученко, М.Г. Стащук, Р.М. Пак,

Р.С. Гром'як // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – Львів: АСВ, 2013. – С. 50-51.

23. Петрученко О.С. Дослідження співудару твердих тіл / О.С. Петрученко, О.В. Флюд, О.В. Білаш, Л.Д. Величко // Збірник тез доповідей. VII науково-практичної конференції – Харків: НАНГУ, 2017. – С. 125.

## АНОТАЦІЯ

**Петрученко О.С. Обґрунтування параметрів багатошарової захисної конструкції бойових машин на основі нелінійних математичних моделей.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (кандидата технічних наук) за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Міністерство оборони України, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного – Львів, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічного завдання суть якого полягає у розробці методики оцінки дії елемента ураження на захисну конструкцію з метою обґрунтування її геометричних та фізико-механічних параметрів, яка б забезпечувала підвищений рівень захисту особового складу та бойових машин від дії елементів ураження стрілецької зброї, гранат та снарядів.

На основі проведеного комплексного дослідження взаємодії елемента ураження з металевою пластиною побудовано відповідні математичні моделі опису процесів та запропонована багатошарова захисна конструкція. У випадку двошарової конструкції, передній шар – металева пластина, а тилловий – з регресивно пружною характеристикою, спричиняє зменшення силового навантаження на об'єкт захисту у 1,2-1,4 рази у порівнянні із одинарним захисним спорядженням з такого ж матеріалу і аналогічної товщини.

Отримано аналітичну залежність для визначення максимального кута непрямого удару, що забезпечує явище рикошету.

Проведено натурні випробування та підтверджено експериментально доцільність використання пружних зв'язків між пластинами захисної конструкції. Досліджено вплив фізико-механічних, кінетичних, конструктивних характеристик елемента ураження і захисної конструкції з рознесеними пластинами на рівень захисту об'єкту та отримано аналітичні залежності для визначення її оптимальних параметрів. В результаті досліджень отримано систему залежностей, які дають можливість сформулювати і розробити структуру пакету захисної конструкції з рознесеними пластинами для бойових машин.

**Ключові слова:** захисна конструкція, елемент ураження, кутова швидкість нутації, фізико-механічні властивості матеріалів, явище рикошету.

## АННОТАЦИЯ

**Петрученко О.С. Обоснования параметров многослойной защитной конструкции боевых машин на основании нелинейных математических моделей.** – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора философии (кандидата технических наук) по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Министерство обороны Украины, Национальная академия сухопутных войск имени гетмана Петра Сагайдачного – Львов, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-технического задания суть которого заключается в разработке методики оценки действия тела, которое будет поражать объект защиты, с целью обоснования геометрических, физико-механических параметров защитной конструкции, которая бы обеспечивала повышенный уровень защиты личного состава и боевых машин от действия элементов поражения стрелкового оружия, гранат и снарядов.

На основе проведенного комплексного исследования взаимодействия поражающего элемента с пластиной предложена защитная конструкция, которая позволяет уменьшить силовую нагрузку на объект защиты за счет тылового слоя с регрессивно упругой характеристикой. Вместе с тем получена аналитическая зависимость для определения максимального угла непрямого удара, если имеет место явления рикошета. Проведены натурные испытания и подтверждена экспериментально целесообразность использования упругих связей между пластинами защитной конструкции. Построены математические модели описания процессов взаимодействия поражающего элемента с препятствием. Исследовано влияние физико-механических, кинетических, конструктивных характеристик поражающего элемента и защитной конструкции на уровень защиты объекта и получены аналитические зависимости для определения оптимальных параметров защитной конструкции. В результате исследований получена система зависимостей, которые дают возможность сформулировать и разработать структуру пакета защитной конструкции с разнесенными пластинами для боевых машин.

**Ключевые слова:** защитная конструкция, поражающий элемент, угловая скорость нутации, физико-механические свойства материалов, явления рикошета.

## ABSTRACT

**Petruchenko O.S. The substantiation of parameters of a multi-layered protective construction for combat vehicles on the basis of nonlinear mathematical models.** - Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (candidate of technical sciences) in specialty 05.02.09 - dynamics and strength of machines. - Ministry of Defense of Ukraine, Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical problem the essence of which is to develop a method for assessing the impact of striking elements to objects of protection with the aim of substantiating the geometrical, physical and mechanical parameters of the protective construction, which would provide maximum protection of personnel and combat vehicles from bullets of small arms or other striking elements.

It was done the complex investigation of the interaction between the defeat device and the protective structure element on the basis of nonlinear mathematical models. The influence of the imposed kinematic conditions of an element on the kinetic characteristics of the striking element was determined. It is proposed in two layered protective structures to use a rear element with a regressive elastic characteristic, which allows to reduce the force load on the object of protection in 1,2-1,4 times compared with a single protective construction of the same material and a similar thickness. An analytical dependence is obtained for determining the maximum angle of indirect impact as a function of the physical and mechanical qualities of materials and the kinematic parameters of the interacting bodies when a ricochet phenomenon takes place. Natural experiments were carried out and the experimentally proved the expediency of using elastic bonds between the elements of the protective structure, which allows reducing the magnitude of the dynamic power interaction between them. It was constructed the mathematical models of the description of the processes of interaction of the striking element with an obstacle at the stages: penetration, breakage and depletion of that element from the protective construction element due to different types of their reinforcement. It was studied the mathematical modeling of the mechanical processes of the interaction of the striking and protective structure on the basis of nonlinear elastic bonds between the elements of the protective structure and their conduct, depending on the geometrical, physical and mechanical parameters of the interacting bodies. It's obtained the functional dependence of change the striking element's nutation angle on its geometric, physicomachanical and kinetic parameters, including obstacles on the after penetrationstage, that is the basis for constructive solving of the multilayered protective design with segregated plates. The influence of physical and mechanical, constructive, kinetic characteristics of the striking and protective structure to the level of object's protection was investigated and analytical dependences were obtained for determining the optimal parameters of the protective construction. As a result of the research, a system of dependencies has been obtained that makes it possible to formulate and develop the structure of a protective construction with segregated elements for combat vehicles.

The main results of the work are suitable for practical applying and implementation during design and development work on the creation of new samples of wheeled vehicles of special purpose in scientific research and in the educational process.

**Key words:** protective construction, protection, striking element, angular speed of nutation, physical and mechanical properties of materials, ricochet phenomenon, limiting ballistic velocity, after penetration velocity.

Підписано до друку 02.03.2018р.  
Формат 60x90/16. Папір офсетний.  
Ум. др. акр. 1,25  
Обл. вид. арк. 1,05  
Наклад 100 прим.  
Замовлення №17

Видавець ФОП Озерова К.О.  
м. Львів, вул. Городоцька, 222