

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ СУХОПУТНИХ ВІЙСЬК
ІМЕНІ ГЕТЬМАНА ПЕТРА САГАЙДАЧНОГО
МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО НАУКИ І ОСВІТИ УКРАЇНИ**

На правах рукопису

ПЕТРУЧЕНКО Оксана Степанівна

Прим. № __

УДК 623.4.012

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

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Дисертація

на здобуття наукового ступеня

доктора філософії

(кандидата технічних наук)

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

**Науковий керівник ВЕЛИЧКО Лев Дмитрович кандидат фізико-
математичних наук, доцент** _____

Львів – 2018

АНОТАЦІЯ

***Петрученко О.С.* Обґрунтування параметрів багат шарової 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.

У дисертації вирішене науково-технічне завдання міцності та підвищеного рівня захисту особового складу та бойових машин від дії елементів ураження на основі нелінійних математичних моделей. Отримані результати в сукупності складають певний внесок у подальший розвиток теорії і практики динаміки та міцності механічних систем (елемент ураження та захисна конструкція) на різних етапах їх взаємодії.

Аналізуючи втрати військової техніки в умовах ведення ближнього бою, стає зрозумілим, що техніка не є достатньо захищена. Тобто існуючі захисні конструкції для бойових машин (у вигляді додаткового захисту) не вирішують в достатній мірі питання захисту. Методика створення ефективної додаткової захисної конструкції, з метою обґрунтування геометричних та фізико-механічних параметрів, не є належним чином розроблена. Це викликало необхідність розробки постановки і методів розв'язання певних задач для визначення параметрів захисної конструкції. За результатами відповідних досліджень, коли шукані параметри обчислюються з урахуванням всіх особливостей взаємодії елемента ураження та захисної конструкції на різних етапах, запропонована конструкція з рознесеними пластинами. Цінність ідентифікованих параметрів полягає в тому, що хоч вони визначені для ідеалізованого реального об'єкту, однак приведені до математичних моделей динамічного процесу, які дозволяють отримати задовільні результати в практичному застосуванні.

У *першому* розділі показано, що наукові дослідження здійснені авторами на основі науково-технічних, технологічних, методологічних та практичних досліджень ударної взаємодії елемента ураження з перешкодою дозволили отримати емпіричні формули, які базуються на результатах теоретичних та експериментальних досліджень. Ці формули формалізуються лінійними дискретними залежностями класу інтерпретації отриманих вимірювань.

Напрямок розвитку дослідження теорії вивчення динаміки та міцності ускладнене з причин відсутності достовірної інформації про елемент ураження, пробивна здатність якого постійно нарощується.

У *другому* розділі з метою підвищення ефективності захисної конструкції розроблено метод ідентифікації математичних моделей динаміки і міцності механічної системи (МС), який описує всі етапи взаємодії елемента ураження з металевою пластиною захисної конструкції при накладені кінематичних обмежень на неї.

Описано залежність сили лобового опору повітря від коефіцієнтів, які враховують аеродинамічність форми кулі, її площу поперечного перерізу, швидкість звуку в повітрі та його густину, надзвукову або дозвукову швидкості кулі. Різниця між теоретичними результатами і експериментальними даними швидкості кулі не перевищує по модулю 1%.

На основі диференціальних рівнянь здійснено комплексне дослідження взаємодії елемента ураження та пластин захисної конструкції з врахуванням їх геометричних, фізико-механічних та кінетичних параметрів, на різних етапах: проникнення, пробиття та вильоту.

У *третьому* розділі встановлено залежність максимального кута непрямого удару, що забезпечує явище рикошету, від вектора швидкості елемента ураження, фізико-механічних властивостей його та металевої пластини, кінематичних обмежень накладених на них.

Проведено натурні випробування та підтверджено експериментально доцільність використання пружних зв'язків між пластинами захисної конструкції. Досліджено вплив фізико-механічних, кінетичних, конструктивних характеристик

елементу ураження і захисної конструкції з рознесеними пластинами на рівень захисту об'єкту та отримано аналітичні залежності для визначення її оптимальних параметрів.

В *четвертому* розділі обґрунтовано доцільність використання тилового пружного шару в захисній конструкції, що дозволяє зменшити величину динамічного навантаження на об'єкт захисту при обмеженнях на сумарну величину деформації. У випадку двошарової конструкції, передній шар – металева пластина, а тиллий – з регресивно пружною характеристикою, зменшення силового навантаження на об'єкт захисту досягається у 1,2-1,4 рази у порівнянні із одинарною захисною конструкцією з такого ж матеріалу і аналогічної товщини.

У розділі встановлено залежності для визначення ступенів захищеності об'єкту, який створює захисна конструкція з рознесеними пластинами розташованими під певними кутами. Це дає змогу обирати оптимальний метод ідентифікації параметрів захисної конструкції бойових машин. Тобто представлені результати досліджень дозволяють отримати систему залежностей, які дають можливість сформулювати і розробити структуру пакету захисної конструкції з рознесеними пластинами. Запропонований метод формування моделей, з урахуванням теоретичних залежностей, суттєво зменшує кількість експериментів при реалізації повного факторного дослідження зразків конструкцій.

Проведені дисертаційні дослідження дають можливість розробити структуру пакету захисної конструкції для бойових машин.

Ключові слова: захисна конструкція, елемент ураження, кутова швидкість нутації, фізико-механічні властивості матеріалів, рикошет, динаміка, міцність, математична модель.

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.

In the dissertation, the scientific and technical problems of strength and an increased level of protection of personnel and combat vehicles from the impact of striking elements based on nonlinear mathematical models are solved. The altogether obtained results make a definite contribution to the further development of the theory and practice of the dynamics and strength of mechanical systems (interaction of a striking elements and protective structure) at different stages of their interaction.

We conclude from the analysis of the loss of combat vehicles in the close combat that the vehicles and facilities are not sufficiently protected. That is, the existing protective structures for military vehicles (in the form of additional protection) do not adequately solve the issue of their protection. It's not properly developed the methodic of creating an effective protective construction for light armor or facilities for discourse geometrical and physical-mechanical parameters. This caused the need to develop the statements and methods for solving certain problems for determining the parameters of the protective construction. After corresponding investigations, when parameters were calculated considering all features of interaction striking element and protective construction on different stages it was proposed construction with spaced plates. The value of defined parameters, which determined for an idealized object, is that they allow obtaining satisfactory results in practical applications because they are brought to the mathematical models of the dynamic process.

In the first section authors show that they obtained empirical formulas on the basis of scientific, technical, technological, methodological and practical research on the shock interaction of striking element and obstacle, which based on the results of

theoretical and experimental research. These formulas are formalized by the linear discrete dependencies of the interpretation class of the obtained measurements.

The direction of development of the investigation of the theory of studying dynamics and strength is complicated due to the lack of reliable information about the striking element, whose penetration ability is steadily increasing.

In the second section, in order to increase the effectiveness of the protective construction, it's developed a method for identifying the mathematical models of the dynamics and strength of the mechanical system (MS), which describes all stages of the interaction of the striking element with the metal plate of that construction with the imposed kinematic constraints on it.

The dependence of the frontal air resistance force on the coefficients that takes into account aerodynamics of the shape of the bullet, its cross-sectional area, the speed of sound in the air and air density, supersonic or subsonic velocity of the bullet is described. The difference between the theoretical results and the experimental data of the kinematic parameters of the bullet does not exceed by modulus 1%.

On the basis of differential equations, a complex study was carried out on the interaction between the striking element and the protective structure plates, taking into account their geometrical, physic, mechanical and kinetic parameters, at different stages: penetration, breakthrough and exit.

In the third section, the dependence of the maximum angle of indirect impact is established, which provides the ricochet phenomenon, and depend of the velocity vector of the striking element, the physical and mechanical properties of this element and the metal plate, the kinematic restrictions imposed on them.

Natural experiments have been carried out and experimentally proved the expediency of using elastic bonds between the plates of protective construction. The influence of physical, mechanical, kinetic, structural characteristics of the both, striking element and protective construction, with spaced plates on the object's level of protection was explored and analytical dependences were obtained for determining its optimal parameters.

In the fourth section, it is justified to use the rear elastic layer in the protective construction, which allows reducing the amount of dynamic load on the object of protection with restrictions on the total amount of deformation. In case of a two-layer construction, the front layer is a metal plate, and the rear one with a regressively elastic characteristic, the reduction of the load on the object of protection is achieved in 1,2-1,4 times compared with a single protective structure of the same material and a similar thickness .

The section contains dependencies to determine the degree of protection of the object, which creates a protective construction with spaced plates posed at certain angles. It allows choosing the optimal method for identifying of the protective design parameters of combat vehicles. The presented research results allow us to obtain a system of dependencies that make it possible to formulate and develop the structure of a protective design package with spaced plates for combat vehicles. The proposed method of forming models, taking into account theoretical dependencies, significantly reduces the number of experiments in the implementation of a complete cycle study of samples.

Key words: protective construction, striking element, angular speed of nutation, physical and mechanical properties of materials, ricochet, dynamics, strength, mathematical model.

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.

ЗМІСТ

Ст.

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ | 13 |
| ВСТУП | 14 |
| РОЗДІЛ 1. | |
| АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ БОЙОВИХ МАШИН | 20 |
| 1.1. Аналіз методів захисту військової техніки | 20 |
| 1.2. Методи дослідження взаємодії тіл з великими швидкостями..... | 23 |
| 1.3. Методи захисту особового складу | 32 |
| 1.4. Висновки до першого розділу. | 33 |
| РОЗДІЛ 2. | |
| МАТЕМАТИЧНІ ЗАСАДИ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТУ УРАЖЕННЯ (КУЛІ, ОСКОЛКУ) З НЕРУХОМИМ ТА РУХОМИМ ТІЛОМ | 35 |
| 2.1. Визначення величини сили лобового опору повітря під час руху елементу ураження. | 35 |
| 2.2. Динамічні та кінематичні характеристики етапу проникнення елементу ураження в броню..... | 40 |
| 2.3. Кінематичні характеристики взаємодії елемента ураження та нерухомої перешкоди..... | 46 |
| 2.4. Кількісний аналіз взаємодії елемента ураження та рухомої перешкоди. | 50 |
| 2.5. Дослідження впливу підпружинення перешкоди на кінематичні характеристики взаємодії його та елемента ураження..... | 63 |
| 2.6. Нелінійна постановка задачі динаміки взаємодії підпружиненої перешкоди і елемента ураження | 71 |
| 2.7. Висновки до другого розділу..... | 78 |
| РОЗДІЛ 3. | |
| РИКОШЕТ ТА ДИНАМІКА ЗАХИСНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІД ЧАС УДАРУ ОБ НЕЇ ЕЛЕМЕНТУ УРАЖЕННЯ | 79 |
| 3.1. Динаміка рикошету елемента ураження | 79 |

| | |
|---|------------|
| 3.2. Експериментальна перевірка використання пружного шару в захисній конструкції..... | 86 |
| 3.3. Динаміка взаємодії елемента ураження та рухомої перешкоди при рикошеті..... | 94 |
| 3.4. Динаміка захисної конструкції під час удару об неї кулі..... | 100 |
| 3.5. Висновки до третього розділу..... | 111 |
| РОЗДІЛ 4. | |
| ОЦІНКА РІВНЯ ЗАХИЩЕНОСТІ ОБ'ЄКТА | 112 |
| 4.1. Кінетичні характеристики впливу захисної конструкції на об'єкт захисту | 112 |
| 4.2. Вплив геометрії конструкції на зони захищеності та ураження об'єкту захисту..... | 116 |
| 4.3. Кінематичні параметри елемента ураження після пробиття першого шару конструкції..... | 120 |
| 4.4. Вплив кутової швидкості нутації елемента ураження на його пробивну здатність..... | 128 |
| 4.5. Діаграма зон рикошету і зон застрягання та пробивання елемента ураження..... | 134 |
| 4.6. Висновки до четвертого розділу..... | 137 |
| ВИСНОВКИ | 138 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 140 |
| ДОДАТКИ | 154 |
| Додаток А. Акти впровадження | |
| Додаток В. Звіт по експерименту | |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ОВТ – озброєння та військова техніка

БМ – бойова машина

МС – механічна система

ЕУ – елемент ураження

РПГ – ручна протитанкова граната

БТР – бронетранспортер

БМП – бойова машина піхоти

АК, АКМ – автомат Калашникова

СВД – снайперська гвинтівка Драгунова

ФМХ – фізико-механічні характеристики

ВСТУП

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, осколків 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, наявність 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, осколків 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 2011-2017 рр. 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 багат шарової захисної конструкції для підвищення рівня захищеності бойових машин від дії елементу ураження стрілецької зброї, осколків 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 елементу 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 елементу ураження для різних типів захисної конструкції; [11, 17] – методика дослідження дії елементу 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 елементу 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), 9 – тез доповідей конференцій 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ БОЙОВИХ МАШИН

Аналізуючи напружену військово-політичну обстановку в цілому світі та й в Україні зокрема, на сьогодні є і залишається актуальним питання розробки захисної конструкції від дії куль та осколків. Питання захисту, з врахуванням мобільності проведення бойових дій, як в цивільній так і у військовій сфері (галузі) не є повністю вирішене. Тобто виникає проблема захисту при швидкому реагуванні на непередбачену миттєву атаку. Тому мобільні захисні конструкції з мінімальними затратами на матеріал, їх доступність і простота установки повинні бути в арсеналі захисних засобів як їхня складова [43].

Питанням дослідження взаємодії тіл з великими швидкостями займаються давно. Дослідження в основному базуються на формуванні інноваційних пакетів структури матеріалів захисту.

Акцентована зараз увага на рівні кулестійкості захисної конструкції, яка б дозволила підвищити рівень захисту за стандартами НАТО, з використанням недорогих доступних матеріалів з мінімальними затратами на технологію виробництва і простоти монтажу та демонтажу.

1.1. Аналіз методів захисту військової техніки

Питанню захищеності особового складу, бойових машин та фортифікаційних споруд приділяється значна увага [9, 33, 62, 63, 121]. В залежності від функціонального призначення об'єкту захисту, на основі аналізу переваг, недоліків існуючих захисних конструкцій та поставлених завдань до них висуваються різні вимоги [124].

З досвіду бойових конфліктів, які відбувалися в Афганістані (1979-1989 рр.), Чечні (1994-1997 рр.), Іраку (2003-2005 рр.) та АТО на сході України (2013р.- по т.п.) зауважено використання значної кількості БМ [13, 26, 45, 58, 74]. Відмічено

велику кількість їх ураження підчас здійснення маршів, евакуації поранених і хворих в тактичній ланці, зокрема, з місць ведення бойових дій до медичних пунктів [32, 55, 66, 67].

На сьогодні, аналізуючи бойові конфлікти, які виникають з різних причин в цілому світі, а від так і розвиток елементів ураження (ЕУ), можна відмітити розробку нових та модернізацію існуючих типів БМ. Збільшення їх кількості постачання на озброєння свідчить про зростання їх ролі в бойових конфліктах [109, 116]. Для підвищення живучості БМ, що є головною необхідною умовою підтримання бойового потенціалу підрозділів і військових частин, від куль стрілецької зброї та осколків використовували захисні екрани, мішки з землею, бронежилети, люки від БМП та БТР навішані на борти колісних машин [3, 52, 54, 99, 123].

Аналіз пошкодженої техніки у бойових конфліктах вказує на недостатній рівень захищеності від стрілецької зброї калібру до 12,7 мм в умовах ближнього бою. Це спричиняє недостатню ефективність вирішення поставлених завдань перед БМ за призначенням [15, 19, 48, 72].

Найпростіші види захисних «екранів» почали використовувати під час Другої світової війни. В основному вони застосовувались проти ураження ручними протитанковими гранатами (РПГ) [2, 53, 65].

Сіткові та решіткові екрани отримали широке використання в якості додаткового захисту від кумулятивних гранат під час воєнних дій в Афганістані, в Чечні, в зоні АТО та інших локальних військових конфліктах [132].



Рис. 1.1. БТР-80 з решітковими екранами

В ізраїльському танку «Меркаве-3» по периметру башти на деякій віддалі закріплені ланцюги зі стальними шарами на кінцях. Наявність ланцюгів провокує підрив бойової частини гранати (РПГ), після їх контакту з ланцюгом [53].



Рис.1.2. Меркава-3 на виставці Євросатори – 2001

Іншим способом підвищення захищеності БМ є встановлення на ньому навісної броні, яка сприяє рикошету протитанкового ракетного комплексу (ПТРК) тобто зміни кута взаємодії кумулятивного струменя з корпусом бронетранспортера. На плаваючому бронетранспортері корпусу морської піхоти США LVTP7 встановлена навісна броня "RAFAEL".

Різноманіття додаткового захисту (захисних «екранів»), кількість втраченої техніки з-за недостатнього захисту від куль стрілецької зброї, дозволяє стверджувати, що кожний з вище згаданих екранів має недоліки, тому пошук їх оптимальної конструкції триває. Є необхідність удосконалення розрахункових методів при проектуванні БМ з врахуванням методики розрахунку конструкцій для оцінки ефективності захищеності та відповідності вимогам, які висувуються до них.

Отже, питання розробки додаткового захисту від куль стрілецької зброї та осколків для бойових машин легкої категорії ваги (БМЛКВ) є актуальним на сьогодні.

1.2. Методи дослідження взаємодії тіл з великими швидкостями

Питанням пробиття перешкоди різними ЕУ займаються здавна. При співударі кулі з перешкодою можливі три випадки – рикошет, тобто куля ковзає по поверхні перешкоди і змінює свій напрям руху; проникнення – куля проникає в перешкоду і в ній застрягає; пробиття – куля пробиває перешкоду і вилітає з її тилової сторони [28, 46]. Наскрізне пробиття перешкоди з вибиванням корку описано Ноблем та Березиним К.А. Наближена оцінка необхідної величини швидкості кулі для пробиття перешкоди вказана Єйлером, Жакоб де Марром [31, 35, 47, 100, 101].

Основним елементом ураження БМ та особового складу, під час виконання бойового завдання є кулі стрілецької зброї калібрів 5,45 мм, 5,56 мм, 7,62 мм, 12,7 мм та осколки, а також ударні хвилі від вибухових зарядів [20, 33, 120, 138].

Серйозну небезпеку становлять вторинні осколки (частини кулі, захисного спорядження та уламки деформованої бронеплити), які утворюються під час проникнення чи пробиття броні ЕУ [114, 118]. Тому сталь бронеплити повинна характеризуватись великою твердістю та міцністю, які забезпечують великий опір проникненню кулі, та значною пластичністю і в'язкістю, які запобігають крихкому руйнуванню сталюого бронееlementу [6, 8, 64, 96, 107, 126].

Збільшення твердості броньованої сталі приводить до підвищення її крихкості, а в цьому випадку може відбутись пролом або розкол захисного елемента з утворенням осколків, які приводять до заброньового ураження [117, 133, 138, 139]. Однак поєднання в металевій броні якостей високої твердості і в'язко-пластичності неможливе [41, 108].

Тому одним із шляхів підвищення кулестійкості є створення біметалевої броні, в якій зовнішній шар виготовлений з матеріалу підвищеної твердості, а тилловий шар – з в'язкого матеріалу. Таку броню отримують зварюванням з використанням вибуху, пакетною прокаткою або іншими способами [29, 40, 104].

Основним ЕУ, в умовах ведення ближнього бою, є стрілецька зброя, осколки гранат та снарядів. Кулі є двох (біметалічна оболонка, осерддя) або трьох

елементні (біметалічна оболонка, сорочка і осерддя). Основною характеристикою кулі є пробивна здатність, яка залежить від її швидкості, маси, форми, конструкції, матеріалів з яких вона виготовлена, наявності осерддя та його характеристик [37, 50, 71]. Осерддя кулі може бути свинцевий, свинець + сталь, сталевий, сталевий з добавкою вольфраму або інших матеріалів, термозміцнений або ні. Кулі з свинцевим осерддям мають меншу пробивну здатність оскільки вони при зіткненні з перешкодою зазнають значної деформації. Кулі з сталевим осерддям є більшої пробивної здатності, тому що при зіткненні з перешкодою деформується або руйнується оболонка і свинцева сорочка, а осерддя переважно зберігає свою форму. В якості бронебійних куль використовують кулі, які мають термозміцнений осерддя з високо вуглецевої сталі У12А або з добавкою вольфраму [20, 136].

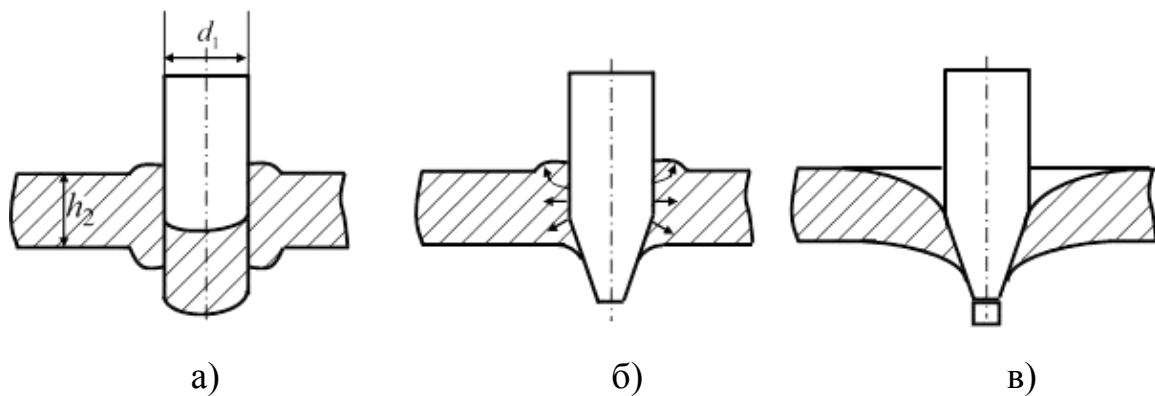


Рис. 1.3. Типи пробивання тонкої перешкоди недеформівним осерддям

Під час взаємодії ЕУ з перешкодою остання зазнає деформації. Вид деформації залежить від геометричних та фізико-механічних параметрів перешкоди та ЕУ.

На рис. 1.3.а – вказано вибивання корку з перешкоди; на рис. 1.3.б – пластичне розширення отвору в матеріалі перешкоди, з переважною радіальною текучістю; на рис. 1.3.в – пластичне деформування перешкоди з утворенням в тилівій стороні перешкоди випуклості з подальшим її руйнуванням за типом вирізання корку (для осерддя з плоскою торцевою частиною), або утворенням пелюсткової

пробоїни (для загострених осердь), чи утворенням гострих рваних задирок [31, 34].

На практиці типи та етапи пробивання перешкод деформівним осерддям (сталевим або термозміцненим) вказані на рис. 1.3. і 1.4.

На початковій стадії співудару, в околі поверхні контакту тіл, впродовж мікросекунд, в матеріалах виникають скінченні деформації, а швидкості зміни деформації і напруження досягають великих значень. Цей процес супроводжується виділенням тепла і значним зростанням локальної температури, що зменшує міцність матеріалу [112, 115, 127]. Одночасно, в матеріалах осерддя і перешкоди виникають хвилі стиску та розрідження, наявність яких суттєво впливає на подальшу міцність матеріалів [17, 72, 103, 107, 119].

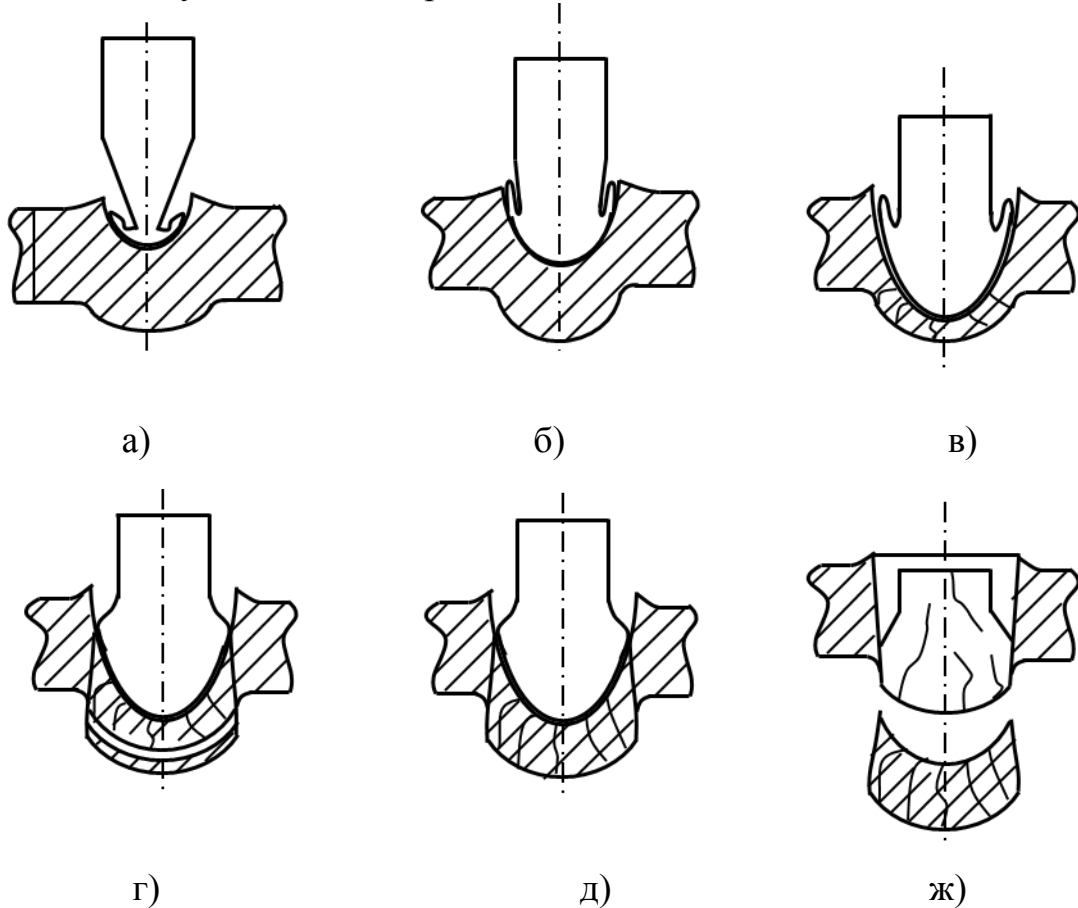


Рис. 1.4. Етапи проникнення деформівного осерддя в перешкоду

На рис. 1.4.а – показано початковий етап проникнення деформівного осерддя в перешкоду, який характеризується початком випучування перешкоди і

деформацією головки осерддя; на рис. 1.4.б – проміжна стадія проникнення деформівного осерддя в перешкоду, яка характеризується суттєвою деформацією осерддя та значним випучуванням на тилівій стороні перешкоди; на рис. 1.4.в – завершальна стадія проникнення осерддя в перешкоду, яка характеризується продовженням деформування осерддя та появою тріщин на випуклій стороні перешкоди; на рис. 1.4.г – поширення тріщин у випуклій частині перешкоди, формування корку та відколювання частинок перешкоди; на рис. 1.4.д – вибивання корку; на рис. 1.4.ж – руйнування осерддя, корка та утворення задирок на випуклій стороні перешкоди [34, 49, 127].

Швидкість співудару тіл завжди відіграє фундаментальну роль при дослідженні їх кінематичних параметрів. Якщо швидкість кулі в момент дотику до перешкоди менше $250 \frac{m}{c}$, то пружно-пластична деформація, яка виникає внаслідок удару кулі об перешкоду, охоплює всю конструкцію, до якої належить перешкода. В цьому випадку явище рикошету або проникнення необхідно розглядати беручи до уваги всю конструкцію [10, 21].

Якщо швидкість кулі в момент контакту з перешкодою змінюється в межах $500 \frac{m}{c} \leq V \leq 2000 \frac{m}{c}$, то загальна деформація конструкції не впливає суттєво на проникнення або рикошет. Оскільки, в цьому випадку, головну роль відіграє поведінка матеріалу перешкоди в околі співудару тіл, розмір якого дорівнює 2-3 діаметра кулі. При зміні швидкості кулі в цьому діапазоні, на рикошет і проникнення впливають геометрія перешкоди і швидкості деформації тіл.

Якщо швидкість кулі в момент контакту з перешкодою змінюється в межах $2000 \frac{m}{c} \leq V \leq 10000 \frac{m}{c}$, то напруження в матеріалах на декілька порядків більші від границі міцності матеріалів кулі та перешкоди. Тому на початковій стадії їх взаємодію можна описувати на основі моделі стискаючої або не стискаючої рідини [1, 18].

Питаннями взаємодії ЕУ з перешкодою займаються здавна і відомі різні методи та підходи до розрахунків бронепробиття. Фундаментальні результати

дослідження теорії удару твердих тіл і визначення умов пробиття перешкоди ЕУ отримано у працях Єйлера, Жакоб де Марра, Марра-Чупрова, Нобля, Дж. Райнхарта і Дж. Пірсона, Берзина К.А. і інших [49, 70, 125, 134].

Формули (цих авторів) для визначення товщини перешкоди, яку пробиває ЕУ, є функцією змінних

$$L=f(K,C,V,m,d,\alpha)$$

де L – товщина перешкоди, яку пробивається; K – стала величина; C – коефіцієнт, який характеризує фізико-механічні властивості матеріалу перешкоди; V – швидкість ЕУ в момент контакту з поверхнею перешкоди; m – маса ЕУ; d – діаметр ЕУ; α – кут між напрямком швидкості ЕУ та нормаллю перешкоди. Конкретний вираз функції та значення її коефіцієнтів залежить від прийнятих припущень та опрацювання результатів експериментальних досліджень [44, 46].

Визначенню граничної балістичної швидкості приділена значна увага і в літературі зустрічається велика кількість емпіричних формул. Огляд цих формул здійснено в роботах [31, 73, 134].

Для приблизних оцінок визначення граничної балістичної швидкості, переважно, використовують формулу Жакоб де Марра [34, 47, 135]

$$v_1 = 0,04K \frac{d_1^{0,75} h_2^{0,7}}{m_1^{0,5}},$$

де $K = 3300$ для куль зі сталевим незміцненим осерддям, $K = 3000$ для куль зі сталевим зміцненим осерддям, d_1 – діаметр осерддя і $[d_1] = \text{мм}$, h_2 – товщина перешкоди і $[h_2] = \text{мм}$, m_1 – маса осерддя і $[m_1] = \text{г}$, $[v_1] = \text{м/с}$.

Для бронебійної кулі ПС-43 з термозміцненим осерддям використовують модифіковану формулу Жакоб де Марра [34, 47, 134]

$$v_1 = 141 \frac{d_1^{0,75} h_2^{0,5}}{m_1^{0,5}},$$

де $[d_1] = \text{мм}$, $h_2 = \text{мм}$, $[m_1] = \text{г}$, $[v_1] = \text{м/с}$ [47].

Також використовують формулу Ламберта [31, 35] для визначення граничної балістичної швидкості кулі

$$v_1 = K_2 \left(\frac{l_1}{d_1} \right)^{0,15} \sqrt{\frac{f(z)d_1^3}{m_1}},$$

де K_2 – стала, яка характеризує властивості матеріалу перешкоди; $[l_1] = \text{см}$ – довжина кулі; $[d_1] = \text{см}$ – діаметр кулі; $z = \frac{h_2}{d_1}$, де h_2 – товщина перешкоди;

$f(z) = z + e^{-z} - 1$; $[m_1] = \text{г}$, $[v_1] = \text{м/с}$. Формула Ламберта дає хороші результати при описі експериментальних даних, якщо $z > 1,5$.

В роботі [18] приведені результати експериментальних досліджень рикошету сферичної кульки при ударі об горизонтальну пружну перешкоду. Аналізуючи отримані експериментальні дані автори стверджують, що явище рикошету має місце тоді коли виконується нерівність $V_{10} \sin \alpha < V_n^*$, де V_{10} – швидкість кульки в момент дотику до пружної основи, α – кут між напрямком вектора швидкості та дотичної до поверхні перешкоди, V_n^* – граничне максимальне значення швидкості кульки, коли вона ударяючись по нормалі об перешкоду не проникає в неї а – відбивається.

Теорія, яка дозволяє досліджувати явище ударної взаємодії ЕУ та перешкоди з одночасним врахуванням їх фізико-механічних властивостей, геометричних параметрів, хвиль розтягу і стиску, термодинамічних процесів та інших факторів відсутня. Тому основний метод вивчення динаміки удару і пробивання перешкоди елементом ураження – це поєднання аналітичних і експериментальних досліджень [28, 34, 63, 125].

Аналітичні методи дослідження рівня захищеності ґрунтуються на математичному моделюванні етапів взаємодії ЕУ (різних типів) і елементу захисної конструкції з подальшим проведенням відповідних математичних розрахунків [27, 31, 37, 59, 70].

До експериментальних методів можна віднести балістичні дослідження проведенні в лабораторіях, на полігонах та статистичний аналіз уражень об'єктів отриманий в результаті бойових дій [63, 131, 138].

Експериментальний метод визначення рівня захищеності об'єкту потребує проведення складних, трудомістких і коштовних досліджень в лабораторних та полігонних умовах. Однак він не дає повної оцінки динамічної стійкості захисної конструкції, оскільки кількість проведених експериментів обмежена та не завжди наперед відомі повністю тактико-технічні характеристики елементів ураження, які використовуватиме противник.

Під час проведення експериментальних досліджень, періодично, проводять аналіз отриманих результатів з використанням математичного апарату. Це дозволяє внести кореляцію в хід експериментальних досліджень, тобто змінити умови наступних експериментів. Такий підхід характеризується своєю частковістю і обмежений вибраною моделлю. В роботах Рехта [134] і Бейкера [137] це використано для дослідження проникнення і рикошету ЕУ з перешкодою.

Поєднання результатів аналітичних та експериментальних досліджень дозволяє більш повно розглянути рівень захищеності об'єкту.

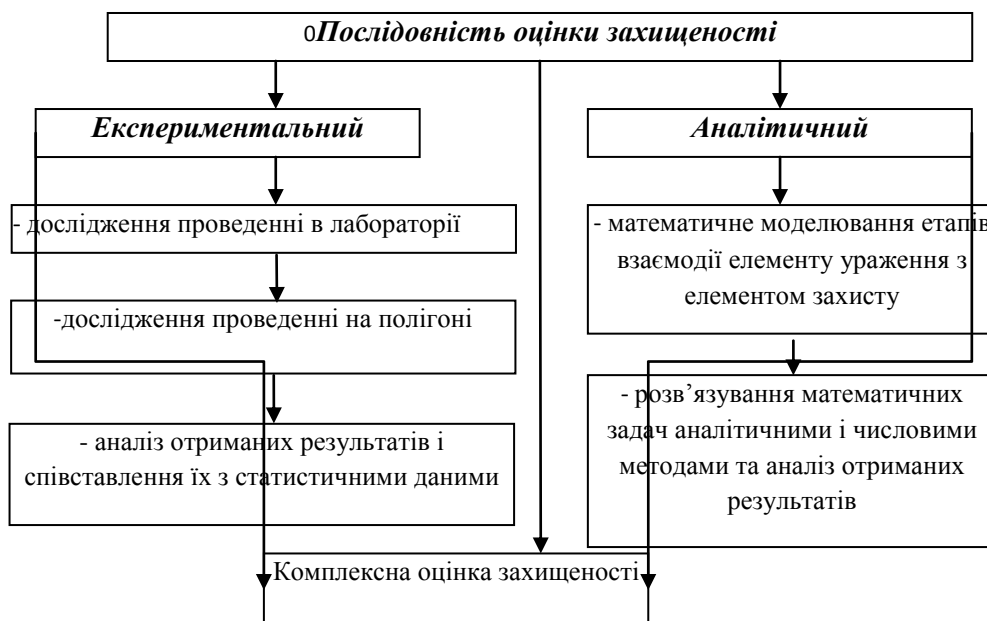


Рис. 1.5. Послідовність оцінки захищеності

Аналітичні методи в основному побудовані на аксіомах і законах механіки руйнування твердих тіл. Ці методи скеровані на дослідження окремих аспектів ударних процесів при взаємодії двох тіл. Процеси описуються з використанням рівнянь для одновимірного суцільного середовища. Задача зводиться до розв'язування алгебраїчних або звичайних диференціальних рівнянь. При розв'язуванні останніх знову вводяться суттєві спрощення. При математичному моделюванні процесів взаємодії тіл вважають, що елемент ураження або захисту є тверде тіло. В переважній більшості при проведенні таких досліджень використовують теореми про зміну кількості руху механічної системи та про зміну кінетичної енергії механічної системи або їх поєднання [75, 117, 119]. Інколи, при дослідженні процесів проникнення або пробивання враховують пружну або пружно-пластичну поведінку матеріалів [114, 129, 130]. Вказані методи потребують використання числових значень окремих параметрів, які неможливо визначити або їх діапазон зміни доволі великий.

При дослідженні ударних процесів числовим методом, переважно, розбивають контактуючі тіла на n скінченних елементарних тіл, поведінку яких описують використовуючи рівняння для деформівного тіла, тобто використовують методи скінченного елемента або різницевої [12, 41]. Числові методи дозволяють розв'язувати системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь з частинними похідними, які описують ударний процес [25, 31, 97]. Однак числове розв'язування задачі не дозволяє здійснити якісний аналіз проблеми та виявити критичні випадки, оскільки фізико-механічні властивості матеріалів взаємодіючих тіл змінюються в широкому діапазоні. Крім того достовірність результатів отриманих чисельними методами потребують ретельної перевірки [36, 77].

Для збільшення опору матеріалу проникненню ЕУ здійснюють зміцнення фронтальної частини перешкоди термічною (гартування, цементация і азотування) [40, 64, 111] або вібраційною обробкою [39, 81, 115]. Однак висока твердість фронтальної частини сприяє крихкому руйнуванню елемента захисту, що є джерелом вторинного ураження, а також супроводжується появою точкових

концентрацій напружень, які викликають руйнування елемента захисту і утворенню корку та його подрібненню [47, 133].

Однією з основних завдань дослідження співудару ЕУ та перешкоди є виведення аналітичних залежностей для визначення величини бронепробиття, глибини проникнення елемента. Відомі моделі проникнення ЕУ в перешкоду відображають характер проникнення, деформацію, час взаємодії через балістичні характеристики [44, 69].

Фундаментальні результати дослідження теорії удару твердих тіл, визначення пробиття перешкоди елементом ураження розроблено Сйлером, Жакоб де Маром, Марра-Чупровим, Ноблем, Дж. Райнхартом і Дж. Пірсоном, К.А. Берзиним та ін. [7, 31, 49]. Вагомий внесок у розвиток теорії розрахунку динамічних процесів стійкості зробили Алексеєва П.Т., Битенський І.А., Буланова М.Д., Гольдсміт В., Грещук Л.Б., Зукас Дж.А., Іоффе А.Ф., Істомін Б.В., Курран Д.Р., Ламберт Дж.П., Миронов Г.В., Ніколас Т., Платов А.І., Рототаєв Д.А., Свіфт Х.Ф., Форенталь М.В. та ін. [35, 72, 73]. Сучасні методи розрахунків на міцність розроблені у роботах Голуба В.А., Чепкова І.Б., Войцеховського В.Л., Григоряна В.А., Забабахіна Є.І. [25, 30, 35, 61, 117, 128].

В роботах цих авторів розглянуті:

1) аналітичні підходи дослідження динамічної взаємодії елемента ураження та перешкоди при використанні емпіричних формул та рівнянь деформівного тіла [31, 49];

2) експериментальні методи визначення фізико-механічних характеристик елемента ураження та перешкоди при високошвидкісних навантаженнях [4, 35, 44, 46, 135];

3) числові методи дослідження процесу пробиття перешкоди елементом ураження при ударному навантаженні [21, 37, 103];

4) методи збільшення опору матеріалу перешкоди внаслідок суттєвого зміцнення її фронтальної частини термічною та вібраційною обробкою [8, 11, 48, 52, 54, 60].

Всі ці методи створюють можливість вивчення певних аспектів ударної взаємодії двох тіл при суттєвих обмеженнях. Вивчення цієї проблеми з усіма аспектами на даний момент є проблематичним.

1.3. Методи захисту особового складу.

Розробка ефективного кулестійкого захисту виконується як експериментально так і шляхом аналітичного моделювання, де процес пробиття моделюється, як модель недеформівного осесиметричного тіла в пластичному середовищі згідно закону опору матеріалу.

Затребуваними на сьогодні є інженерні захисні конструкції з недорогих конструктивних матеріалів.

Найбільшу кількість уражень, на невеликих віддальх, отримують машини від куль стрілецької зброї калібру 7,62мм-12,7мм випущених з автомату Калашникова (АК-74, АКМ, ПКМ) та снайперської гвинтівки Драгунова (СВД). Тому доречно проводити експерименти на дослідження кулестійкості корпусу машини та розробляти для них додаткові захисні конструкції від куль вказаних типів зброї [115, 116].

Серйозну небезпеку становлять вторинні осколки (частини кулі, частини спорядження та уламки деформованої бронеплити), які утворюються під час проникнення чи пробиття броні елементами ураження [97, 120].

Науково-технічним завданням є необхідність покращення відповідності між досягнутим рівнем теоретичного обґрунтування оцінки захищеності, її практичної реалізації та сучасними вимогами.

Дослідження динамічних процесів пробиття елементом ураження пластин захисної конструкції потрібне для формування нових концепцій опису етапів пробиття, можливості керування цими етапами і подальшого конструктивного вирішення питання підвищення рівня захищеності [77, 109].

Захисні конструкції, в основному, скеровані на зменшення кінетичної енергії елемента ураження. В цьому випадку покращення захисту досягають

підвищенням міцності матеріалу або збільшенням товщини захисної конструкції, що тягне за собою зростання її маси.

1.4. Висновки до розділу 1

Проведений аналіз огляду основних результатів, які стосуються проблем аналітичного дослідження взаємодії елементу ураження з перешкодою, а також захисних конструкцій, засвідчує:

1. Розвиток ЕУ, збільшення застосування під час збройних конфліктів БМ, створення матеріалів з новими фізико-механічними властивостями вимагає не тільки уточнених підходів до розрахункових моделей динамічної стійкості та міцності захисних конструкцій, але і створення нових, з врахуванням динамічних процесів систем взаємодії з ЕУ.

2. Надійним методом визначення захисної властивості перешкоди є експериментальні дослідження в поєднанні з аналітичними методами.

Переважаючі захисні конструкції скеровані на зменшення кінетичної енергії ЕУ. В цьому випадку покращення захисту досягають підвищенням міцності матеріалу або збільшенням товщини захисної конструкції, що тягне за собою зростання її маси. Захист військової техніки на основі рикошету, не зважаючи на сьогоденний рівень дослідження, потребує подальшого вивчення.

3. Експериментальні дослідження динамічних процесів взаємодії ЕУ та перешкоди показують складність процесу з рядом особливостей, пояснення яких аналітичним методом можливе однак з дуже великим наближенням.

4. Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що розробка технічних засобів для захисту БМ та наземних споруд від ураження не знайшла повного висвітлення у наукових працях, тому виникає потреба комплексного підходу до вирішення вказаної задачі, яка б враховувала зокрема залежність взаємодії ЕУ із системою захисту від їх характеристик та параметрів. Саме такі задачі і є предметом дисертаційної роботи звідки випливає її актуальність.

В роботі знайшла відображення нова постановка задачі про проектно-технологічному забезпеченні бронезахисту корпусів легко броньованої техніки від дій куль стрілецької зброї.

Результатом роботи отримана методика для створення захисної конструкції на основі проведеного поетапного дослідження взаємодії ЕУ з металевою перешкодою. При цьому на різних етапах будуть використовуватись моделі зв'язані між собою в одному циклі дослідження.

Тому пропонуємо розв'язати наступний клас задач:

1. Визначити функціональну залежність сили лобового опору повітря елемента ураження в залежності від її надзвукової та дозвукової швидкостей.
2. Розробити математичну модель для експериментального визначення величини сили опору захисної пластини внаслідок дії на нього ЕУ.
3. Провести математичне дослідження етапу проникнення ЕУ в металеву пластину захисної конструкції.
4. Здійснити математичний аналіз впливу підпружинення захисної пластини, або його відсутності, на величину кінематичних та силових характеристик ЕУ та захисної пластини, при їх взаємодії.
5. Здійснити математичний опис явища рикошету ЕУ при його ударі об захисну пластину та визначення необхідних умов для його реалізації.
6. Провести математичне дослідження динаміки взаємодії ЕУ та захисної конструкції з рознесеними пластинами.
7. Оцінити рівень захищеності об'єкта в залежності від геометричних та фізико-механічних параметрів матеріалів ЕУ та захисної конструкції.
8. Дослідити вплив захисної конструкції на заброньові кінетичні параметри ЕУ.
9. Дослідити вплив кутової швидкості нутації ЕУ на його подальшу пробивну здатність.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ ЗАСАДИ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТУ УРАЖЕННЯ (КУЛІ, ОСКОЛКУ) З НЕРУХОМИМ ТА РУХОМИМ ТІЛОМ

Взаємодію кулі з захисною бронею можна розбити на три, пов'язаних між собою, етапи. Перший етап – проникнення кулі в поверхню захисної броні. Другий етап – пробивання захисної броні та завершальний етап – виліт кулі з неї.

В даному розділі розглядаються перший та другий етапи, тобто задачі проникнення вражаючим елементом (кулею, осколком) в поверхню захисної броні та пробиванням нерухомого або рухомого тіла. На ці етапи впливає швидкість елемента ураження в момент контакту із бронею. У випадку рухомого тіла досліджується вплив його підпружинення так і відсутність останнього. Визначено кінематичні та динамічні характеристики їх взаємодії. Встановлено залежності між масою елемента ураження, його швидкістю, фізико-механічними властивостями матеріалу тіла та жорсткістю підпружинення на проникаючу та пробивну здатність елемента ураження.

2.1. Визначення величини сили лобового опору повітря під час руху елемента ураження

Проникнення кулі в броню залежить від її швидкості, конструктивних особливостей, матеріалів з яких вона виготовлена та інших факторів. Дослідимо вплив опору повітря на кінематичні параметри руху кулі, тобто зміну величини швидкості в залежності від подоланого шляху.

Для вирішення поставленої мети необхідно розглянути задачу зовнішньої балістики (див. рис. 2.1). Рух ЕУ однозначно визначається діючими на нього силами та початковими умовами. Щодо перших чинників то це сила ваги ЕУ – \vec{P}_1

і опору повітря – $\vec{R}_{нов}$. Величину останньої визначають [16] відповідно до формули

$$R_{нов}(t) = c \rho s (V(t))^{2+\gamma_i} \left(\frac{V(t)}{340,2} \right)^{\beta_i}, \quad (2.1)$$

де c – коефіцієнт, який враховує аеродинамічність форми ЕУ; ρ – густина повітря; s – максимальна площа поперечного перерізу ЕУ площиною перпендикулярною до напрямку його швидкості; $340,2 \frac{M}{c}$ – величина швидкості звуку в повітрі при температурі $t = 15^0 C$; $\gamma_i (i=1,2)$ і $\beta_i (i=1,2)$ – коефіцієнти, значення яких визначають використовуючи результати експериментальних досліджень і вони мають різні значення при надзвуковій ($i=1$) та дозвуковій ($i=2$) швидкостях; $V(t)$ – швидкість ЕУ в довільний момент часу.

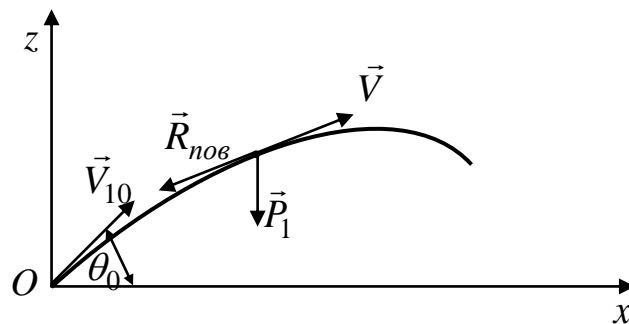


Рис.2.1. Схема руху елемента ураження в повітрі

Використовуючи основне співвідношення динаміки [5, 113] запишемо

$$m_1 \vec{a} = \vec{P}_1 + \vec{R}_{нов}. \quad (2.2)$$

де m_1 – маса ЕУ.

Проектуючи рівняння (2.2) на осі координат отримаємо

$$m_1 \ddot{x} = -c \rho s V^{2+\gamma_i} \left(\frac{V(t)}{340,2} \right)^{\beta_i} \cos \theta, \quad (2.3)$$

$$m_1 \ddot{z} = -m_1 g - c \rho s V^{2+\gamma_i} \left(\frac{V(t)}{340,2} \right)^{\beta_i} \sin \theta, \quad (2.4)$$

де $g = 9,81 \frac{M}{c^2}$ – прискорення вільного падіння тіла, θ – кут нахилу швидкості кулі до горизонту в довільний момент часу.

Враховуючи, що $\cos\theta = \frac{V_x}{V}$, $\sin\theta = \frac{V_z}{V}$, $V_x(t) = \dot{x}(t)$, $V_z(t) = \dot{z}(t)$ і

$V(t) = \sqrt{(\dot{x}(t))^2 + (\dot{z}(t))^2}$ залежності (2.3) і (2.4) набудуть вигляду

$$m_1 \ddot{x} = -c\rho s V^{2+\gamma_i} \left(\frac{V(t)}{340,2} \right)^{\beta_i} \frac{V_x(t)}{V(t)}, \quad (2.5)$$

$$m_1 \ddot{z} = -m_1 g - c\rho s V^{2+\gamma_i} \left(\frac{V(t)}{340,2} \right)^{\beta_i} \frac{V_z(t)}{V(t)}, \quad (2.6)$$

або

$$m_1 \ddot{x} = -\frac{c\rho s \dot{x}}{340,2^{\beta_i}} (\dot{x}^2 + \dot{z}^2)^{0,5(1+\gamma_i+\beta_i)}, \quad (2.7)$$

$$m_1 \ddot{z} = -m_1 g - \frac{c\rho s \dot{z}}{340,2^{\beta_i}} (\dot{x}^2 + \dot{z}^2)^{0,5(1+\gamma_i+\beta_i)}. \quad (2.8)$$

На початку руху кулі її швидкість є надзвукова, тому необхідно розв'язувати систему диференціальних рівнянь (2.7) і (2.8), при ($i=1$), враховуючи початкові умови:

$$x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = V_0 \cos\theta_0, \quad z(0) = 0, \quad \dot{z}(0) = V_0 \sin\theta_0, \quad (2.9)$$

де V_0 – початкова швидкість ЕУ, θ_0 – кут кидання.

Під час проведення експериментальних досліджень отримано числові значення швидкості кулі випущеної з різних типів стрілецької зброї в залежності від повної горизонтальної віддалі, яку вона пролетіла. Тому можна розв'язувати обернену задачу динаміки, коли відомими є швидкості кулі на певній горизонтальній віддалі, величину яких визначили експериментальним методом:

$$V_0, V_{100}, V_{200}, V_{300}, V_{400}, \dots, V_{n00} \geq 340,2, \quad (2.10)$$

де V_{n00} – швидкість кулі, коли вона пролетіла $n00$ метрів повної горизонтальної віддалі.

Оскільки, аналітичний розв'язок системи диференціальних рівнянь (2.7) і (2.8), з початковими умовами (2.9) та врахуванням результатів експериментальних досліджень (2.10), отримати проблематично, то визначення значень коефіцієнтів c , γ_1 і β_1 , які дозволяють описати силу лобового опору повітря при надзвуковій швидкості кулі, здійснюємо методом їх підбору.

Розглянемо динаміку руху кулі калібру 7,62 мм з випущеної з СВД. Вихідні значення параметрів наступні: маса кулі $m_1 = 0,0096$ кг, початкова швидкість $V_0 = 830$ м/с, калібр $d = 7,62$ мм, площа поперечного перерізу $s = \pi \cdot 0,00381^2$ м², густина повітря $\rho = 1,2$ кг/м³. Методом підбору вибрали такі значення величин $c=0,9$, $\gamma_1=-0,247$ і $\beta_1=-0,005$, які дозволили отримати незначну розбіжність між теоретичними і експериментальними результатами швидкості кулі у випадку її лету з надзвуковою швидкістю.

Таблиця 2.1.

Значення теоретичних і експериментальних кінематичних параметрів кулі калібру 7,62 мм випущеної з СВД з надзвуковою швидкістю

| t_k (с) | θ_0 , рад | $z(t_k)$, м | $x(t_k)$, м | $\dot{z}(t_k)$, м/с | $\dot{x}(t_k)$, м/с | $V(t_k)$, м/с | $V_{екс}$, м/с | Δ , % |
|-----------|------------------|--------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------|-----------------|--------------|
| 0,1266 | 0,00077 | 0,00 | 100 | -0,60 | 752,28 | 752,28 | 755 | -0,36 |
| 0,2664 | 0,00163 | 0,00 | 200 | -1,27 | 680,16 | 680,16 | 685 | -0,71 |
| 0,4213 | 0,002632 | 0,00 | 300 | -1,97 | 613,31 | 613,31 | 618 | -0,76 |
| 0,5933 | 0,003785 | 0,00 | 400 | -2,74 | 551,51 | 551,52 | 554 | -0,45 |
| 0,7848 | 0,005124 | 0,00 | 500 | -3,58 | 494,50 | 494,52 | 495 | -0,10 |
| 0,9987 | 0,00669 | 0,00 | 600 | -4,49 | 442,02 | 442,05 | 441 | 0,24 |
| 1,2385 | 0,00853 | 0,00 | 700 | -5,50 | 393,81 | 393,84 | 392 | 0,47 |
| 1,5082 | 0,010705 | 0,00 | 800 | -6,62 | 349,62 | 349,68 | 350 | -0,09 |

В таблиці: t_k – теоретичне значення часу за який куля долає певну горизонтальну віддаль; $x(t_k)$ і $z(t_k)$ – координати кулі в момент часу t_k ; $\dot{x}(t_k)$ і $\dot{z}(t_k)$ – проекції швидкості кулі на відповідні осі; $V(t_k)$ – теоретична швидкість кулі в момент часу

t_k ; $V_{екс}$ – експериментальне значення швидкості кулі [110]; Δ – відносна різниця між теоретичними та експериментальними значеннями швидкостей кулі оцінена у відсотках.

Після моментів часу $t_{1k}=1,5726 - 1,5738$ с, величина якого залежить від кута кидання, теоретична швидкість кулі стає дозвуковою і тому, вже на цьому етапі її лету, величину сили лобового опору повітря визначаємо використовуючи формулу (2.1), однак при інших значеннях параметрів γ_2 і β_2 . Їх значення вибираємо таким чином, щоб між теоретичними та експериментальними (2.11) результатами

$$340,2 \geq V_{(n+1)00}, V_{(n+2)00}, V_{(n+3)00}, V_{(n+4)00}, \dots \quad (2.11)$$

була незначна розбіжність.

Початковими умовами для системи диференціальних рівнянь (2.7) і (2.8), на етапі лету з дозвуковою швидкістю, є значення кінематичних параметрів кулі в момент часу, коли швидкість кулі стає рівною швидкості звуку в повітрі. Це забезпечує поєднання етапів лету кулі з надзвуковою та дозвуковою швидкостями.

Величину коефіцієнта, який враховує аеродинамічність форми кулі, залишили без змін, тобто $c=0,9$, а параметрам γ_2 і β_2 , на етапі лету кулі з дозвуковою швидкістю, надали значення: $\gamma_2=-0,331$ і $\beta_2=2,1$.

Таблиця 2.2

Значення теоретичних і експериментальних кінематичних параметрів при дозвуковій швидкості кулі калібру 7,62 мм випущеної з СВД

| $t_k(c)$ | $\theta_0, рад$ | $z(t_k), м$ | $x(t_k), м$ | $\dot{z}(t_k), м/с$ | $\dot{x}(t_k), м/с$ | $V(t_k), м/с$ | $V_{екс}(t_k), м/с$ | $\Delta, \%$ |
|----------|-----------------|-------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------|---------------------|--------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1,8077 | 0,013285 | 0,00 | 900 | -8,10 | 321,99 | 322,10 | 320 | 0,66 |
| 2,1287 | 0,016295 | 0,00 | 1000 | -9,74 | 302,05 | 302,21 | 302 | 0,07 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------|----------|------|------|--------|--------|--------|-----|-------|
| 2,4698 | 0,019738 | 0,00 | 1100 | -11,47 | 285,19 | 285,42 | 286 | 0,20 |
| 2,8302 | 0,023615 | 0,00 | 1200 | -13,28 | 270,68 | 271,01 | 272 | -0,36 |
| 3,2089 | 0,027925 | 0,00 | 1300 | -15,18 | 258,04 | 258,49 | 256 | 0,97 |
| 3,6058 | 0,032678 | 0,00 | 1400 | -17,16 | 246,89 | 247,49 | 245 | 1,02 |
| 4,0202 | 0,037876 | 0,00 | 1500 | -19,22 | 236,95 | 237,73 | 233 | 2,03 |

Порівнюючи отримані теоретичні значення кінематичних параметрів з результатами експериментальних досліджень, для кулі калібру 7,62 мм випущеної з СВД, можна стверджувати, що розбіжність між ними є в межах від -0,71% до 0,97%. Якщо швидкість кулі є меншою від $V = 256 \frac{m}{c}$, то похибка між теоретичними та експериментальними значеннями швидкості кулі різко зростає, що свідчить про зростання кута нутації для ЕУ.

Знаючи функціональну залежність між величиною лобового опору повітря та швидкістю кулі, густиною повітря, швидкістю поширення звуку у повітрі, можна визначити вплив зміни цих величин на кінематичні параметри кулі, а також їх залежність від величини кута прицілювання, напрямку і швидкості вітру та інше.

2.2. Динамічні та кінематичні характеристики етапу проникнення елементу ураження в броню

Розглядається механічна система, яка складається з ЕУ (кулі чи осколку) та нерухомого тіла (металевої броні, перешкоди). Вважається, що форма ЕУ має вигляд прямокутного паралелепіпеда з основою ($b \times b$) та висотою L , його маса m_1 та швидкість, в момент торкання передньої поверхні нерухомого тіла, $-\vec{V}_{10}$.

Аналізуючи реальний процес проникнення ЕУ в металеву перешкоду можна допустити, що впродовж цього періоду точка E (рис.2.2) залишається нерухомою; до моменту проникнення деформується тільки ЕУ (область деформації вказана трикутником ΔEKG на рис. 2.2 і рис. 2.3).

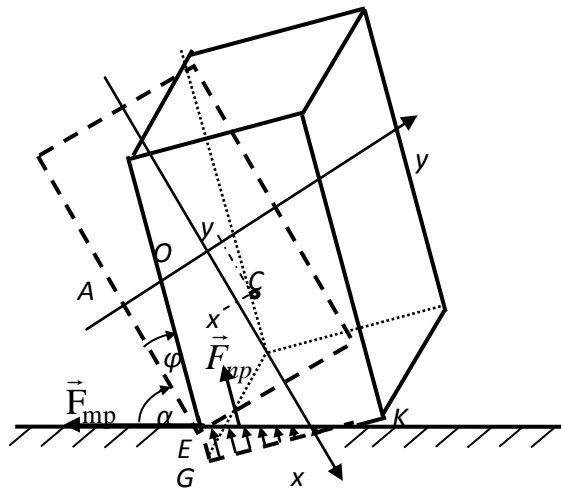


Рис. 2.2. Схематичне зображення взаємодії елемента ураження з металевією пластинією на етапі проникнення

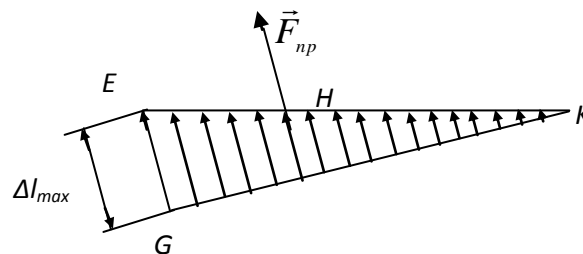


Рис. 2.3. Схема розподілу інтенсивності пружних сил та їх рівнодійної

Інтенсивність сил пружності від деформації ЕУ, описується залежністю $q = c \cdot \Delta l$, де c – жорсткість деформівного елемента, а Δl – величина його деформації.

Сумарна сила пружності від деформування ЕУ дорівнюватиме

$$F_{np} = 0,5c \cdot \Delta l_{\max} \cdot GK, \quad (2.12)$$

де $\Delta l_{\max} = EG$ – максимальна деформація ЕУ.

Оскільки, $GK = \Delta l_{\max} \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)$, то залежність (2.12) набуде вигляду

$$F_{np} = 0,5c \cdot (\Delta l_{\max})^2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi), \quad (2.13)$$

де α – кут між напрямком швидкості ЕУ, до співудару тіл, з дотичною до поверхні металевієї пластини; φ – кут обертання ЕУ за проміжок часу $[0; t]$.

Точка прикладання H сили \vec{F}_{np} поділяє відрізок EK у співвідношенні 1:2, а саме – $EH = 0,5HK$.

Враховуючи геометрію рис. 2.2, запишемо, що

$$\begin{aligned}x &= 0,5L - 0,5L \cos \varphi + 0,5b \sin \varphi + \Delta l_{\max} \cos \varphi, \\y &= 0,5b \cos \varphi - 0,5b + 0,5L \sin \varphi - \Delta l_{\max} \sin \varphi,\end{aligned}\quad (2.14)$$

де x і y – координати центру мас C ЕУ в довільний момент часу.

Оскільки кут φ – мала величина, то провівши лінеаризацію рівнянь (2.14) отримаємо:

$$x = 0,5b\varphi + \Delta l_{\max}, \quad y = 0,5L\varphi - \Delta l_{\max}\varphi. \quad (2.15)$$

В процесі співудару тіл на ЕУ діють сили: \vec{P} – вага ЕУ (якою можна знехтувати оскільки її величина є малою в порівнянні з іншими силами); \vec{F}_{np} – сила пружності обумовлена деформацією ЕУ; \vec{F}_{mp} – сила тертя, яка виникає в зоні контакту ЕУ з поверхнею металевої пластини.

Вважаючи, що ЕУ здійснює плоский рух та враховуючи накладені обмеження, можна стверджувати, що він має два ступені вільності. Система диференціальних рівнянь, яка описує динаміку взаємодії ЕУ з поверхнею металевої пластини, матиме вигляд

$$m_1 \ddot{x} = -F_{np} \cos \varphi - F_{mp} \cos \alpha; \quad (2.16)$$

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

де $\gamma = \angle AEO$, O – положення центру мас ЕУ в початковий момент її дотику до поверхні броні і є центром вибраної системи координат Oxy ; I_C – момент інерції ЕУ відносно осі перпендикулярної до площини рисунка (рис. 2.2) та яка проходить через його центр мас.

Враховуючи (2.13) і (2.15) система диференціальних рівнянь (2.16) набуде вигляду

$$\begin{aligned}m_1 \ddot{x} &= -0,5c(x - 0,5b\varphi)^2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \cos \varphi - F_{mp} \cos \alpha; \\I_C \ddot{\varphi} &= 0,5c(x - 0,5b\varphi)^2 \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \left(0,5b - \frac{(x - 0,5b\varphi) \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{3} \right) +\end{aligned}\quad (2.17)$$

$$+ F_{np} \left(0,5\sqrt{b^2 + L^2} \sin(\alpha + \gamma + \varphi) - (x - 0,5b\varphi) \sin(\alpha + \varphi) \right).$$

При розв'язуванні цієї системи рівнянь брались наступні початкові умови: $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = V_{10}$, $\varphi(0) = 0$ і $\dot{\varphi}(0) = 0$, де V_{10} – швидкість ЕУ в момент його дотику до поверхні металевої пластини.

Вважається, що перший етап (проникнення) триватиме до того моменту, поки буде виконуватись наступна нерівність

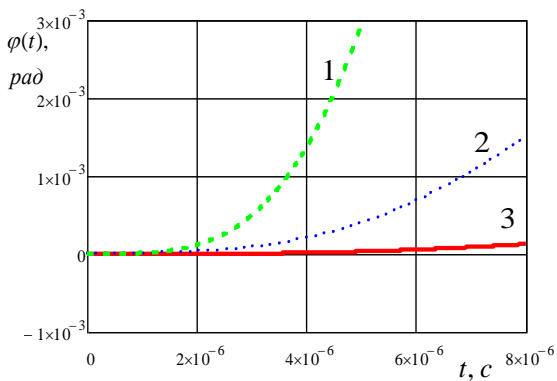
$$F_{np}(t) \sin(\alpha + \varphi(t)) < R_{on}, \quad (2.18)$$

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

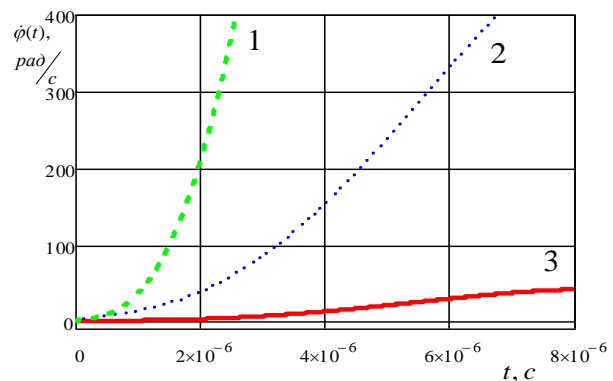
В момент часу, коли величина сили пружності задовільняє рівняння

$$F_{np}(t_k) \sin(\alpha + \varphi(t_k)) = R_{on}, \quad (2.19)$$

завершується перший етап співудару ЕУ та металевої пластини і починається наступний етап – пробивання броні ЕУ.



а)



б)

Рис. 2.4. Зміни в часі а) кута обертання та б) кутової швидкості елемента ураження за різних значень пружності його матеріалу (c): $1 - c = 36 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$,

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

Система диференціальних рівнянь (2.17) є нелінійною і отримати її аналітичний розв'язок проблематично. Тому розв'язок цієї системи рівнянь отримуємо використовуючи математичне забезпечення MathCAD.

Підчас здійснення обчислень брались наступні значення: $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$ – маса кулі; $L = 0,0323 \text{ м}$ – довжина кулі; $b = 0,00762 \text{ м}$ – діаметр кулі,

$$I_C = \frac{m_1(b^2 + L^2)}{3} = 0,881 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Вказані залежності (рис. 2.4) враховували значення величин $F_{mp} = 500 \text{ н}$, $R_{on} = 40000 \text{ н}$, $\alpha = 60^\circ$ і $V_{10} = 800 \text{ м/с}$.

Таблиця 2.3

Величини кінематичних параметрів кулі на етапі проникнення при

значеннях $F_{mp} = 5000 \text{ н}$, $c = 36 \cdot 10^8 \text{ н/м}$, $R_{on} = 40000 \text{ н}$ і $\alpha = 60^\circ$

| $V_{10}, (\text{м/с})$ | $t_k, (\text{с})$ | $x(t_k), (\text{м})$ | $\dot{x}(t_k), (\text{м/с})$ | $\varphi(t_k), (\text{рад})$ | $\dot{\varphi}(t_k), (\text{с}^{-1})$ | $y(t_k), (\text{м})$ |
|------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 400 | $9,7 \cdot 10^{-6}$ | 0,00384 | 382 | $5,0 \cdot 10^{-3}$ | 1154 | $0,74 \cdot 10^{-4}$ |
| 500 | $7,7 \cdot 10^{-6}$ | 0,00384 | 485 | $3,2 \cdot 10^{-3}$ | 919 | $0,44 \cdot 10^{-4}$ |
| 600 | $6,4 \cdot 10^{-6}$ | 0,00384 | 588 | $2,1 \cdot 10^{-3}$ | 763 | $0,29 \cdot 10^{-4}$ |
| 700 | $5,5 \cdot 10^{-6}$ | 0,00384 | 690 | $1,6 \cdot 10^{-3}$ | 653 | $0,21 \cdot 10^{-4}$ |
| 800 | $4,8 \cdot 10^{-6}$ | 0,00384 | 791 | $1,2 \cdot 10^{-3}$ | 571 | $0,15 \cdot 10^{-4}$ |

Таблиця 2.4

Величини кінематичних параметрів кулі на етапі проникнення при

значеннях $F_{mp} = 5000 \text{ н}$, $c = 36 \cdot 10^8 \text{ н/м}$, $R_{on} = 40000 \text{ н}$ і $\alpha = 30^\circ$

| $V_{10}, (\text{м/с})$ | $t_k, (\text{с})$ | $x(t_k), (\text{м})$ | $\dot{x}(t_k), (\text{м/с})$ | $\varphi(t_k), (\text{рад})$ | $\dot{\varphi}(t_k), (\text{с}^{-1})$ | $y(t_k), (\text{м})$ |
|------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 400 | $2,2 \cdot 10^{-5}$ | 0,00861 | 324 | $2,6 \cdot 10^{-2}$ | 2982 | $0,53 \cdot 10^{-3}$ |
| 500 | $1,8 \cdot 10^{-5}$ | 0,00867 | 441 | $1,6 \cdot 10^{-2}$ | 2339 | $0,25 \cdot 10^{-3}$ |
| 600 | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | 0,00870 | 551 | $1,1 \cdot 10^{-2}$ | 1930 | $0,14 \cdot 10^{-3}$ |
| 700 | $1,3 \cdot 10^{-5}$ | 0,00872 | 659 | $0,79 \cdot 10^{-2}$ | 1646 | $0,91 \cdot 10^{-4}$ |
| 800 | $1,1 \cdot 10^{-5}$ | 0,00873 | 764 | $0,61 \cdot 10^{-2}$ | 1435 | $0,63 \cdot 10^{-4}$ |

Оскільки значення величин F_{mp} , c і R_{on} , які залежать від фізико-механічних властивостей взаємодіючих тіл та їх геометричних параметрів можна визначити лише експериментальним шляхом, тому розрахунки здійснювались при значному діапазоні зміни їх величин.

Висновки.

Аналізуючи значення величин в таблицях 2.3 і 2.4 та результати при інших значеннях параметрів F_{mp} , c , α і R_{on} , які не приведені тут, можна стверджувати:

- із зростанням швидкості кулі V_{10} тривалість співудару тіл t_k зменшується;
- переміщення центру мас кулі $x(t_k)$ вздовж осі Ox за час співудару тіл t_k суттєво не змінюється із зростанням швидкості V_{10} ;
- швидкість кулі V_1 в процесі співудару тіл зменшується;
- величина кута обертання кулі $\varphi(t_k)$ збільшується при зменшенні пружних властивостей матеріалу кулі, тобто напрям швидкості кулі змінюючись намагається зайняти перпендикулярне положення до площини поверхні металевої броні;
- суттєвим під час співудару тіл є велике значення кутової швидкості кулі $\dot{\varphi}(t_k)$ і чим більша початкова швидкість кулі V_{10} , тим її величина буде менша;
- при збільшенні жорсткості кулі c тривалість етапу проникнення і кутова швидкість кулі зменшуються;
- збільшення величини сили опору металевої броні R_{on} супроводжується збільшенням тривалості етапу проникнення і можливістю явища рикошету;
- при зменшенні кута α , між напрямком початкової швидкості кулі \vec{V}_{10} і дотичною до поверхні металевої броні, тривалість етапу проникнення збільшується і зростає можливість явища рикошету.

2.3. Кінематичні характеристики взаємодії елемента ураження та нерухомої перешкоди

Для визначення величини сили опору матеріалу перешкоди рухові ЕУ запишемо рівняння балансу енергії під час їх взаємодії

$$\frac{m_1 V_{10}^2}{2} = \frac{m_1 V_{1z}^2}{2} + \sum \frac{m_{ikor} V_{ikor}^2}{2} + \Delta W_1 + \Delta W_2,$$

де $\left(\frac{m_1 V_{10}^2}{2}\right)$ – початкова кінетична енергія ЕУ, $\left(\frac{m_1 V_{1z}^2}{2}\right)$ – заброньова кінетична енергія ЕУ, $\left(\sum \frac{m_{ikor} V_{ikor}^2}{2}\right)$ – кінетична енергія осколків з матеріалу перешкоди, (ΔW_1) – енергія затрачена на пружно-пластичне деформування матеріалу перешкоди та ЕУ та (ΔW_2) – енергія їх нагріву.

В цьому розділі величинами кінетичної енергії осколків та теплової енергії нагріву матеріалів перешкоди та ЕУ нехтується. Тому теоретичне значення заброньової швидкості ЕУ буде більше від його реальної швидкості.

Розглядається механічна система, яка складається з кулі та нерухомої перешкоди. Вважається, що маса кулі m_1 і її швидкість в момент торкання передньої поверхні нерухомого тіла \vec{V}_{10} . Визначимо силу опору \vec{R}_{on} тіла рухові кулі, якщо вона пройде всередині нерухомого тіла шлях l_{1k} і зупиниться.

Використаємо для цього теорему про зміну кінетичної енергії матеріальної точки [5, 75]: зміна кінетичної енергії матеріальної точки на деякому шляху дорівнює роботі всіх сил, які діють на матеріальну точку, на цьому переміщенні –

$$T_k - T_0 = \sum_{i=1}^n A_i, \quad (2.20)$$

де T_k – кінетична енергія матеріальної точки в кінцевому положенні, T_0 – кінетична енергія матеріальної точки в початковому положенні, $\sum_{i=1}^n A_i$ – сума робіт, яку виконують всі сили прикладені до матеріальної точки.

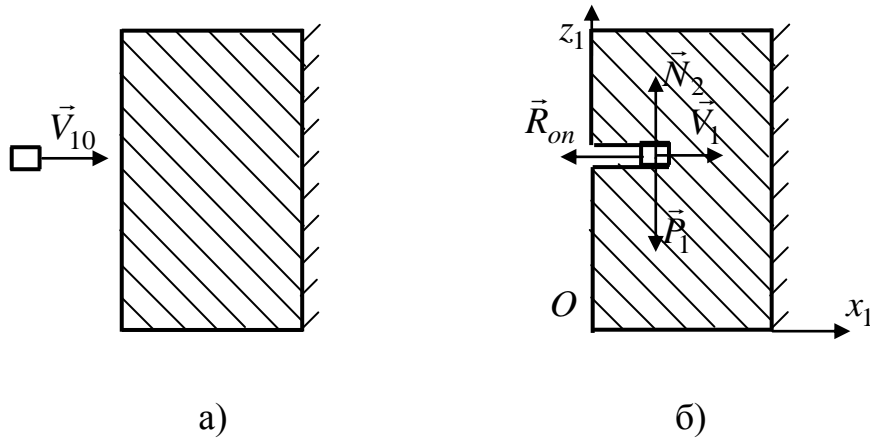


Рис. 2.5. Схематичне зображення а) контакту та б) руху кулі всередині перешкоди

Повна кінетична енергія кулі дорівнює

$$T = \frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{I_1 \omega_1^2}{2},$$

де V_1 – швидкість кулі внаслідок її поступального руху, I_1 – момент інерції кулі відносно її осі симетрії, ω_1 – кутова швидкість обертання кулі відносно її осі симетрії.

Оскільки, кінетична енергія обертального руху кулі є значно меншою величиною від кінетичної енергії її поступального руху, тому кінетичною енергією обертального руху будемо нехтувати. Отже, кінетична енергія кулі в момент її торкання передньої поверхні нерухомого тіла дорівнює

$$T_0 = 0,5 m_1 V_{10}^2. \quad (2.21)$$

Кінетична енергія кулі в кінцевому положенні дорівнює

$$T_k = 0, \quad (2.22)$$

оскільки в кінцевому положенні вона зупиняється, тобто $V_{1k} = 0$.

На матеріальну точку в процесі її руху діють сили: \vec{P}_1 – вага кулі, \vec{N}_2 – нормальна складова реакції нерухомого тіла і \vec{R}_{on} – сила опору тіла рухові матеріальної точки.

Величина елементарної роботи будь-якої сили \vec{F} на елементарному переміщенні $d\vec{r}$ визначається з допомогою формули [98]

$$dA_F = F \cdot dr \cos\theta,$$

де θ – кут між напрямком сили \vec{F} і напрямком її переміщення $d\vec{r}$.

Сила ваги кулі \vec{P}_1 і нормальна реакція нерухомого тіла \vec{N}_2 роботи не виконують, оскільки кут між напрямками цих сил і переміщенням дорівнює 90^0 .

Роботу виконує лише сила опору нерухомого тіла \vec{R}_{on} і величина роботи цієї сили на переміщенні l_{1k} дорівнює

$$A_{R_{on}} = R_{on} \cdot l_{1k} \cos 180^0 = -R_{on} \cdot l_{1k}.$$

Отже, сума робіт всіх сил, що діють на матеріальну точку

$$\sum_{i=1}^n A_i = -R_{on} \cdot l_{1k}. \quad (2.23)$$

Враховуючи значення кінетичної енергії в початковий (2.21) і кінцевий (2.22) моменти часу, та (2.23) формула (2.20) набуде вигляду

$$0 - 0,5m_1V_{10}^2 = -R_{on} \cdot l_{1k}. \quad (2.24)$$

Звідси визначаємо величину сили опору матеріалу перешкоди певному типу вражаючого фактору

$$R_{on} = \frac{m_1V_{10}^2}{2l_{1k}}. \quad (2.25)$$

Наприклад, з експериментальних даних відомо, що куля масою $m_1 = 0,0096$ кг калібру 7,62 мм зі стальним осердям випущена із снайперської гвинтівки Драгунова маючи швидкість $V_{10} = 299 \frac{m}{c}$, в момент торкання земляного насипу, проходить шлях $l_{1k} = 0,3m$ і зупиняється. Підставляючи ці дані

в залежність (2.25) отримаємо, що середня величина сили опору земляного насипу для кулі

$$R_{on} = \frac{m_1 V_{10}^2}{2l_{1k}} = \frac{0,0096 \text{ кг} \cdot (299 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 0,3 \text{ м}} = 1430 \text{ н}.$$

Аналогічно можна визначити наближене значення сили опору для різних матеріалів перешкоди та типів куль.

Якщо відома сила опору матеріалу нерухомого тіла для певного типу куль, то шлях який пройде куля в ньому до зупинки визначається з формули

$$l_{1k} = \frac{m_1 V_{10}^2}{2R_{on}}. \quad (2.26)$$

Динаміка руху кулі. Враховуючи другий закон динаміки [113] запишемо диференціальне рівняння руху кулі відносно нерухомого тіла

$$m_1 \ddot{x}_1 = -R_{on}.$$

Інтегруючи це рівняння [38, 51], отримаємо

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{R_{on}}{m_1} t + C_1 \quad \text{і} \quad x_1(t) = -\frac{R_{on} t^2}{2m_1} + C_1 t + C_2.$$

Сталі інтегрування визначаємо з початкових умов

$$x_1(0) = 0 \quad \text{і} \quad \dot{x}_1(0) = V_{10}$$

і тоді $C_1 = V_{10}$, $C_2 = 0$.

Отже, зміна швидкості та закон руху кулі відносно нерухомого тіла описуються рівняннями

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{R_{on}}{m_1} t + V_{10} \quad \text{і} \quad x_1(t) = -\frac{R_{on} t^2}{2m_1} + V_{10} t.$$

Якщо куля пробиває нерухоме тіло товщиною l_2 , то вона це здійснює за проміжок часу

$$t_{1,2} = \frac{m_1 V_{10}}{R_{on}} \pm \sqrt{\left(\frac{m_1 V_{10}}{R_{on}}\right)^2 - \frac{2m_1 l_2}{R_{on}}}.$$

З фізичних міркувань тривалість пробиття тіла визначається з рівняння

$$t_k = \frac{m_1 V_{10}}{R_{on}} - \sqrt{\left(\frac{m_1 V_{10}}{R_{on}}\right)^2 - \frac{2m_1 l_2}{R_{on}}}. \quad (2.27)$$

Швидкість кулі після вильоту з тіла дорівнює

$$V_{кулі}(t_k) = \dot{x}_1(t_k) = V_{10} - \frac{R_{on}}{m_1} t_k. \quad (2.28)$$

Аналізуючи вираз (2.27) можна стверджувати, що елемент ураження проб'є нерухоме тіло товщиною l_2 , якщо виконується нерівність

$$\left(\frac{m_1 V_{10}}{R_{on}}\right)^2 - \frac{2m_1 l_2}{R_{on}} > 0 \text{ або } 0,5m_1 V_{10}^2 - R_{on} l_2 > 0.$$

2.4. Кількісний аналіз взаємодії елемента ураження та рухомої перешкоди

Розглядається механічна система, яка складається з елемента ураження та рухомої перешкоди. Визначимо, якою буде швидкість останньої, якщо ЕУ, маючи початкову швидкість \vec{V}_{10} , застрягне у перешкоді.

Механічна система має два ступені вільності [76]. За узагальнені координати вибираємо: x_1 – координату ЕУ відносно рухомої системи координат, початок якої закріплений на передній (лівій) поверхні тіла, x_2 – координата передньої поверхні тіла відносно нерухомої системи координат Oxz .

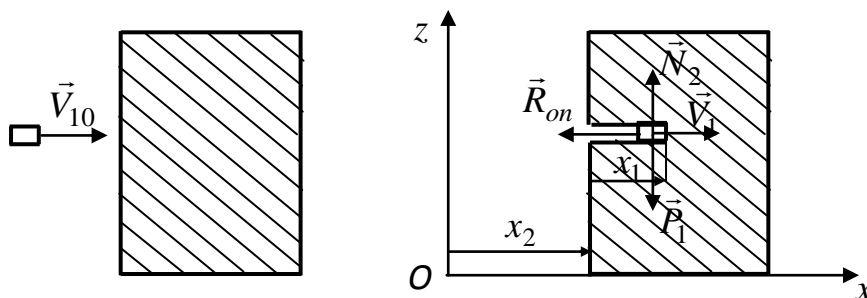


Рис. 2.6. Схематичне зображення руху кулі в рухомому тілі

Рух механічної системи опишемо рівняннями Лагранжа другого роду [56, 57]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_{q_i}, \quad (i=1,2), \quad (2.29)$$

де T – кінетична енергія механічної системи; q_i ($i=1,2$) – узагальнені координати, Q_{q_i} – узагальнені сили за координатами q_i .

Абсолютна швидкість кулі в поступальному русі дорівнює сумі швидкості кулі відносно тіла і швидкості тіла [5]. Тому кінетичну енергію кулі визначаємо, використовуючи залежність

$$T_1 = \frac{m_1(\dot{x}_1 + \dot{x}_2)^2}{2}. \quad (2.30)$$

Оскільки, тіло здійснює поступальний рух, то його кінетична енергія дорівнює

$$T_2 = \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2}, \quad (2.31)$$

де m_2 – маса тіла, \dot{x}_2 – швидкість тіла відносно нерухомої системи координат.

Отже, кінетична енергія механічної системи дорівнює

$$T = \frac{m_1(\dot{x}_1 + \dot{x}_2)^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2}. \quad (2.32)$$

Враховуючи, що $q_1 = x_1$ і $q_2 = x_2$ та (2.32), ліві частини рівняння Лагранжа набудуть вигляду:

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) \quad \text{і} \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) = m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_2 \ddot{x}_2. \quad (2.33)$$

Узагальнена сила за координатою x_1 дорівнює

$$Q_{x_1} = -R_{on}, \quad (2.34)$$

а за координатою x_2

$$Q_{x_2} = 0. \quad (2.35)$$

Враховуючи співвідношення (2.29), (2.33) – (2.35), рух механічної системи опишемо системою диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) &= -R_{on}; \\ m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_2 \ddot{x}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (2.36)$$

З цієї системи рівнянь отримаємо

$$m_2 \ddot{x}_2 = R_{on}. \quad (2.37)$$

Розв'язуючи це диференціальне рівняння [49, 54], запишемо

$$\begin{aligned} \dot{x}_2(t) &= \frac{R_{on}}{m_2} t + C_1, \\ x_2(t) &= \frac{R_{on} t^2}{2m_2} + C_1 t + C_2. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Сталі інтегрування C_1 і C_2 визначаємо з початкових умов

$$x_2(0) = 0 \text{ і } \dot{x}_2(0) = 0, \quad (2.39)$$

тоді $C_1 = 0$ і $C_2 = 0$.

Отже, закон руху тіла відносно нерухомої системи координат матиме вигляд

$$x_2(t) = \frac{R_{on} t^2}{2m_2}, \quad (2.40)$$

а його швидкість змінюється за законом

$$\dot{x}_2(t) = \frac{R_{on}}{m_2} t. \quad (2.41)$$

Враховуючи (2.36) і (2.37), визначаємо

$$\ddot{x}_1 = -\ddot{x}_2 - \frac{R_{on}}{m_1} \text{ або } \ddot{x}_1 = -\frac{(m_1 + m_2)R_{on}}{m_1 m_2}.$$

Інтегруючи це диференціальне рівняння отримаємо, що

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{(m_1 + m_2)R_{on} t}{m_1 m_2} + C_3, \quad x_1(t) = -\frac{(m_1 + m_2)R_{on} t^2}{2m_1 m_2} + C_3 t + C_4.$$

Сталі інтегрування C_3 і C_4 визначаємо використовуючи початкові умови

$$x_1(0) = 0 \text{ і } \dot{x}_1(0) = V_{10}, \quad (2.42)$$

тоді $C_3 = V_{10}$ і $C_4 = 0$.

Отже, закон руху кулі всередині тіла наступний

$$x_1(t) = -\frac{(m_1 + m_2)R_{on} t^2}{2m_1 m_2} + V_{10} t. \quad (2.43)$$

Зміна швидкості кулі відносно рухомої системи координат

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{(m_1 + m_2)R_{on}t}{m_1m_2} + V_{10}, \quad (2.44)$$

а відносно нерухомої системи координат, враховуючи (2.41) і (2.44),

$$V_1(t) = \dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t) \text{ або } V_1(t) = V_{10} - \frac{R_{on}t}{m_1}. \quad (2.45)$$

Використовуючи залежність (2.44) визначаємо момент часу t_k , коли куля в тілі зупиняється. Оскільки в цей момент часу швидкість кулі відносно тіла дорівнює нулеві, то

$$-\frac{(m_1 + m_2)R_{on}t_k}{m_1m_2} + V_{10} = 0 \text{ і } t_k = \frac{m_1m_2V_{10}}{(m_1 + m_2)R_{on}}. \quad (2.46)$$

На рис. 2.7 суцільною лінією показана крива, яка описує залежність тривалості руху кулі в тілі до зупинки від його маси, тобто

$$t_k(m_2) = \frac{m_1m_2V_{10}}{(m_1 + m_2)R_{on}}. \quad (2.47)$$

В цьому підрозділі для всіх подальших підрахунків брались наступні значення параметрів: $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $V_{10} = 700 \text{ м/с}$ і $R_{on} = 40000 \text{ н}$.

Аналізуючи залежність (2.47) та графік на рис. 2.7, можна стверджувати, що чим більша маса тіла тим довше куля рухається в тілі до зупинки. Однак існує граничне значення тривалості руху кулі в тілі. Якщо $m_2 \gg m_1$, то з формули (2.47) отримаємо

$$t_{kg} = \frac{m_1V_{10}}{R_{on}}.$$

При значеннях вказаних параметрів – граничне значення тривалості руху кулі $t_{kg} = 0,24 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Після моменту часу t_k куля і тіло рухаються з однаковою швидкістю відносно нерухомої системи координат, оскільки куля відносно тіла не рухається.

Підставляючи значення часу (2.46) в залежність (2.41) отримаємо, що

$$V_2(t_k) = \dot{x}_2(t_k) = \frac{R_{on}}{m_2}t_k = \frac{m_1V_{10}}{m_1 + m_2}. \quad (2.48)$$

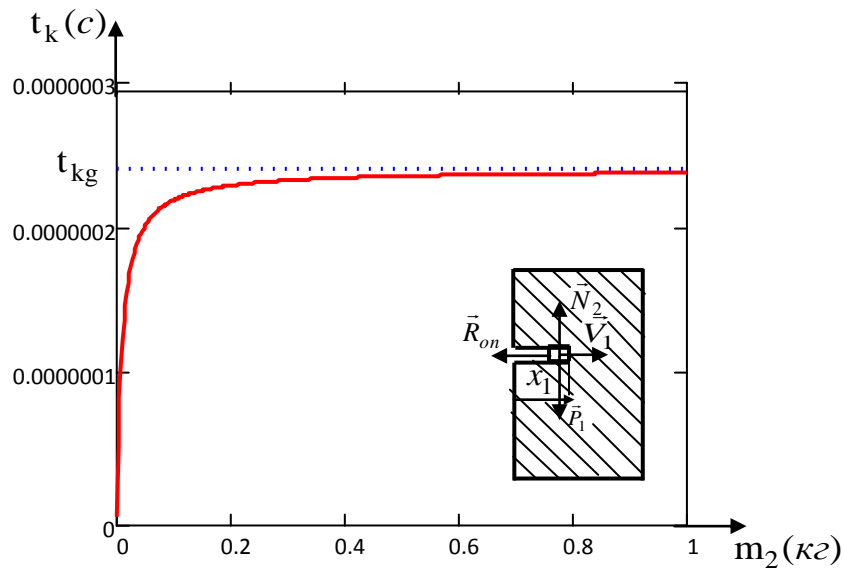


Рис. 2.7. Залежність тривалості руху кулі до її зупинки від маси перешкоди

На рис. 2.8 суцільною лінією показана крива, яка описує залежність швидкості тіла від його маси в момент часу, коли куля в перешкоді зупиняється, тобто

$$V_2(m_2) = \frac{m_1 V_{10}}{m_1 + m_2}.$$

Аналізуючи залежність (2.48) та графік на рис. 2.8, можна стверджувати, що зі збільшенням маси перешкоди її швидкість зменшується та прямує до нуля.

Куля до зупинки в тілі пройде шлях, який дорівнює

$$x_1(t_k) = -\frac{(m_1 + m_2)R_{on} t_k^2}{2m_1 m_2} + V_{10} t_k = \frac{m_1 m_2 V_{10}^2}{2(m_1 + m_2)R_{on}}. \quad (2.49)$$

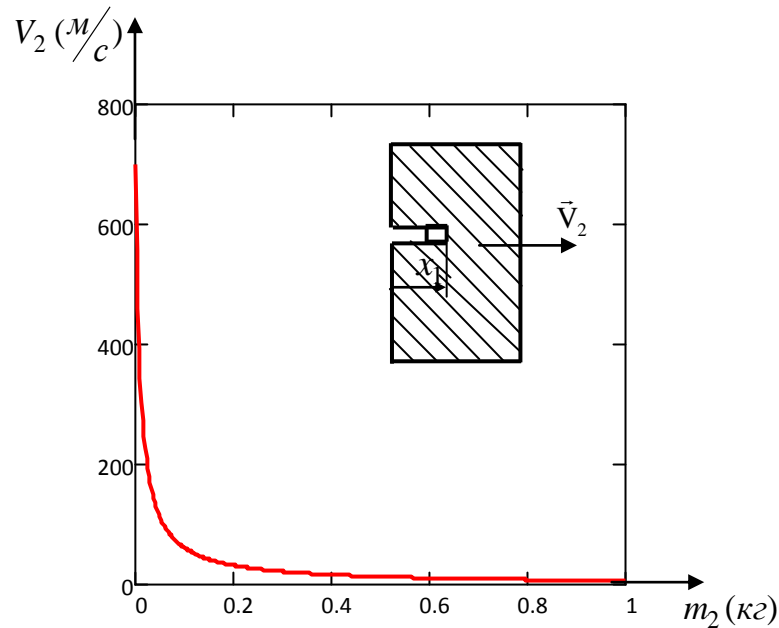


Рис. 2.8. Залежність швидкості тіла після зупинки в ньому кулі від його маси

На рис. 2.9 суцільною лінією показана крива, яка описує залежність шляху пройденого кулею в тілі до її зупинки, тобто

$$x_1(m_2) = \frac{m_1 m_2 V_{10}^2}{2(m_1 + m_2) R_{on}}.$$

Аналізуючи залежність (2.49) та графік на рис. 2.9 можна стверджувати, що із зростанням маси тіла повний шлях пройдений кулею в тілі до її зупинки зростає. Однак існує граничне значення величини шляху пройденого кулею в тілі до її зупинки, тобто якщо $m_2 \gg m_1$, то він визначається із залежності

$$x_{1g} = \frac{m_1 V_{10}^2}{2R_{on}}.$$

Для тих самих параметрів – граничне значення шляху, який долає куля в тілі – $x_{1g} = 0,0588$ м.

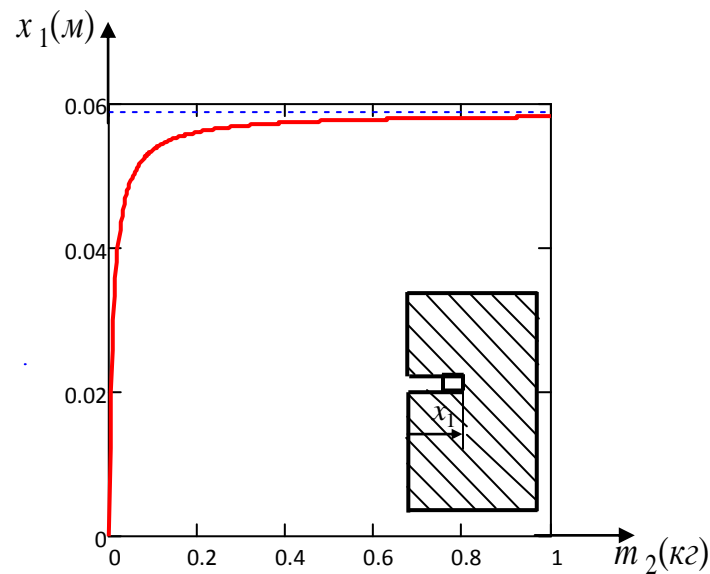


Рис. 2.9. Залежність величини шляху пройденого кулею до її зупинки в тілі від його маси

Із співвідношення (2.49) можна визначити необхідну товщину тіла, в залежності від значень параметрів m_1 , m_2 , V_{10} і R_{on} , щоб куля зупинилась на тилівій поверхні тіла, тобто

$$l_2 = \frac{m_1 m_2 V_{10}^2}{2(m_1 + m_2) R_{on}}.$$

Співставляючи результати для нерухомого і рухомого тіл, приходимо до висновків:

- повний шлях, який куля долає всередині рухомого тіла до зупинки, є меншим від шляху який би вона пододала, рухаючись відносно нерухомого тіла;
- куля швидше зупиняється в рухомому тілі, ніж в нерухомому.

Розглянемо випадок, якщо **куля пробиває повністю тіло товщиною l_2** . Тоді тривалість часу t_k пробивання тіла визначаємо з рівняння (2.43), яке враховуючи, що $x_1(t_k) = l_2$, набере вигляду

$$-\frac{(m_1 + m_2) R_{on} t_k^2}{2m_1 m_2} + V_{10} t_k = l_2.$$

Розв'язуючи квадратне рівняння отримаємо

$$t_k = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2) R_{on}} \left(V_{10} \pm \sqrt{V_{10}^2 - \frac{2(m_1 + m_2) R_{on} l_2}{m_1 m_2}} \right).$$

З фізичних міркувань беремо менше значення тривалості руху кулі в тілі

$$t_k = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2) R_{on}} \left(V_{10} - \sqrt{V_{10}^2 - \frac{2(m_1 + m_2) R_{on} l_2}{m_1 m_2}} \right). \quad (2.50)$$

При значеннях параметрів вказаних вище і товщини перешкоди – $l_2 = 0,04 \text{ м}$ залежність тривалості руху кулі в ній від маси тіла вказана суцільною лінією на рис. 2.10.

Аналізуючи залежність (2.50) і графік на рис. 2.10 можна стверджувати:

- із зростанням маси тіла тривалість руху кулі в тілі зменшується. Однак існує граничне значення тривалості руху кулі в тілі, тобто якщо $m_2 \gg m_1$, то вона визначається із залежності

$$t_{kg} = \frac{m_1}{R_{on}} \left(V_{10} - \sqrt{V_{10}^2 - \frac{2R_{on} l_2}{m_1}} \right);$$

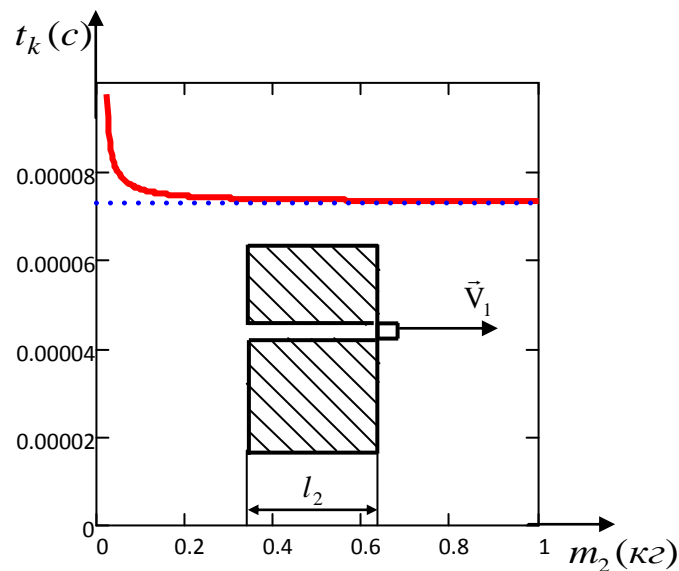


Рис. 2.10. Залежність тривалості руху кулі в тілі, якщо куля його пробиває, від його маси

- для тих же значень параметрів гранична тривалість руху кулі в тілі – $t_{kg} = 0,000073 \text{ с}$.

- куля буде пробивати тіло, якщо його маса задовольняє нерівність

$$m_2 > \frac{2m_1 R_{on} l_2}{m_1 V_{10}^2 - 2R_{on} l_2},$$

в протилежному випадку куля застрягає в тілі.

Для даних $m_1 = 0,0096$ кг, $V_{10} = 700$ м/с, $R_{on} = 40000$ н і $l_2 = 0,04$ м куля пробиватиме тіло, якщо його маса більша $m_2 > 0,02$ кг.

З рівняння (2.50) визначаємо тривалість руху кулі в тілі, для фіксованої маси тіла, в залежності від його товщини l_2 . На рис. 2.11 суцільною лінією вказана залежність тривалості руху кулі в тілі, для фіксованої його маси – $m_2 = 0,5$ кг, від товщини тіла.

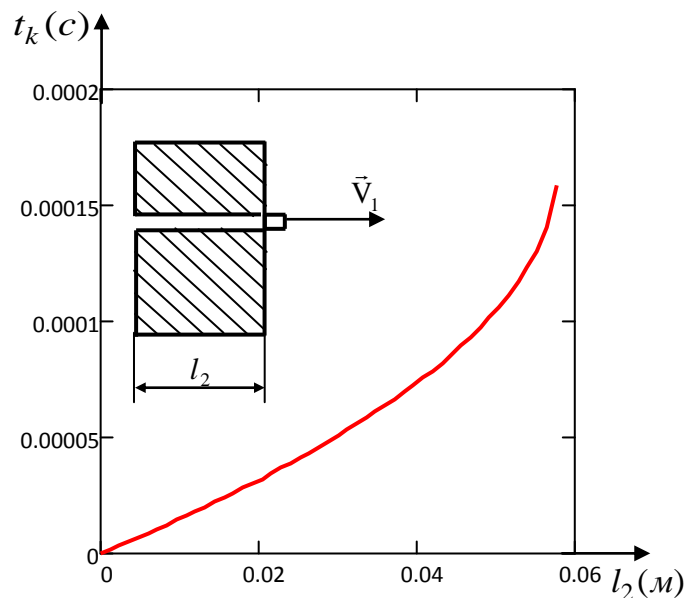


Рис. 2.11. Залежність тривалості руху кулі в тілі від його товщини

Аналізуючи залежність (2.50) і графік на рис. 2.11 можна стверджувати, що чим товстіше є тіло, тим більше часу куля буде рухатись в ньому. Однак є граничне значення товщини тіла і якщо вона дорівнює або більша від граничної, то куля застрягає в ньому. Граничну товщину тіла визначаємо з рівняння

$$l_{2g} = \frac{m_1 m_2 V_{10}^2}{2(m_1 + m_2) R_{on}}$$

і для тих самих значень – $l_{2g} = 0,0577 \text{ м}$.

Знаючи час t_k , за який куля пробиває тіло, та використовуючи рівняння (2.41), визначаємо швидкість тіла в момент вильоту кулі з нього

$$\dot{x}_2(t_k) = \frac{R_{on}}{m_2} t_k$$

або

$$V_2(t_k) = V_{2k} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \left(V_{10} - \sqrt{V_{10}^2 - \frac{2(m_1 + m_2)R_{on}l_2}{m_1 m_2}} \right). \quad (2.51)$$

На рис. 2.12 і 2.13 суцільною лінією вказана залежність швидкості руху тіла, в момент вильоту кулі з нього, від його маси при фіксованій товщині тіла. Брались наступні значення: $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$; $V_{10} = 700 \text{ м/с}$; $R_{on} = 40000 \text{ н}$; $l_2 = 0,03 \text{ м}$.

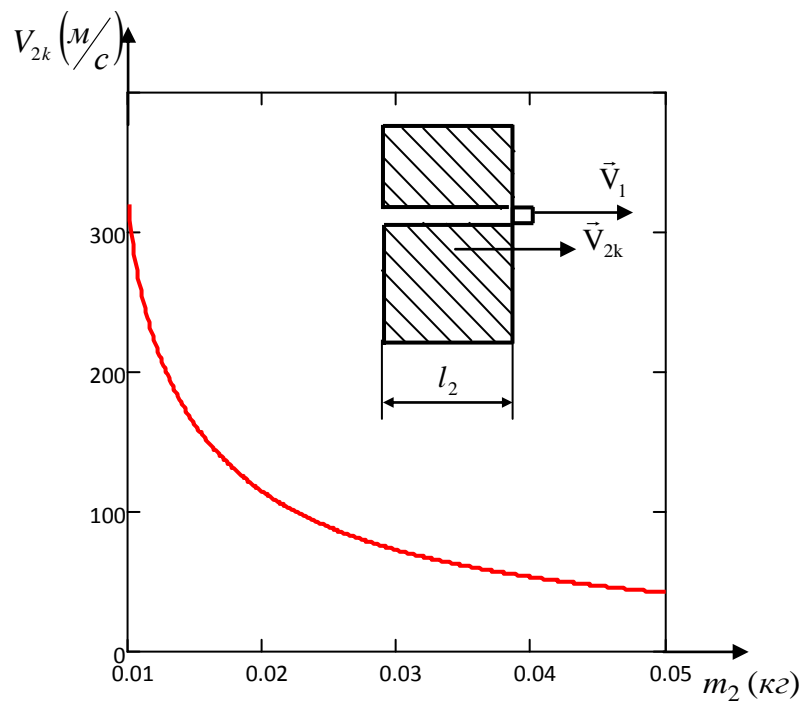
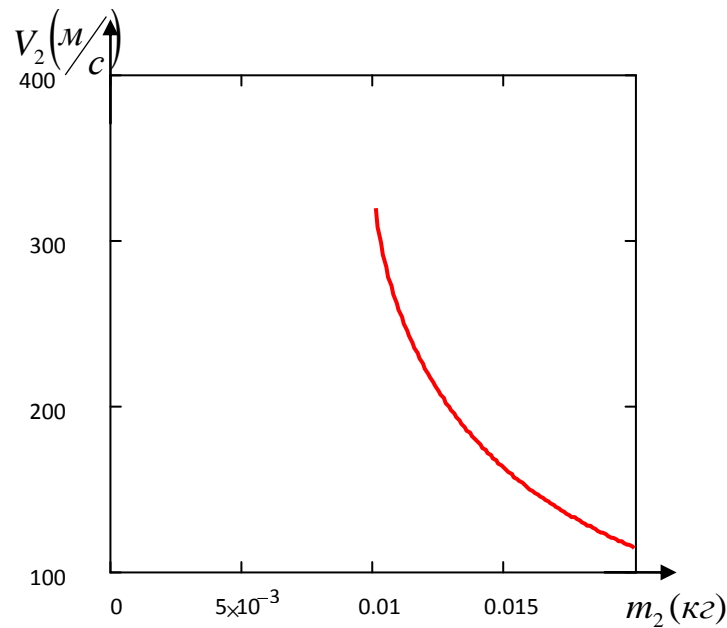


Рис. 2.12. Залежність швидкості тіла, після пробиття його кулею, від його маси



2.13. Залежність швидкості перешкоди після пробиття її кулею від її маси

Аналізуючи залежність (2.51) і графіки на рис. 2.12 і 2.13 можна стверджувати:

- куля проб'є тіло, якщо виконується нерівність – $m_2 > \frac{2m_1 R_{on} l_2}{m_1 V_{10}^2 - 2R_{on} l_2}$, в

протилежному випадку вона застрягне в ньому. На рис. 2.13 показано, що для значень $m_1 = 0,0096$ кг, $V_{10} = 700$ м/с, $R_{on} = 40000$ н і $l_2 = 0,03$ м куля пробиває тіло якщо $m_2 > 0,01$ кг, а при меншому значенні – застрягає в ньому;

- при виконанні попередньої нерівності збільшення маси тіла супроводжується зменшенням його швидкості до величини $V_{2k} = \frac{m_1 V_{10}}{m_1 + m_2}$.

Швидкість кулі в момент вильоту з тіла описується співвідношенням

$$V_1(t_k) = V_{10} - \frac{R_{on} t_k}{m_1}.$$

Із врахуванням (2.50) воно набуде вигляду

$$V_1(t_k) = V_{1k} = \frac{m_1 V_{10}}{m_1 + m_2} + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \sqrt{V_{10}^2 - \frac{2(m_1 + m_2) R_{on} l_2}{m_1 m_2}}. \quad (2.52)$$

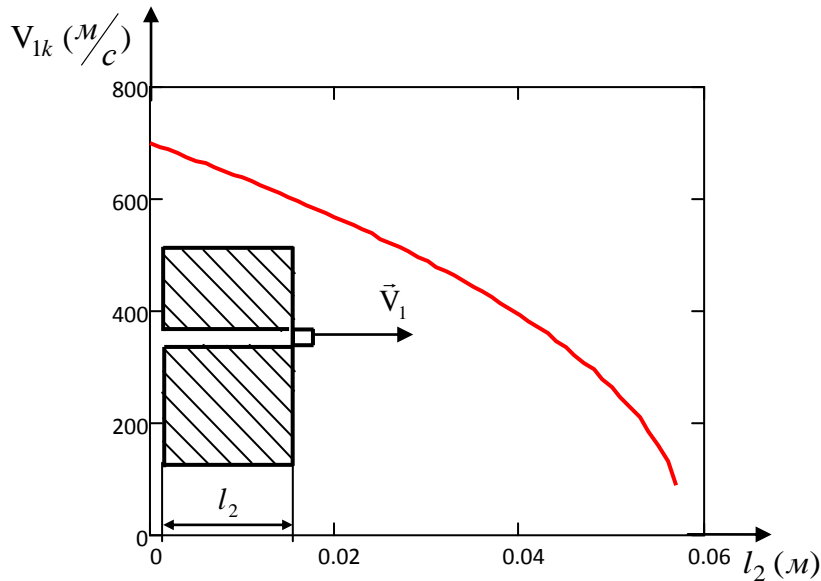


Рис. 2.14. Графік залежності швидкості кулі, після пробиття тіла, від його товщини

На рис. 2.14 побудовано графік залежності швидкості кулі, яка пробила тіло, від його товщини при значеннях $m_1 = 0,0096$ кг, $V_{10} = 700$ м/с, $R_{on} = 40000$ Н і $m_2 = 0,5$ кг.

Аналізуючи залежність (2.52) та графік на рис. 2.14 можна зробити висновки:

- куля проб'є тіло, якщо виконується нерівність $-\frac{m_1 V_{10}^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) R_{on} l_2}{m_2} > 0$;
- чим більшою є товщина тіла, то швидкість кулі після пробиття його є меншою;
- існує гранична товщина тіла $l_{2g} = \frac{m_1 m_2 V_{10}^2}{2(m_1 + m_2) R_{on}}$. Якщо товщина тіла більша величини l_{2g} , то куля не пробиває тіло і рухається разом з ним маючи швидкість, яку визначають з рівняння $V_{1k} = \frac{m_1 V_{10}}{m_1 + m_2}$.

Наприклад, підставляючи значення величин $m_1 = 0,0096$ кг, $V_{10} = 700$ м/с і $m_2 = 0,5$ кг отримаємо, що куля і тіло рухаються зі швидкістю $V_{1k} = 13,19$ м/с.

На рис. 2.15 побудовано графік залежності швидкості кулі, яка пробиває тіло, від його маси для значень $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $V_{10} = 700 \text{ м/с}$, $R_{on} = 40000 \text{ н}$ і $l_2 = 0,03 \text{ м}$.

Аналізуючи залежність (2.52) та графік на рис. 2.15 можна стверджувати:

- куля проб'є тіло, якщо виконується нерівність $-\frac{m_1 V_{10}^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) R_{on} l_2}{m_2} > 0$, в

протилежному випадку куля не пробиває тіло а рухається разом з ним маючи

швидкість, яку визначаємо з рівняння $V_{1k} = \frac{m_1 V_{10}}{m_1 + m_2}$;

- при виконанні попередньої нерівності, збільшення маси тіла супроводжується зростанням швидкості кулі в момент її вильоту з нього, яка прямує до граничного

значення $V_{1g} = \sqrt{V_{10}^2 - \frac{2R_{on}l_2}{m_1}}$.

Наприклад, граничне значення швидкості кулі, після пробиття тіла, якщо $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $V_{10} = 700 \text{ м/с}$, $R_{on} = 40000 \text{ н}$ і $l_2 = 0,02 \text{ м}$, дорівнює

$V_{1k} = 568,6 \text{ м/с}$.

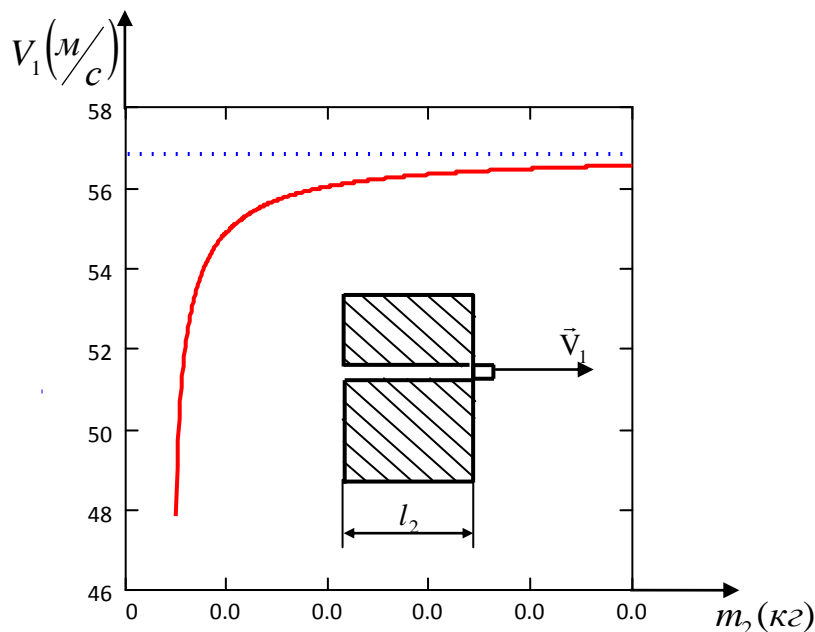


Рис. 2.15. Залежність швидкості кулі після пробиття тіла від його маси

2.5. Дослідження впливу підпружинення тіла на кінематичні характеристики взаємодії його та елемента ураження

Розглядаємо динаміку руху кулі та підпружиненого тіла. Схематичне зображення руху кулі всередині підпружиненого тіла вказано на рис. 2.16 [80, 87].

Механічна система має два ступені вільності. За узагальнені координати вибираємо: x_1 – координату кулі відносно рухомої системи координат, початок якої закріплений на передній поверхні AB тіла, x_2 – координату передньої поверхні AB тіла відносно нерухомої системи координат Oxz .

Рух механічної системи опишемо рівнянням Лагранжа другого роду (2.29). Кінетична енергія механічної системи складається з кінетичних енергій кулі і тіла. Їх величини та ліві частини рівнянь Лагранжа описані залежностями (2.30) – (2.33).

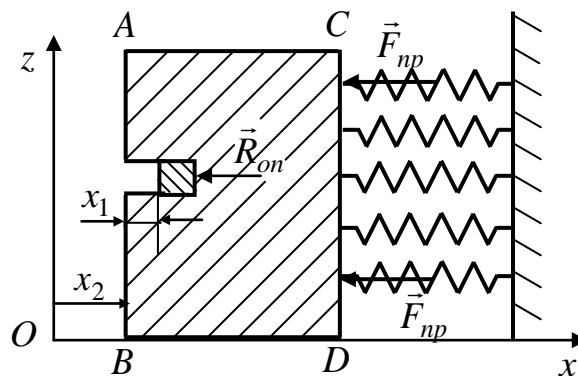


Рис. 2.16. Схематичне зображення руху кулі відносно підпружиненого тіла

Узагальнена сила за узагальненою координатою x_1 дорівнює

$$Q_{x_1} = -R_{on}, \quad (2.53)$$

а за x_2

$$Q_{x_2} = -F_{np}. \quad (2.54)$$

Із врахуванням співвідношень (2.33) рух механічної системи описується системою диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) &= -R_{on}; \\ m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_2\ddot{x}_2 &= -F_{np}. \end{aligned} \quad (2.55)$$

З системи диференціальних рівнянь отримаємо

$$m_2\ddot{x}_2 = R_{on} - c x_2. \quad (2.56)$$

Розв'язок цього диференціального рівняння має вигляд

$$x_2(t) = C_1 \cos\left(t\sqrt{\frac{c}{m_2}}\right) + C_2 \sin\left(t\sqrt{\frac{c}{m_2}}\right) + \frac{R_{on}}{c}. \quad (2.57)$$

Сталі інтегрування C_1 і C_2 визначаємо з початкових умов

$$x_2(0) = 0 \text{ і } \dot{x}_2(0) = 0, \quad (2.58)$$

тоді $C_1 = -\frac{R_{on}}{c}$ і $C_2 = 0$.

Отже, закон руху тіла відносно нерухомої системи координат Ox

$$x_2(t) = \frac{R_{on}}{c} \left(1 - \cos\left(t\sqrt{\frac{c}{m_2}}\right) \right), \quad (2.59)$$

а його швидкість змінюється за законом

$$\dot{x}_2(t) = \frac{R_{on}}{\sqrt{c m_2}} \sin\left(t\sqrt{\frac{c}{m_2}}\right). \quad (2.60)$$

Враховуючи (2.55) і (2.59) отримаємо, що

$$\ddot{x}_1 = \frac{c x_2}{m_2} - \frac{R_{on}(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} \text{ або } \ddot{x}_1 = -\frac{R_{on}}{m_1} - \frac{R_{on}}{m_2} \cos\left(t\sqrt{\frac{c}{m_2}}\right).$$

Інтегруючи це диференціальне рівняння запишемо

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{R_{on} t}{m_1} - \frac{R_{on}}{\sqrt{c m_2}} \sin\left(t\sqrt{\frac{c}{m_2}}\right) + C_3, \\ x_1(t) &= -\frac{R_{on} t^2}{2m_1} + \frac{R_{on}}{c} \cos\left(t\sqrt{\frac{c}{m_2}}\right) + C_3 t + C_4. \end{aligned}$$

Сталі інтегрування C_3 і C_4 визначаємо використовуючи початкові умови

$$x_1(0) = 0 \text{ і } \dot{x}_1(0) = V_{10}, \quad (2.61)$$

тоді $C_3 = V_{10}$ і $C_4 = -\frac{R_{on}}{c}$.

Отже, закон руху кулі відносно рухомої системи координат, початок якої розміщено на поверхні AB тіла, описується рівнянням

$$x_1(t) = V_{10}t - \frac{R_{on}t^2}{2m_1} - \frac{R_{on}}{c} \left(1 - \cos \left(t \sqrt{\frac{c}{m_2}} \right) \right). \quad (2.62)$$

Швидкість кулі відносно рухомої системи координат змінюється за законом

$$\dot{x}_1(t) = V_{10} - \frac{R_{on}t}{m_1} - \frac{R_{on}}{\sqrt{cm_2}} \sin \left(t \sqrt{\frac{c}{m_2}} \right), \quad (2.63)$$

а швидкість кулі відносно нерухомої системи координат, враховуючи (2.60) і (2.63), дорівнює

$$V_{кулі}(t) = \dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t) \text{ або } V_{кулі}(t) = V_{10} - \frac{R_{on}t}{m_1}. \quad (2.64)$$

Використовуючи рівняння (2.62) можна визначати проміжок часу за який куля проб'є тіло, тобто в цей момент часу координата кулі відносно рухомої системи координат повинна дорівнювати

$$x_1(t_k) = l_2, \quad (2.65)$$

де l_2 – товщина тіла.

Враховуючи (2.62) і (2.65) отримаємо рівняння з якого визначаємо тривалість руху t_k кулі в тілі:

$$-\frac{R_{on}t_k^2}{2m_1} - \frac{R_{on}}{c} \left(1 - \cos \left(t_k \sqrt{\frac{c}{m_2}} \right) \right) + V_{10}t_k = l_2. \quad (2.66)$$

Таблиця 2.5.

Тривалість t_k пробиття кулею тіла при значеннях $c = 4 \cdot 10^6 \frac{H}{M}$, $m_2 = 0,5 \text{ кг}$,

$V_{10} = 700 \frac{M}{c}$ і $l_2 = 0,03 \text{ м}$ в залежності від величини опору R_{on} матеріалу тіла

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

Знаючи проміжок часу, за який куля пробиває тіло, визначаємо її абсолютну швидкість в цей момент часу використовуючи рівняння (2.54), тобто

$$V_{кулі}(t_k) = V_{10} - \frac{R_{on} t_k}{m_1}. \quad (2.67)$$

За проміжок часу $[0; t_k]$ – тіло пройде шлях

$$x_2(t_k) = \frac{R_{on}}{c} \left(1 - \cos \left(t_k \sqrt{\frac{c}{m_2}} \right) \right) \quad (2.68)$$

і матиме швидкість

$$\dot{x}_2(t_k) = \frac{R_{on}}{\sqrt{c m_2}} \sin \left(t_k \sqrt{\frac{c}{m_2}} \right). \quad (2.69)$$

Тривалість руху кулі в тілі, у випадку його пробиття, визначаємо з рівнянь:

$$\frac{R_{on} t_k^2}{2m_1} - V_{10} t_k + l_2 = 0 \quad \text{– для нерухомого тіла;}$$

$$\frac{(m_1 + m_2) R_{on} t_k^2}{2m_1 m_2} - V_{10} t_k + l_2 = 0 \quad \text{– для рухомого тіла;}$$

$$\frac{R_{on} t_k^2}{2m_1} + \frac{R_{on}}{c} \left(1 - \cos \left(t_k \sqrt{\frac{c}{m_2}} \right) \right) - V_{10} t_k + l_2 = 0 \quad \text{– для підпружиненого тіла.}$$

Розклавши останнє рівняння в ряд Маклорена [98], отримаємо

$$\frac{R_{on} t_k^2}{2m_1} + \frac{R_{on}}{c} \left(1 - \left(1 - \frac{c t_k^2}{2m_2} + \frac{c^2 t_k^4}{24m_2^2} - \dots \right) \right) - V_{10} t_k + l_2 = 0,$$

яке, після здійснення математичних перетворень та нехтуванням величинами вищого порядку малості, набуде вигляду

$$\frac{(m_1 + m_2) R_{on} t_k^2}{2m_1 m_2} - \frac{R_{on} c t_k^4}{24m_2^2} - V_{10} t_k + l_2 = 0.$$

Аналізуючи рівняння, з яких визначається тривалість руху кулі в тілі, приходимо до висновку, що куля найшвидше пробиває нерухоме тіло, потім підпружинене тіло і найдовше – вільне тіло. Однак числові значення тривалості руху кулі в тілі у цих трьох випадках суттєво не відрізняються.

Використовуючи теорему про зміну кінетичної енергії матеріальної точки [5],

$$T_k - T_0 = \sum A_i, \quad (2.70)$$

визначимо максимальну величину стиску пружин, які прикріплені до нерухомої поверхні.

Кінетична енергія тіла, коли буде максимальний стиск пружин, дорівнює нулеві ($T_k = 0$), оскільки в момент максимального стиску пружин тіло є нерухоме.

Кінетична енергія тіла в момент вильоту кулі з нього дорівнює

$$T_0 = \frac{m_2(\dot{x}_2(t_k))^2}{2}. \quad (2.71)$$

Величина роботи, яку виконують сили прикладені до тіла, залежить лише від сили пружності пружин і тому

$$\sum A_i = - \int_{x_{2k}}^{x_{\max}} c x_2 dx_2 = - \frac{c(x_{\max}^2 - x_{2k}^2)}{2}, \quad (2.72)$$

де x_{\max} – максимальна деформація пружин, x_{2k} – величина стиску пружин в момент вильоту кулі з тіла.

Підставляючи отримані співвідношення (2.71) і (2.72) в (2.70), запишемо

$$-\frac{m_2(\dot{x}_2(t_k))^2}{2} = - \frac{c(x_{\max}^2 - x_{2k}^2)}{2}. \quad (2.73)$$

Розв'язуючи це рівняння відносно невідомої величини x_{\max} , отримаємо, що

$$x_{\max} = \sqrt{x_{2k}^2 + \frac{m_2(\dot{x}_2(t_k))^2}{c}}. \quad (2.74)$$

Отже, максимальна величина тиску пружин на нерухому поверхню дорівнює

$$F_{\text{тиску}} = c \sqrt{x_{2k}^2 + \frac{m_2(\dot{x}_2(t_k))^2}{c}}, \quad (2.75)$$

де $x_2(t_k)$ і $\dot{x}_2(t_k)$ описані залежностями (2.68) і (2.69) відповідно.

Визначимо числові значення тривалості руху t_k кулі в тілі, швидкість кулі V_{1k} після вильоту з тіла, швидкість тіла \dot{x}_{2k} після вильоту з нього кулі, шлях x_{2k} який пройде тіло за час t_k , величину максимальної деформації пружин x_{\max} та

силу тиску $F_{тиску}$ на нерухому поверхню, до якої прикріплений пружний шар, при: $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $V_{10} = 700 \text{ м/с}$, $R_{on} = 40000 \text{ Н}$, $m_2 = 0,5 \text{ кг}$ і $l_2 = 0,03 \text{ м}$.

Таблиця 2.6.

Значення кінетичних параметрів механічної системи, якщо куля пробиває тіло

| $c \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right)$ | $t_k (с) \cdot 10^{-5}$ | $V_{1k} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ | $\dot{x}_{2k} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ | $x_{2k} (м)$ | $x_{\max} (м)$ | $F_{тиску} (Н)$ |
|--|-------------------------|---|---|--------------|----------------|-----------------|
| 40 | 5,065 | 489 | 4,099 | 0,0001 | 0,458 | 18 |
| 400 | 5,065 | 489 | 4,099 | 0,0001 | 0,145 | 58 |
| 4000 | 5,065 | 489 | 4,099 | 0,0001 | 0,046 | 183 |
| 40000 | 5,065 | 489 | 4,083 | 0,0001 | 0,0145 | 580 |
| 400000 | 5,066 | 489 | 4,098 | 0,0001 | 0,0046 | 1833 |

Аналізуючи результати таблиці 2.6 можна стверджувати, що вплив сумарної жорсткості пружного шару c на швидкість вильоту кулі V_{1k} з тіла, швидкість тіла \dot{x}_{2k} і шлях пройдений тілом x_{2k} за час t_k є несуттєвий. Однак зі збільшенням жорсткості пружного шару величина його максимальної деформації x_{\max} зменшується, а величина сили тиску – $F_{тиску}$ на нерухому поверхню, до якої він прикріплений, зростає.

Визначимо, якою повинна бути мінімальна товщина $l_{2\min}$ тіла, щоб куля застрягла в ньому, та максимальну величину тиску пружного шару на нерухому поверхню в цьому випадку. Вважаємо, що куля зупинилась на тилівій поверхні CD тіла, пройшовши всю його товщину l_2 . Тому її швидкість відносно тіла дорівнює нулеві, тобто

$$\dot{x}_1(t_k) = 0. \quad (2.76)$$

Враховуючи залежність (2.63) отримаємо рівняння для визначення часу t_k руху кулі від моменту її торкання передньої поверхні AB тіла до зупинки на тилівій поверхні CD

$$V_{10} - \frac{R_{on} t_k}{m_1} - \frac{R_{on}}{\sqrt{c m_2}} \sin\left(t_k \sqrt{\frac{c}{m_2}}\right) = 0. \quad (2.77)$$

Підставивши значення t_k в рівняння (2.61), отримаємо залежність для визначення мінімальної товщини тіла, коли куля пройшовши цей шлях зупиниться на тилівій поверхні CD тіла,

$$l_{2\min} = V_{10} t_k - \frac{R_{on} t_k^2}{2m_1} - \frac{R_{on}}{c} \left(1 - \cos\left(t_k \sqrt{\frac{c}{m_2}}\right)\right). \quad (2.78)$$

З рівняння (2.60) визначаємо величину швидкості руху тіла в момент зупинки кулі відносно нього

$$\dot{x}_2(t_k) = \frac{R_{on}}{\sqrt{c m_2}} \sin\left(t_k \sqrt{\frac{c}{m_2}}\right). \quad (2.79)$$

Використовуючи теорему про зміну кінетичної енергії механічної системи [74]

$$T_k - T_0 = \sum A_i^e + \sum A_i^i \quad (2.80)$$

визначимо максимальну величину деформації пружного шару прикріпленого до нерухомої поверхні.

Кінетична енергія механічної системи в кінцевому положенні дорівнює $T_k = 0$, оскільки в момент максимальної деформації пружного шару тіло і куля є нерухомі.

Кінетична енергія механічної системи, в момент зупинки кулі відносно тіла, дорівнює

$$T_0 = \frac{(m_1 + m_2)(\dot{x}_2(t_k))^2}{2}. \quad (2.81)$$

Робота, яку виконують зовнішні сили, прикладені до механічної системи, обумовлена лише стисканням пружного шару, а тому

$$\sum A_i^e = - \int_{x_{2k}}^{x_{\max}} c x_2 dx_2 = - \frac{c(x_{\max}^2 - x_{2k}^2)}{2}. \quad (2.82)$$

Внутрішні сили механічної системи роботи не виконують

$$\sum A_i^i = 0. \quad (2.83)$$

Підставляючи отримані співвідношення (2.81) – (2.83) в (2.80), запишемо

$$-\frac{(m_1 + m_2)(\dot{x}_2(t_k))^2}{2} = -\frac{c(x_{\max}^2 - x_{2k}^2)}{2}. \quad (2.84)$$

Розв'язуючи це рівняння відносно невідомої величини x_{\max} отримаємо

$$x_{\max} = \sqrt{x_{2k}^2 + \frac{(m_1 + m_2)(\dot{x}_2(t_k))^2}{c}}. \quad (2.85)$$

Отже, максимальну величину тиску пружного шару на нерухому поверхню, у випадку застрягання кулі в тілі та лінійної залежності між величиною сили пружності та деформацією пружного матеріалу [22, 105, 106], визначаємо з рівняння

$$F_{\text{тиску}} = c\sqrt{x_{2k}^2 + \frac{(m_1 + m_2)(\dot{x}_2(t_k))^2}{c}}. \quad (2.86)$$

Обчислимо числові значення тривалості руху $[0, t_k]$ кулі в тілі до її зупинки відносно тіла та величини l_{1k} , \dot{x}_{2k} , x_{2k} , x_{\max} та силу тиску пружного шару $F_{\text{тиску}}$ на нерухому поверхню, до якої воно прикріплене, при значеннях: $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $V_{10} = 700 \text{ м/с}$, $R_{\text{он}} = 40000 \text{ н}$ і $m_2 = 0,5 \text{ кг}$.

Таблиця 2.7.

Значення кінетичних параметрів механічної системи, якщо куля застрягає в тілі

| $c \left(\frac{\text{н}}{\text{м}} \right)$ | $t_k (c) \cdot 10^{-4}$ | $l_{1k} (м)$ | $\dot{x}_{2k} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ | $x_{2k} (м)$ | $x_{\max} (і)$ | $F_{\text{тиску}} (н)$ |
|--|-------------------------|--------------|---|--------------|----------------|------------------------|
| 40 | 1,648 | 0,05767 | 13,19 | 0,001087 | 1,489 | 60 |
| 400 | 1,648 | 0,05767 | 13,19 | 0,001087 | 0,471 | 188 |
| 4000 | 1,648 | 0,05767 | 13,19 | 0,001087 | 0,149 | 595 |
| 40000 | 1,648 | 0,05767 | 13,18 | 0,001087 | 0,047 | 1883 |
| 400000 | 1,648 | 0,05767 | 13,14 | 0,001085 | 0,015 | 5948 |

Аналізуючи результати таблиці 2.7, можна стверджувати, що вплив сумарної жорсткості пружного шару c на тривалість руху t_k кулі в тілі, пройдений нею шлях l_{1k} до її зупинки відносно тіла, швидкість тіла \dot{x}_{2k} після зупинки кулі

відносно нього, пройдений тілом шлях x_{2k} за проміжок часу t_k є несуттєвий. Однак, зі збільшенням жорсткості c пружного шару величина його максимальної деформації x_{\max} зменшується, а сила тиску $F_{\text{тиску}}$ на нерухому поверхню, до якого воно прикріплене, зростає.

2.6. Нелінійна постановка задачі динаміки взаємодії підпружиненого тіла і елемента ураження

Розглянемо рух механічної системи, який описується системою диференціальних рівнянь (2.55) і будемо вважати, що сила пружності пружного шару змінюється не по лінійному закону [23, 68, 82, 84], а описується залежністю

$$F_{np} = cx_2^\gamma, \quad (2.87)$$

де $\gamma = const$ – деяка стала додатна величина.

З системи рівнянь (2.55) отримаємо

$$m_2 \ddot{x}_2 = R_{on} - F_{np}.$$

Враховуючи співвідношення (2.87), запишемо

$$m_2 \ddot{x}_2 = R_{on} - cx_2^\gamma. \quad (2.88)$$

Оскільки $\ddot{x}_2 = \dot{x}_2 \frac{d\dot{x}_2}{dx_2}$, то рівняння (2.88) набуде вигляду

$$\dot{x}_2 \frac{d\dot{x}_2}{dx_2} = \frac{R_{on}}{m_2} - \frac{c}{m_2} x_2^\gamma.$$

Використовуючи метод відокремлення змінних [68,122] до попереднього диференціального рівняння та інтегруючи його, отримаємо

$$\frac{\dot{x}_2^2}{2} = \frac{R_{on}}{m_2} x_2 - \frac{c}{m_2} \frac{x_2^{\gamma+1}}{\gamma+1} + C_1.$$

Сталу інтегрування C_1 визначаємо з початкових умов $\dot{x}_2(0) = 0$ і $x_2(0) = 0$.

Тоді $C_1 = 0$ і зміна швидкості тіла описується рівнянням

$$\dot{x}_2(t) = \sqrt{\frac{2R_{on}}{m_2} x_2 - \frac{2c}{m_2} \frac{x_2^{\gamma+1}}{\gamma+1}} \text{ або } \frac{dx_2}{dt} = \sqrt{\frac{2R_{on}}{m_2} x_2 - \frac{2c}{m_2} \frac{x_2^{\gamma+1}}{\gamma+1}}. \quad (2.89)$$

Відокремлюючи змінні та інтегруючи (2.88) отримаємо закон руху тіла

$$t = \int_0^{x_2} \frac{dx}{\sqrt{\frac{2R_{on}}{m_2} x - \frac{2cx^{\gamma+1}}{m_2(\gamma+1)}}}. \quad (2.90)$$

З першого рівняння системи рівнянь (2.55) запишемо

$$\ddot{x}_1 = -\frac{R_{on}}{m_1} - \ddot{x}_2. \quad (2.91)$$

Інтегруючи це рівняння та враховуючи (2.88) отримаємо

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{R_{on}}{m_1} t - \sqrt{\frac{2R_{on}}{m_2} x_2 - \frac{2cx_2^{\gamma+1}}{m_2(\gamma+1)}} + C_2.$$

Сталу величину C_2 визначаємо враховуючи початкові умови $x_2(0) = 0$ і $\dot{x}_1(0) = V_{10}$, тому $C_2 = V_{10}$.

Отже, закон руху кулі відносно тіла описується залежністю

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{R_{on}}{m_1} t - \sqrt{\frac{2R_{on}}{m_2} x_2 - \frac{2cx_2^{\gamma+1}}{m_2(\gamma+1)}} + V_{10}. \quad (2.92)$$

Інтегруючи рівняння (2.91) двічі, отримаємо залежності

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{R_{on}}{m_1} t - \dot{x}_2(t) + C_3 \text{ і } x_1(t) = -\frac{R_{on}t^2}{2m_1} - x_2(t) + C_3t + C_4.$$

Значення сталих величин C_3 і C_4 визначаємо з сукупності початкових умов

$$\dot{x}_2(0) = 0, \quad x_2(0) = 0, \quad \dot{x}_1(0) = V_{10} \text{ і } x_1(0) = 0,$$

тоді $C_3 = V_{10}$ і $C_4 = 0$.

Отже, закон руху кулі відносно тіла матиме вигляд

$$x_1(t) = -\frac{R_{on}t^2}{2m_1} - x_2(t) + V_{10}t. \quad (2.93)$$

Швидкість кулі, відносно нерухомої системи координат, визначається за формулою

$$V_{кулі}(t) = \dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t).$$

Враховуючи (2.89) і (2.92) отримаємо, що абсолютна швидкість кулі дорівнює

$$V_{кулі}(t) = V_{10} - \frac{R_{on}}{m_1} t. \quad (2.94)$$

Тривалість руху кулі в тілі визначаємо з рівняння

$$V_{10}t_k - \frac{R_{on}t_k^2}{2m_1} - x_2(t_k) = l_2. \quad (2.95)$$

Для визначення величини максимальної деформації пружного шару, яке торкається нерухомої поверхні, використаємо теорему про зміну кінетичної енергії матеріальної точки (2.70).

Робота, яку виконують сили прикладені до тіла, обумовлена лише стисканням пружного шару і тому

$$\sum A_i = - \int_{x_{2k}}^{x_{\max}} c x_2^\gamma dx_2 = - \frac{c(x_{\max}^{\gamma+1} - x_{2k}^{\gamma+1})}{\gamma + 1}. \quad (2.96)$$

Кінетична енергія тіла, коли досягається максимальна деформація пружного шару, дорівнює нулеві ($T_k = 0$). Кінетична енергія тіла, в момент вильоту кулі з

нього, дорівнює $T_0 = \frac{m_2(\dot{x}_2(t_k))^2}{2}$. Тому рівняння (2.70) набуде вигляду

$$- \frac{m_2(\dot{x}_2(t_k))^2}{2} = - \frac{c(x_{\max}^{\gamma+1} - x_{2k}^{\gamma+1})}{\gamma + 1}. \quad (2.97)$$

Розв'язуючи це рівняння відносно невідомої величини x_{\max} , отримаємо

$$x_{\max} = \left(x_{2k}^{\gamma+1} + \frac{m_2(\gamma + 1)(\dot{x}_2(t_k))^2}{2c} \right)^{\frac{1}{\gamma+1}}. \quad (2.98)$$

Отже, максимальна величина тиску пружного шару на нерухому поверхню

$$F_{тиску} = c \left(x_{2k}^{\gamma+1} + \frac{m_2(\gamma + 1)(\dot{x}_2(t_k))^2}{2c} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}}. \quad (2.99)$$

Визначимо числові значення тривалості руху $[0; t_k]$ кулі в тілі, швидкість кулі V_{1k} після вильоту з тіла, швидкість тіла \dot{x}_{2k} після вильоту з нього кулі, шлях x_{2k}

який пройде тіло за час t_k , величину максимальної деформації пружного шару x_{\max} та силу тиску $F_{\text{тиску}}$ на нерухому поверхню, до якого торкається пружний шар, при наступних значеннях: $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $V_{10} = 700 \text{ м/с}$, $R_{\text{он}} = 40000 \text{ н}$, $m_2 = 0,5 \text{ кг}$ і $l_2 = 0,03 \text{ м}$.

Таблиця 2.8.

Значення кінетичних параметрів механічної системи, якщо куля пробиває тіло,
при $\gamma = 2$

| $c \left(\frac{\text{н}}{\text{м}} \right)$ | $t_k (c) \cdot 10^{-5}$ | $V_{1k} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ | $\dot{x}_{2k} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ | $x_{2k} (м)$ | $x_{2\max} (і)$ | $F_{\text{тиску}} (н)$ |
|--|-------------------------|---|---|--------------|-----------------|------------------------|
| 40 | 5,065 | 489 | 4.099 | 0.000105 | 0.680 | 18 |
| 400 | 5,065 | 489 | 4.099 | 0.000105 | 0.316 | 40 |
| 4000 | 5,065 | 489 | 4.099 | 0.000105 | 0.146 | 86 |
| 40000 | 5,065 | 489 | 4.099 | 0.000105 | 0.068 | 185 |
| 400000 | 5,065 | 489 | 4.099 | 0.000105 | 0.032 | 399 |

Таблиця 2.9

Значення кінетичних параметрів механічної системи, якщо куля пробиває тіло,
при $\gamma = 0,5$

| $c \left(\frac{\text{н}}{\text{м}} \right)$ | $t_k (c) \cdot 10^{-5}$ | $V_{1k} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ | $\dot{x}_{2k} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$ | $x_{2k} (м)$ | $x_{2\max} (і)$ | $F_{\text{тиску}} (н)$ |
|--|-------------------------|---|---|--------------|-----------------|------------------------|
| 40 | 5,064 | 489 | 4.098 | 0.000105 | 0.2916 | 22 |
| 400 | 5,064 | 489 | 4.098 | 0.000105 | 0.0628 | 100 |
| 4000 | 5,064 | 489 | 4.097 | 0.000105 | 0.0135 | 465 |
| 40000 | 5,064 | 489 | 4.083 | 0.000105 | 0.0029 | 2160 |
| 400000 | 5,063 | 489 | 3.889 | 0.000102 | 0.0006 | 9930 |

Аналізуючи результати таблиць 2.8 і 2.9 можна стверджувати, що вплив сумарної жорсткості c пружного шару на V_{1k} , \dot{x}_{2k} і x_{2k} за час t_k є несуттєвий.

Однак зі збільшенням жорсткості пружного шару величина його максимальної деформації x_{\max} зменшується, а величина сили тиску $F_{\text{тиску}}$ на нерухому поверхню, до якої торкається пружний шар, зростає.

Визначимо, яка мінімальна повинна бути товщина $l_{2\min}$ тіла, щоб куля застрягла в ньому, та максимальну величину тиску пружного шару на нерухому поверхню у випадку нелінійної залежності сили пружності від її деформації.

Вважаємо, що куля зупинилась на тилівій поверхні CD тіла пройшовши всю його товщину l_2 . Оскільки, куля зупинилась, то її швидкість відносно тіла дорівнює нулеві, тобто $\dot{x}_1(t_k) = 0$ і враховуючи залежність (2.92) отримаємо рівняння для визначення моменту часу t_k руху кулі, коли вона зупиниться на тилівій поверхні CD

$$V_{10} - \frac{R_{on}}{m_1} t - \sqrt{\frac{2R_{on}}{m_2} x_2 - \frac{2c}{m_2} \frac{x_2^{\gamma+1}}{\gamma+1}} = 0. \quad (2.100)$$

Підставивши значення t_k в рівняння (2.92) отримуємо залежність для визначення мінімальної товщини тіла, коли куля пройшовши цей шлях зупиниться на його тилівій поверхні CD

$$l_{2\min} = V_{10} t_k - \frac{R_{on} t_k^2}{2m_1} - x_2(t_k). \quad (2.101)$$

З рівняння (2.89) визначаємо величину швидкості руху тіла в момент зупинки кулі відносно нього

$$\dot{x}_2(t_k) = \sqrt{\frac{2R_{on}}{m_2} x_2(t_k) - \frac{2c}{m_2} \frac{x_2^{\gamma+1}(t_k)}{\gamma+1}}. \quad (2.102)$$

Для визначення величини максимального стиску пружного шару, яке торкається до нерухомої поверхні, використаємо теорему про зміну кінетичної енергії матеріальної точки (2.70).

Робота, яку виконують сили прикладені до тіла, обумовлена лише стисканням пружного шару, тому

$$\sum A_i = - \int_{x_{2k}}^{x_{\max}} c x_2^\gamma dx_2 = - \frac{c(x_{\max}^{\gamma+1} - x_{2k}^{\gamma+1})}{\gamma+1},$$

Враховуючи, що кінетична енергія тіла з кулею, коли буде максимальна деформація пружного шару, дорівнює нулеві ($T_k = 0$). Кінетична енергія тіла і кулі, в момент зупинки кулі в тілі, дорівнює $T_0 = \frac{(m_1 + m_2)(\dot{x}_2(t_k))^2}{2}$. Тому рівняння (2.70) набуде вигляду

$$- \frac{(m_1 + m_2)(\dot{x}_2(t_k))^2}{2} = - \frac{c(x_{\max}^{\gamma+1} - x_{2k}^{\gamma+1})}{\gamma+1}.$$

Розв'язуючи це рівняння відносно величини x_{\max} , отримаємо

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

Отже, максимальна величина тиску пружного шару на нерухому поверхню [85] дорівнює

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

Визначимо числові значення l_{1k} , \dot{x}_{2k} , x_{2k} , x_{\max} , $F_{\text{тиску}}$ та тривалість руху $[0; t_k]$ кулі в тілі до її зупинки відносно нього, при наступних значеннях: $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $V_{10} = 700 \text{ м/с}$, $R_{\text{он}} = 40000 \text{ н}$ і $m_2 = 0,5 \text{ кг}$.

Аналізуючи результати таблиць 2.10 і 2.11, впливає, що вплив сумарної жорсткості c пружного шару на t_k , l_{1k} , \dot{x}_{2k} , x_{2k} є несуттєвий. Однак, зі збільшенням жорсткості c пружного шару величина його максимальної деформації x_{\max} зменшується і сила тиску $F_{\text{тиску}}$ на нерухому поверхню зростає.

Таблиця 2.10.

Значення кінетичних параметрів механічної системи, якщо куля застрягає в тілі,
при $\gamma = 2$

| $c \left(\frac{H}{M} \right)$ | $t_k (c) \cdot 10^{-4}$ | $l_{1k} (M)$ | $\dot{x}_{2k} \left(\frac{M}{c} \right)$ | $x_{2k} (M)$ | $x_{2\max} (M)$ | $F_{\text{тиску}} (H)$ |
|--------------------------------|-------------------------|--------------|---|--------------|-----------------|------------------------|
| 40 | 1,648 | 0,05767 | 13,34 | 0,001112 | 1,503 | 90 |
| 400 | 1,648 | 0,05767 | 13,33 | 0,001112 | 0,698 | 194 |
| 4000 | 1,648 | 0,05767 | 13,33 | 0,001112 | 0,324 | 420 |
| 40000 | 1,648 | 0,05767 | 13,33 | 0,001112 | 0,150 | 904 |
| 400000 | 1,648 | 0,05767 | 13,33 | 0,001112 | 0,070 | 1948 |

Таблиця 2.11.

Значення кінетичних параметрів механічної системи, якщо куля застрягає в тілі,
при $\gamma = 0,5$

| $c \left(\frac{H}{M} \right)$ | $t_k (c) \cdot 10^{-4}$ | $l_{1k} (M)$ | $\dot{x}_{2k} \left(\frac{M}{c} \right)$ | $x_{2k} (M)$ | $x_{2\max} (M)$ | $F_{\text{тиску}} (H)$ |
|--------------------------------|-------------------------|--------------|---|--------------|-----------------|------------------------|
| 40 | 1,648 | 0,05767 | 13,34 | 0,001112 | 1,424 | 48 |
| 400 | 1,648 | 0,05767 | 13,33 | 0,001112 | 0,307 | 222 |
| 4000 | 1,648 | 0,05767 | 13,32 | 0,001111 | 0,066 | 1028 |
| 40000 | 1,648 | 0,05768 | 13,12 | 0,001100 | 0,014 | 4756 |
| 400000 | 1,653 | 0,05779 | 11,22 | 0,000996 | 0,0028 | 21332 |

Аналізуючи результати значень в таблицях 2.6 - 2.11 можна стверджувати:

- збільшення нелінійної залежності між величиною сили пружності пружного шару та його деформацією супроводжується збільшенням величини його максимальної деформації і зменшенням тиску ним на нерухому поверхню, до якої він торкається;
- зменшення величини тиску пружного шару на нерухому поверхню досягається, якщо закон нелінійності між величиною сили пружності і деформацією має вигляд $F_{np} = cx_2^\gamma$, де $\gamma < 1$.

2.7. Висновки по другого розділу

Аналіз результатів досліджень дає можливість:

- записати емпіричні формули залежності сили лобового опору повітря, при надзвуковій та дозвуковій швидкостях, в яких враховано: коефіцієнт аеродинамічності форми елемента ураження; його максимальну площу поперечного перерізу площиною перпендикулярною до напрямку швидкості; швидкість елемента ураження; величину числа Маха; густину повітря. Різниця між теоретичними результатами і експериментальними даними кінематичних параметрів елемента ураження не перевищує по модулю 1%.
- у випадку застрягання кулі в тілі або його пробиття вплив сумарної жорсткості c пружного шару на величини t_k , $\dot{x}_2(t_k)$, $x_2(t_k)$ – є несуттєвий;
- зі збільшенням жорсткості c пружного шару його величина максимальної деформації x_{\max} зменшується, а сила тиску $F_{\text{тиску}}$ на нерухому поверхню, до якої він торкається, зростає;
- зменшення максимальної величини тиску пружного шару на нерухому поверхню, при обмеженні на величину максимальної деформації, досягається тоді, якщо закон нелінійності між величиною сили пружності та деформацією має регресивну залежність, тобто $F_{np} = cx_2^\gamma$, де $\gamma < 1$.

РОЗДІЛ 3

РИКОШЕТ ТА ДИНАМІКА ЗАХИСНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІД ЧАС УДАРУ ОБ НЕЇ ЕЛЕМЕНТУ УРАЖЕННЯ

Існуючі на сьогодні захисні конструкції скеровані, в першу чергу, на зменшення кінетичної енергії елемента ураження. Тому головними тенденціями в збільшенні захисту від ураження кулею та осколками, в переважній більшості, є покращення фізико-механічних властивостей матеріалу та збільшення товщини захисної пластини, тобто підвищення куленепробивної властивості її.

Однак покращення фізико-механічних властивостей матеріалу захисної пластини супроводжується значними фінансовими затратами. Тому виробництво захисних пластин з матеріалу, який характеризується високою куленепробивністю, можливе лише в незначній кількості, але практика вимагає їх масового виробництва. Збільшення товщини захисної пластини супроводжується значним збільшенням її маси, що вкрай негативно впливає на тактико-технічні характеристики захисного об'єкту та зменшує тривалість його працездатності.

В розділі пропонується, з метою підвищення рівня захищеності об'єкту і на основі проведеної методики, захисна конструкція із рознесеними пластинами, яка не лише зменшує кінетичну енергію елемента ураження, а й змінює напрямок його швидкості, тобто скеровує пробивну здатність елемента ураження в іншу сторону від об'єкту захисту.

3.1. Динаміка рикошету елемента ураження

Розглядається задача про удар кулі об нерухому поверхню перешкоди з метою визначення максимально допустимої величини кута падіння (α_1), при якому має місце її відбивання від поверхні перешкоди (явище рикошету) (рис. 3.1).

Для визначення гранично допустимої величини кута α_1 , між напрямком швидкості кулі \vec{V}_{10} і поверхнею перешкоди, використаємо теорему про зміну кількості руху матеріальної точки [75]

$$\vec{K}_k - \vec{K}_0 = \sum \vec{S}(t_k), \quad (3.1)$$

де $\vec{K}_k = m_1 \vec{V}_{1k}$ – кількість руху матеріальної точки (кулі) після відбиття від перешкоди; $\vec{K}_0 = m_1 \vec{V}_{10}$ – кількість руху матеріальної точки до удару об перешкоду; m_1 – маса кулі, яка ударяється об перешкоду; \vec{V}_{10} – швидкість кулі до удару об перешкоду, \vec{V}_{1k} – швидкість кулі після відбиття від перешкоди; $\sum \vec{S}(t_k)$ – сума імпульсів всіх сил, які діють на кулю в проміжку її контакту з перешкодою.

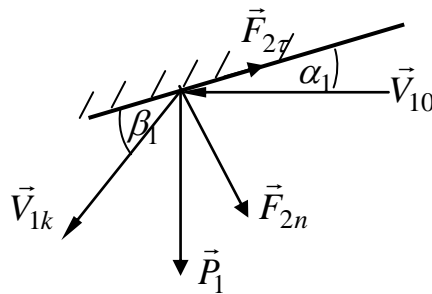


Рис. 3.1. Схема удару кулі об поверхню перешкоди

Під час контакту кулі з перешкодою на неї діють: \vec{P}_1 – вага кулі; \vec{F}_{2n} – нормальна складова реакції поверхні перешкоди, $\vec{F}_{2\tau}$ – дотична складова реакції поверхні перешкоди. Отже, імпульс цих сил дорівнює

$$\sum \vec{S}(t_k) = \int_0^{t_k} (\vec{P}_1 + \vec{F}_{2n}(t) + \vec{F}_{2\tau}(t)) dt, \quad (3.2)$$

де $[0; t_k]$ – проміжок часу впродовж якого куля контактує з нерухомою поверхнею перешкоди.

Підставляючи записані залежності у співвідношення (3.1), отримаємо

$$m_1 \vec{V}_{1k} - m_1 \vec{V}_{10} = \int_0^{t_k} (\vec{P}_1 + \vec{F}_{2n}(t) + \vec{F}_{2\tau}(t)) dt. \quad (3.3)$$

Проектуючи цю залежність на нормальний і тангенціальний напрямки поверхні перешкоди запишемо

$$m_1 V_{1k} \sin \beta_1 - (-m_1 V_{10} \sin \alpha_1) = \int_0^{t_k} (F_{2n}(t) + P_1 \cos \alpha_1) dt; \quad (3.4)$$

$$m_1 V_{1k} \cos \beta_1 - m_1 V_{10} \cos \alpha_1 = \int_0^{t_k} (-F_{2\tau}(t) + P_1 \sin \alpha_1) dt, \quad (3.5)$$

де β_1 – кут під яким куля відбивається від поверхні перешкоди. Надалі будемо враховувати середні значення сил $F_{2n}(t)$ і $F_{2\tau}(t)$ на проміжку часу $t \in [0; t_k]$.

Враховуючи, що тривалість часу $[0; t_k]$ контакту кулі з поверхнею перешкоди є малою величиною, а середні значення сил P_1 та $F_{2\tau}$ є значно менші від середнього значення сили F_{2n} , тому систему рівнянь (3.4) і (3.5) перепишемо у вигляді

$$m_1 V_{1k} \sin \beta_1 + m_1 V_{10} \sin \alpha_1 = F_{2n} t_k; \quad (3.6)$$

$$m_1 V_{1k} \cos \beta_1 - m_1 V_{10} \cos \alpha_1 = 0. \quad (3.7)$$

Для визначення величини швидкості кулі V_{1k} і кута β_1 використаємо **гіпотезу Ньютона**: відношення модуля нормальної складової відносної швидкості між тілами після удару до модуля нормальної складової відносної швидкості між тілами до удару дорівнює коефіцієнту відновлення [114]. В цьому випадку математичний запис гіпотези Ньютона набуде вигляду

$$\frac{V_{1k} \sin \beta_1}{V_{10} \sin \alpha_1} = k_1, \quad (3.8)$$

де k_1 – коефіцієнт відновлення, величину якого визначають експериментальним шляхом, при чому він залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів контактуючих тіл і $k_1 < 1$.

Враховуючи залежності (3.6) і (3.7), отримаємо

$$V_{1k} \cos \beta_1 = V_{10} \cos \alpha_1, \quad V_{1k} = \frac{V_{10} \cos \alpha_1}{\cos \beta_1}, \quad \frac{V_{10} \cos \alpha_1 \sin \beta_1}{V_{10} \sin \alpha_1 \cos \beta_1} = k_1 \text{ або}$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = k_1 \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (3.9)$$

З рівняння (3.9) визначаємо величину кута β_1 , під яким куля відбивається від поверхні перешкоди, тоді враховуючи співвідношення (3.9) отримаємо

$$\cos \beta_1 = (1 + k_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_1)^{-0,5}. \quad (3.10)$$

Використовуючи рівняння (3.7) і (3.10), визначаємо швидкість V_{1k} кулі після відбиття від поверхні перешкоди

$$V_{1k} = V_{10} \cos \alpha_1 \sqrt{1 + k_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_1}. \quad (3.11)$$

Середню величину нормальної реакції F_{2n} поверхні перешкоди визначаємо, використовуючи рівняння (3.6), (3.10) і (3.11), тоді

$$F_{2n} = \frac{m_1(1 + k_1)V_{10} \sin \alpha_1}{t_k}. \quad (3.12)$$

Гіпотеза. Вважаємо, що куля відбивається від поверхні перешкоди, якщо величина нормальної реакції F_{2n} поверхні перешкоди менша від величини сили опору R_{2on} матеріалу перешкоди, тобто

$$F_{2n} \leq R_{2on}. \quad (3.13)$$

Враховуючи (3.12) і (3.13), отримаємо співвідношення

$$\frac{m_1(1 + k_1)V_{10} \sin \alpha_1}{t_k} \leq R_{2on}, \quad (3.14)$$

з якого можна визначити максимальну величину кута $\alpha_{1\max}$, при якому куля відбивається від поверхні перешкоди (рикошет) [90]

$$\sin \alpha_{1\max} \leq \frac{R_{2on} t_k}{m_1(1 + k_1)V_{10}}. \quad (3.15)$$

Для значень $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $k_1 = 0,5$, $V_{10} = 700 \text{ м/с}$ і тривалості контакту кулі з поверхнею перешкоди $[0; 0,00005 \text{ с}]$, то залежність величини кута $\alpha_{1\max}$ від сили опору R_{2on} перешкоди, враховуючи залежність (3.15), зображено на рис. 3.2.

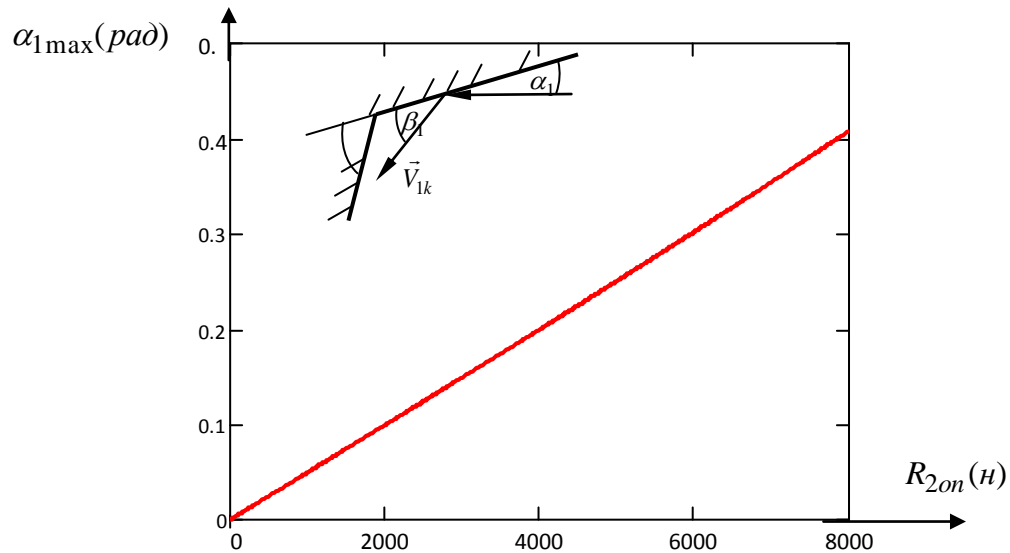


Рис. 3.2. Залежність між силою опору R_{2on} перешкоди і величиною кута α_{1max} , коли має місце рикошет

Аналізуючи формулу (3.15) і графік на рис. 3.2 можна стверджувати, що чим більша сила опору перешкоди, то явище рикошету можливе при більшому куті падіння кулі, тобто при більшому куті між напрямком швидкості кулі та дотичною до поверхні перешкоди.

Якщо вважати, що $R_{on} = 40000$ н, $k_1 = 0,5$, $V_{10} = 700 \text{ м/с}$ і тривалість часу контакту кулі з поверхнею перешкоди дорівнює $[0; 0,00005 \text{ с}]$, то залежність величини кута α_{1max} від маси кулі або осколку m_1 зображено на рис. 3.3.

На основі формули (3.15) і графіка на рис. 3.3 можна стверджувати, що чим більша маса кулі або осколку, то здатність пробиття ними поверхні перешкоди зростає і тому рикошет можливий при меншому куті падіння кулі, тобто при меншому куті між напрямком швидкості кулі та дотичною до поверхні перешкоди [78, 86]

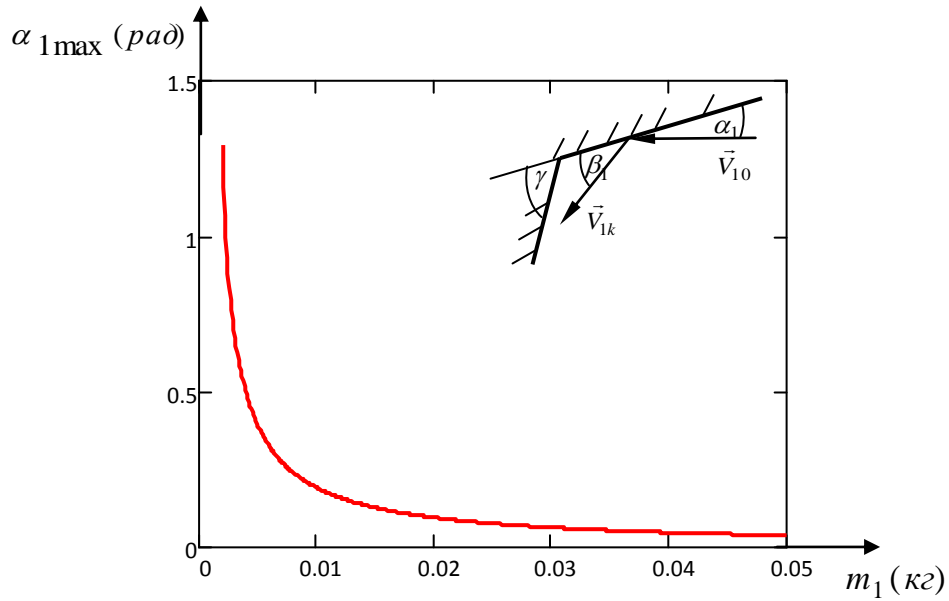


Рис. 3.3. Залежність між величиною маси m_1 кулі або осколка і величиною кута $\alpha_{1\max}$, коли має місце рикошет.

При значеннях $R_{on} = 40000\text{H}$, $m_1 = 0,0096\text{кг}$, $V_{10} = 700\text{м/с}$ і тривалості часу контакту кулі з поверхнею перешкоди $[0; 0,00005\text{с}]$ залежність величини кута $\alpha_{1\max}$ від величини коефіцієнту відновлення k_1 зображено нарис. 3.4.

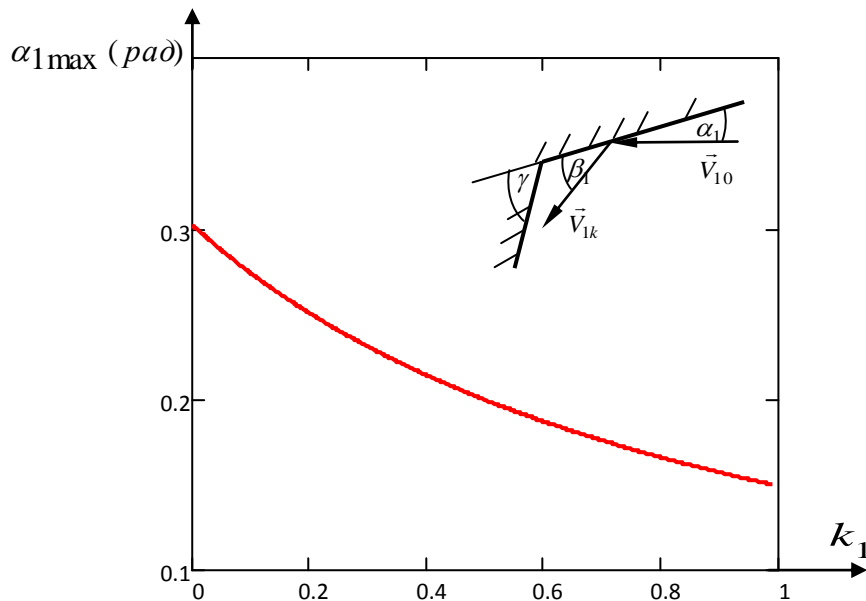


Рис. 3.4. Залежність між величиною коефіцієнту відновлення k_1 і величиною кута $\alpha_{1\max}$, якщо має місце рикошет

Аналізуючи формулу (3.15) і графік на рис. 3.4 можна стверджувати, що чим пружніші матеріали кулі та перешкоди, то можливість пробиття поверхні перешкоди зростає і тому рикошет можливий при меншому куті $\alpha_{1\max}$.

Для $R_{on} = 40000 \text{ н}$, $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $k_1 = 0,5$, а тривалості часу контакту кулі з поверхнею перешкоди $[0; 0,00005 \text{ с}]$ залежність величини кута $\alpha_{1\max}$ від величини швидкості V_{10} кулі або осколка зображена на рис. 3.5.

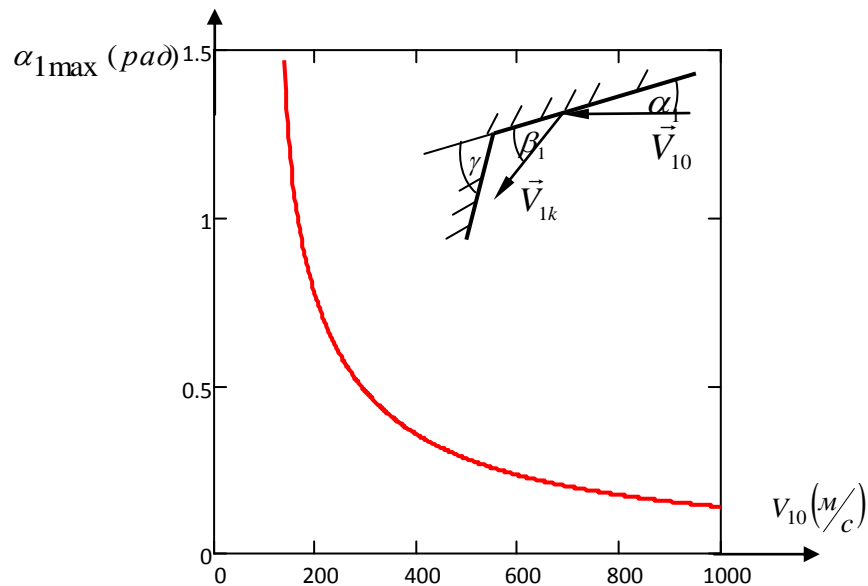


Рис. 3.5. Залежність між величиною швидкості V_{10} кулі або осколка і величиною кута $\alpha_{1\max}$, у випадку рикошету

Аналізуючи формулу (3.15) і графік на рис. 3.5 можна стверджувати, що чим більша швидкість кулі або осколка, то можливість пробиття поверхні перешкоди зростає, а тому рикошет можливий при меншому куті $\alpha_{1\max}$. При малих значеннях швидкості V_{10} кулі або осколка можливе явище рикошету при будь-яких значеннях кута $\alpha_{1\max}$.

Якщо, вважати, що $R_{on} = 40000 \text{ н}$, $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $k_1 = 0,5$ і швидкість кулі або осколка дорівнює $V_{10} = 700 \text{ м/с}$, то залежність величини кута $\alpha_{1\max}$ від тривалості контакту $[0; t_k]$ кулі з поверхнею перешкоди зображена на рис. 3.6.

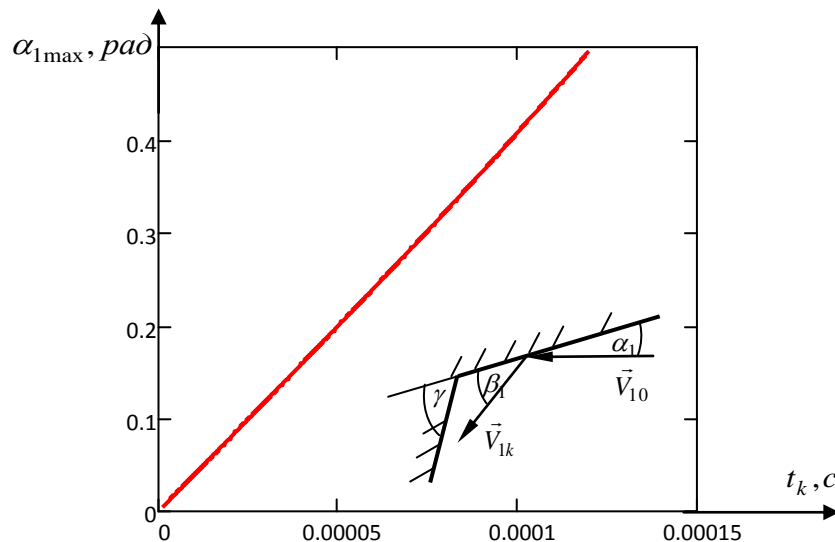


Рис. 3.6. Залежність між тривалістю контакту $[0; t_k]$ кулі або осколка з поверхнею перешкоди і величиною кута $\alpha_{1\max}$, у випадку рикошету

На основі формули (3.15) і графіка на рис. 3.6 можна стверджувати, що чим більша тривалість часу контакту кулі з поверхнею перешкоди, то можливість пробиття її зменшується, отже рикошет можливий при більшому куті .

У зв'язку зі сказаним є актуальними проблеми: дослідження закономірностей взаємодії куль чи осколків з перешкодою; зменшення їх кінетичної енергії; зміни напрямку кількості руху та створення нових ефективних захисних конструкцій з врахуванням вказаних проблем.

3.2. Експериментальна перевірка використання пружного шару в захисній конструкції.

Зіткнення твердих тіл супроводжується складними процесами, сутність яких визначається наявністю низки чинників: початковою швидкістю об'єктів зіткнення, їх геометричними параметрами і фізико-механічними характеристиками (ФМХ). Потрібно відзначити, що в більшості випадків при їх зіткненню мають місце проникнення тіл одного в інше, часткові руйнування на окремі фрагменти та плавлення.

При кількісному та якісному описі високошвидкісних ударних явищ виникає багато складних проблем, які в даний час далекі від всеоб'ємного вирішення. Часткові дослідження високошвидкісних ударних процесів вимагають використання теоретичних та експериментальних методів дослідження. Певні результати можна отримати за допомогою проведення широкомасштабних модельних і натурних експериментів за допомогою різних балістичних установок. В ході дослідів встановлюються необхідні залежності і характеристики. Наприклад, розміри осколків, ступінь їх руйнування, форма і глибина кратера, гранична товщина пробиття, балістична швидкість і т.д. Однак, необхідно відзначити технічну складність і дорожнечу проведення таких дослідів, а також неможливість отримання докладної інформації просторово-часового розподілу полів напружень, деформацій і областей руйнувань. Проте, важливість отримання експериментальних результатів сумнівів не викликає.

В ролі іншого інструменту досліджень виступають наближені аналітичні або інженерні методи. Вводяться припущення, які полегшують вирішення основних рівнянь механіки суцільного середовища. Це дозволяє описати процеси з допомогою звичайних диференціальних рівнянь та з частковими похідними. Такий підхід є простим і незамінним при проведенні експрес-аналізу процесу співудару тіл, проте він обмежений вузьким діапазоном крайових умов і сформульованими припущеннями. Як правило, розв'язок систем диференціальних рівнянь з граничними і початковими умовами не має аналітичного рішення.

В цьому випадку для розв'язування системи диференціальних рівнянь використовують чисельні методи. Наприклад, метод кінцевих різниць має велику гнучкість і дозволяє моделювати динамічні процеси середовища з розривами, з контактними і вільними поверхнями. Однак, вони також є наближеними, оскільки описуються системами кінцево-різницевого рівнянь, а не самими диференціальними рівняннями. За допомогою чисельних методів можна простежити в часі весь процес динамічного деформування твердих тіл в рамках здійснених припущень. В ході чисельного експерименту можна визначити місце і час утворення локальних руйнувань, їх характер і еволюцію. Важливою

перевагою даного підходу є можливість отримання повної інформації про поточне значення обраного параметру в кожній точці досліджуваного тіла, що, в свою чергу, дозволяє з'ясувати механізми і основні закономірності процесу. Результати чисельного моделювання, наближено, можна використовувати, як для оцінки існуючих, так і розробки нових інженерних методик розрахунку.

При проведенні аналітичних досліджень співудару твердих тіл розглядалось розсіювання початкової кінетичної енергії елемента ураження. Вона трансформується в поза броньову кінетичну енергію ЕУ, в кінетичну енергію осколків, тепловий нагрів матеріалів ЕУ та перешкоди, енергію затрачену на пружно-пластичне деформування матеріалу перешкоди та ЕУ.

Вважається, що величина початкової кінетичної енергії кулі достатня для проникнення у броньовий лист. Рух механічної системи характеризується двома ступенями вільності. Матеріал броні має достатні пластичні властивості, так що проникнення (пробій листа) кулею у перешкоду відбувається за механізмом пружно-пластичного розширення отвору у ній. Аналогічно, як і інші дослідники, нехтуємо енергією ударних хвиль, які виникають при ударі кулі об перешкоду, тому енергію деформації броні визначаємо інтегральною роботою виконаною силою опору броні для проникнення кулі. При такому припущенні отримуємо систему диференціальних рівнянь для конструкції „куля – твердий шар – пружний шар”.

$$m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) = -R_{on};$$

$$m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_2\ddot{x}_2 = -F_{np}.$$

Іншою проблемою захисту особового складу від дії куль чи осколків є виникнення ударних силових навантажень внаслідок зіткнення ЕУ та захисної конструкції. Вони можуть спричинювати значні травми бійцю, в тому числі контузії.

В зв'язку зі сказаним дослідження закономірностей взаємодії куль чи осколків з захисними конструкціями, розробка способів зменшення їх кінетичної енергії,

змін напрямку кількості руху є актуальною проблемою і вимагає створення нових ефективних захисних конструкцій.

Для підтвердження теоретичних результатів, які стосуються використання тилового шару з пружними характеристиками і явища рикошету проводились експериментальні дослідження.

Метою цього дослідження були вивчення умов відбивання (рикошету) чи проникнення елемента ураження (кулі або осколка) в захисну конструкцію в залежності від їх геометричних параметрів, фізико-механічних властивостей матеріалів і кута зустрічі елемента ураження з нею.

Методика проведення експерименту та результат.

Першим кроком підготовки до проведення експерименту, який дозволяв би визначити граничне значення кута (кут, при якому відбувається не проникнення ЕУ в елемент захисної конструкції), за якого настає явище рикошету ЕУ для жорстко закріпленої плоскої пластини, було виготовлення конструкції. В якій забезпечувалось розміщення сталевих пластин, виготовленої з сталі марки *Ст3* товщиною 4 мм, під кутами від 20° до 45° до напрямку стрільби (руху кулі) з кроком 5° (фото 1).



Фото 1. Жорстко закріплена сталеві пластина захисної конструкції

Другим кроком проведення експерименту – було виготовлено конструкцію, яка складається з сталевих плоских пластин, чотирьох металевих стержнів, пружних елементів та опори до якої кріпились стержні. Пружні елементи

розміщені на металевих стержнях. Плоска сталеві пластина встановлена на металеві стержні. Вони забезпечували можливість їй рухатись вздовж стержнів здійснюючи поступальний рух та стискати пружні елементи (фото 2).

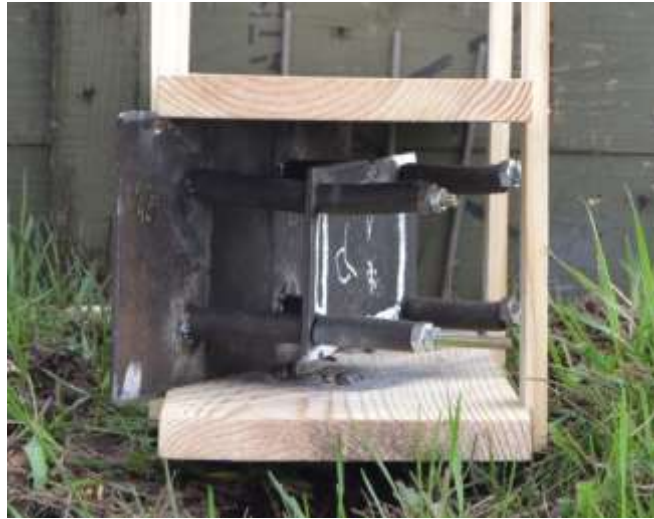


Фото 2. Підпружинена сталеві пластина захисної конструкції

Полігонні дослідження взаємодії кулі з плоскою перешкодою.

Першим етапом експерименту було визначення можливості рикошету чи пробиття кулею сталеві пластина виготовленої з сталі марки Ст.3 і товщиною 4 міліметри нерухомо встановленої під кутом 20° до напрямку руху кулі. Стрільба велась з віддалі 50 метрів. При 10 пострілах після попадання куль, випущених з АК-74, в пластину вони змінювали напрям руху, тобто мало місце явище рикошету. При 10 пострілах здійснених з СВД в пластину 9 куль змінювали напрям руху, тобто мало місце явище рикошету, і 1 куля пробивала пластину (фото 3).

Потім вище зазначену пластину встановили під кутом 25° до напрямку руху кулі. При таких самих умовах результати були наступні: при стрільбі з АК-74 мав місце рикошет у 9 випадках і 1 – пробиття, а кулі випущені з СВД – пробивали пластину 4 рази і рикошет мав місце 6 разів. При цьому напрямок руху сталеві осердя кулі та осколків металу майже співпадав з її початковим напрямком руху.



Фото 3. Полігонні дослідження захисної конструкції з жорстко закріпленою сталюю пластинуою

Після цього, вище зазначену пластину встановили під кутом 30° до напрямку руху кулі. Тоді при таких самих умовах результати були наступні: при стрільбі з АК-74 мав місце рикошет 6 разів, а пробиття – 4 рази; кулі випущені з СВД – пробиття пластини 7 разів і рикошет 3 рази.

Для випадку встановлення пластини під кутом 35° до напрямку руху кулі, при таких самих умовах результати були наступні: при стрільбі з АК-74 кулі пробивали пластину 8 разів і 2 рази мав місце рикошет; кулі випущені з СВД всі 10 разів пробивали пластину. А при встановленні пластини під кутом 40° до напрямку руху кулі спостерігали пробиття жорстко закріпленої пластини.

Другим етапом експерименту було встановлення підпружиненої сталюї пластини виготовленої з сталі марки Ст.3 і товщиною 4 міліметри під кутом 20° до напрямку руху кулі. Стрільба відбувалась з віддалі 50 метрів. Після попадання куль, випущених з АК-74, в пластину всі вони змінювали свій напрям руху, тобто мало місце явище рикошету. Аналогічне спостерігалось при стрільбі з СВД.

Потім вище зазначену пластину встановили під кутом 25° до напрямку руху кулі. При таких самих умовах результати були наступні: при стрільбі з АК-74 у всіх випадках мав місце рикошет; кулі випущені з СВД 2 рази пробивали пластину і 8 раз зрикошетили (фото 4).



Фото 4. Рикошет кулі від підпружиненого елемента захисної конструкції

Коли вищезазначену пластину встановили під кутом 30° до напрямку руху кулі, то при тих же умовах результати були наступні: при стрільбі з АК-74 мав місце рикошет 8 разів і пробиття – 2 рази; кулі випущені з СВД – пробивали пластину 4 рази і рикошет мав місце 6 разів. Кулі та осколки змінювали напрямок руху в сторону зменшення величини кута між напрямком руху кулі та площиною пластини.

Для випадку встановлення пластини під кутом 35° до напрямку руху кулі, при тих же самих умовах результати були наступні: при стрільбі з АК-74 мав місце рикошет 5 разів і пробиття – 5 разів; кулі випущені з СВД пробивали пластину у 9 випадках і 1 раз зрикошетила.

При стрільбі з АК-74 і з віддалі 50м кулі 9 разів пробивали підпружинену пластину, встановлену під кутом 40° до напрямку руху кулі, і 1 раз зрикошетила (фото 5).



Фото 5. Захисна конструкція з підпружиненою сталюю пластинною.

Зведена інформація.

При стрільбі з АК 74 результати випробувань наступні. При жорстко закріпленій пластині та підпружиненій, відповідно:

| 20° | | 25° | | 30° | | 35° | | 40° | |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття |
| 10 | 0 | 9 | 1 | 6 | 4 | 2 | 8 | 0 | 10 |

| 20° | | 25° | | 30° | | 35° | | 40° | |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття |
| 10 | 0 | 10 | 0 | 8 | 2 | 5 | 5 | 1 | 9 |

При стрільбі з СВД результати випробувань наступні.

Якщо пластина жорстко і підпружинено закріплена, відповідно:

| 20° | | 25° | | 30° | | 35° | | 40° | |
|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття |
| 9 | 1 | 6 | 4 | 3 | 7 | 0 | 10 | 0 | 10 |
| 20° | | 25° | | 30° | | 35° | | 40° | |
| Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття | Рикошет | Пробиття |
| 10 | 0 | 8 | 2 | 6 | 4 | 1 | 9 | 0 | 10 |

Висновки по проведенню експерименту

Найбільш небезпечним для захисту об'єкту є ударна взаємодія елемента ураження (кулі) з плоскою бронепластинною при перпендикулярності напрямку швидкості кулі до її площини. Крім того, підчас зіткнення ЕУ з бронепластинною виникає ударне силове навантаження на об'єкт захисту. Його величина є достатньо велика і воно викликає надмірні пошкодження об'єкту (окрім дії

осердя кулі на захищувальний об'єкт додаються осколки металу чи броні). У роботі досліджено принципову різницю між жорстко закріпленими та підпружиненими сталевими пластинами захисної конструкції. Отже, захисна конструкція з підпружиненими пластинами має підвищену пробивну стійкість в порівнянні з конструкцією в якій пластини жорстко закріплені [24].

3.3. Динаміка взаємодії кулі та рухомої перешкоди при рикошеті

В цьому підрозділі визначається вплив динаміки руху пластини на здатність нею відбивати кулю, якщо вона вдарилась об поверхню рухомої пластини.

Розглядається механічна система, яка складається з кулі та пластини.

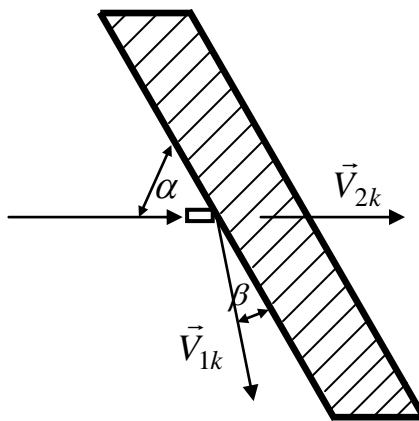


Рис. 3.7. Кінематична схема механічної системи

Використаємо до неї теорему про зміну кількості руху механічної системи [75]

$$\vec{K}(t_k) - \vec{K}(0) = \sum \vec{S}^e(t_k), \quad (3.16)$$

$\vec{K}(t_k) = m_1 \vec{V}_{1k} + m_2 \vec{V}_{2k}$ – кількість руху механічної системи після співудару кулі та пластини, m_2 – маса пластини, \vec{V}_{2k} – швидкість пластини після співудару тіл;

$\vec{K}(0) = m_1 \vec{V}_{10} + m_2 \vec{V}_{20}$ – кількість руху механічної системи до співудару кулі та пластини.

\vec{V}_{10} – швидкість кулі до удару об поверхню пластини, $\vec{V}_{20} = 0$ – пластина до удару об неї кулі була нерухома.

$\sum \vec{S}^e(t_k) = \int_0^{t_k} (\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{Z}_{1on} + \vec{Z}_{2on}) dt$ – імпульс всіх зовнішніх сил, які діють на механічну систему, \vec{P}_1 – вага кулі, \vec{P}_2 – вага пластини, \vec{Z}_{1on} і \vec{Z}_{2on} – реакції направляючих, які забезпечують тільки горизонтальне переміщення пластини, $[0; t_k]$ – проміжок часу впродовж якого відбувається співудар кулі та пластини.

Підставляючи записані співвідношення у формулу (3.16), вона набуде вигляду

$$m_1 \vec{V}_{1k} + m_2 \vec{V}_{2k} - m_1 \vec{V}_{10} = \int_0^{t_k} (\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{Z}_{1on} + \vec{Z}_{2on}) dt. \quad (3.17)$$

Проектуючи це рівняння на вісь Ox отримаємо

$$m_1 V_{1k} \cos(\alpha + \beta) + m_2 V_{2k} - m_1 V_{10} = 0. \quad (3.18)$$

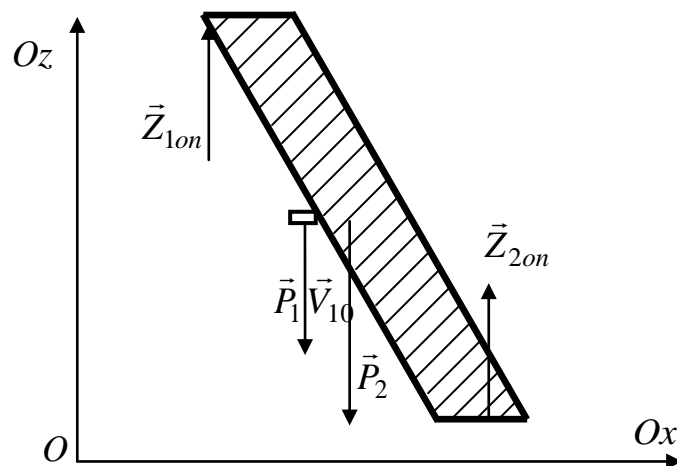


Рис. 3.8. Зовнішні сили, які діють на механічну систему

До цієї механічної системи використаємо гіпотезу Ньютона [75, 114] про співудар тіл. В нашого випадку вона набуде вигляду

$$\frac{V_{1k} \sin \beta + V_{2k} \sin \alpha}{V_{10} \sin \alpha} = k_1, \quad (3.19)$$

де k_1 – коефіцієнт відновлення.

Підчас удару кулі об пластину на неї діють сили: \vec{Z}_{1on} , \vec{Z}_{2on} , \vec{P}_2 та \vec{F}'_{12n} і $\vec{F}'_{12\tau}$ – сили нормального і тангенціального тиску.

Використовуючи основний закон динаміки до пластини [75], запишемо

$$m_2 \vec{a}_2 = \vec{Z}_{1on} + \vec{Z}_{2on} + \vec{P}_2 + \vec{F}'_{12n} + \vec{F}'_{12\tau}, \quad (3.20)$$

де \vec{a}_2 – пришвидшення пластини.

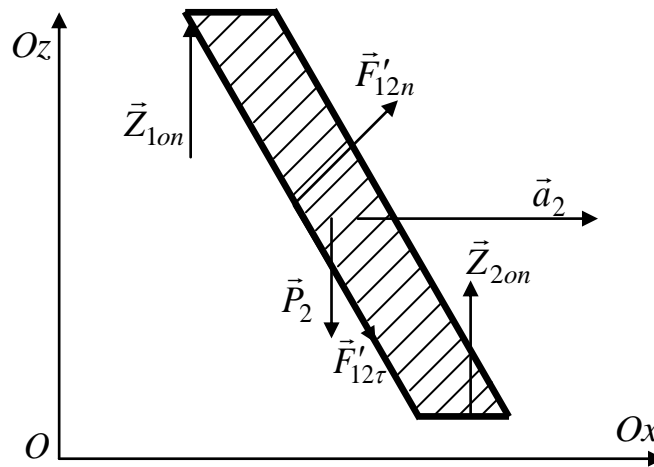


Рис. 3.9. Схема сил, які діють на пластину

Проектуючи рівняння (3.20) на вісь Ox , отримаємо

$$m_2 \ddot{x}_2 = F'_{12n} \sin \alpha + F'_{12\tau} \cos \alpha. \quad (3.21)$$

Оскільки пластина може рухатись лише горизонтально, то її пришвидшення $a_2 = \ddot{x}_2$ і сила інерції пластини описується рівнянням

$$F'_{2инер} = m_2 a_2$$

або враховуючи (3.21) отримаємо

$$F'_{2инер} = F'_{12n} \sin \alpha + F'_{12\tau} \cos \alpha, \quad (3.22)$$

Для дослідження динаміки руху кулі використаємо принцип Д'Аламбера [113], тобто до пластини, що здійснює рух, додаємо силу інерції $\vec{F}'_{2инер}$, яка напрямлена в протилежну сторону до напрямку пришвидшення пластини. Тому в подальшому будемо вважати, що пластина перебуває в стані спокою.

Тепер розглянемо удар кулі об нерухому пластину. На кулю діють сили: \vec{F}'_{12n} – сила нормального тиску пластини, $\vec{F}'_{12\tau}$ – сила тангенціального тиску пластини, \vec{P}_1 – вага кулі та сила інерції – $\vec{F}'_{2инер}$ (рис. 3.10).

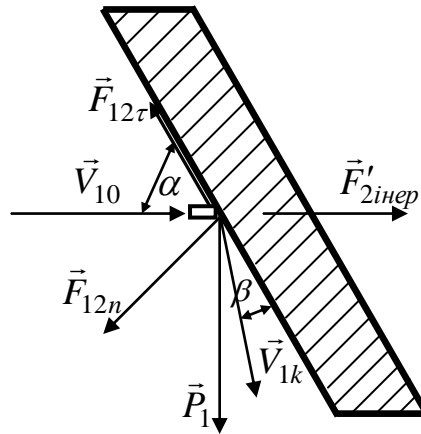


Рис. 3.10. Схема сил, які діють на кулю

Використовуючи теорему про зміну кількості руху [75] матеріальної точки

$$\vec{K}_k - \vec{K}_0 = \sum \vec{S}(t_k),$$

отримаємо залежність для кулі

$$m_1 \vec{V}_{1k} - m_1 \vec{V}_{10} = \int_0^{t_k} (\vec{P}_1 + \vec{F}_{12n}(t) + \vec{F}_{12\tau}(t) + F'_{2inер}(t)) dt.$$

Проектуючи це рівняння на нормальний та тангенціальний напрямки поверхні пластини запишемо рівняння

$$m_1 V_{1k} \sin \beta - (-m_1 V_{10} \sin \alpha) = \int_0^{t_k} (P_1 \cos \alpha + F_{12n}(t) + F'_{2inер}(t) \sin \alpha) dt, \quad (3.23)$$

$$m_1 V_{1k} \cos \beta - m_1 V_{10} \cos \alpha = \int_0^{t_k} (P_1 \sin \alpha - F_{12\tau}(t) - F'_{2inер}(t) \cos \alpha) dt. \quad (3.24)$$

Із врахуванням залежності (3.22) попередня система рівнянь набуде вигляду

$$m_1 (V_{1k} \sin \beta + V_{10} \sin \alpha) = \int_0^{t_k} (P_1 \cos \alpha + F_{12n}(t) + (F_{12n}(t) \sin \alpha + F_{12\tau}(t) \cos \alpha) \sin \alpha) dt,$$

$$m_1 (V_{1k} \cos \beta - V_{10} \cos \alpha) = \int_0^{t_k} (P_1 \sin \alpha - F_{12\tau}(t) - (F_{12n}(t) \sin \alpha + F_{12\tau}(t) \cos \alpha) \cos \alpha) dt.$$

Тут $F_{12\tau}(t) = F'_{12\tau}(t)$ і $F_{12n}(t) = F'_{12n}(t)$, оскільки два тіла взаємодіють між собою з силами рівними за величиною та протилежно напрямлені. Надалі вважаємо, що $F_{12\tau}$ і F_{12n} є середніми значеннями сил на проміжку часу $t \in [0; t_k]$.

Враховуючи, що величини сил P_1 і $F_{12\tau}$ значно менші від сили F_{12n} , то нехтуємо ними. Тоді попередні рівняння набудуть вигляду

$$m_1(V_{1k} \sin \beta + V_{10} \sin \alpha) = F_{12n}(1 + \sin^2 \alpha)t_k, \quad (3.25)$$

$$m_1(V_{1k} \cos \beta - V_{10} \cos \alpha) = -F_{12n} \sin \alpha \cos \alpha t_k. \quad (3.26)$$

Використовуючи рівняння (3.25) і (3.26), отримаємо залежність

$$\frac{V_{1k} \sin \beta + V_{10} \sin \alpha}{V_{1k} \cos \beta - V_{10} \cos \alpha} = -\frac{1 + \sin^2 \alpha}{\sin \alpha \cos \alpha},$$

або

$$V_{1k}(\sin \alpha \cos \alpha \sin \beta + \cos \beta + \cos \beta \sin^2 \alpha) = V_{10} \cos \alpha. \quad (3.27)$$

З рівняння (3.18), отримаємо

$$V_{2k} = \frac{m_1(V_{10} - V_{1k} \cos(\alpha + \beta))}{m_2}. \quad (3.28)$$

Підставляючи цю залежність в рівняння (3.19), запишемо

$$V_{1k} \sin \beta + \frac{m_1(V_{10} - V_{1k} \cos(\alpha + \beta)) \sin \alpha}{m_2} = k_1 V_{10} \sin \alpha.$$

З цього рівняння визначимо

$$V_{1k} = \frac{(k_1 m_2 - m_1) V_{10} \sin \alpha}{m_2 \sin \beta - m_1 \cos(\alpha + \beta) \sin \alpha}. \quad (3.29)$$

Підставляючи співвідношення (3.29) в рівняння (3.27), отримаємо залежність

$$\frac{(k_1 m_2 - m_1) V_{10} \sin \alpha (\sin \alpha \cos \alpha \sin \beta + \cos \beta + \cos \beta \sin^2 \alpha)}{m_2 \sin \beta - m_1 \cos(\alpha + \beta) \sin \alpha} = V_{10} \cos \alpha.$$

Виконуючи математичні перетворення, запишемо

$$m_2(k_1 \sin \alpha (\sin \alpha \cos \alpha \sin \beta + \cos \beta + \cos \beta \sin^2 \alpha) - \cos \alpha \sin \beta) + m_1(\sin \alpha \cos^2 \alpha \cos \beta - 2 \sin^2 \alpha \cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta - \sin^3 \alpha \cos \beta) = 0. \quad (3.30)$$

З рівняння (3.30) визначаємо величину кута β , під яким куля відбивається від поверхні пластини. Підставляючи значення кута β в рівняння (3.29), визначаємо величину швидкості кулі V_{1k} після її відбиття від поверхні пластини.

Використовуючи значення величин β і V_{1k} з рівняння (3.28) визначаємо швидкість пластини V_{2k} після удару об неї кулі. Величину нормальної реакції пластини, під час удару об неї кулі, визначаємо з рівняння (3.25), тобто

$$F_{12n} = \frac{m_1(V_{1k} \sin \beta + V_{10} \sin \alpha)}{(1 + \sin^2 \alpha) t_k}. \quad (3.31)$$

Якщо маса кулі – $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, маса пластини – $m_2 = 2 \text{ кг}$, коефіцієнт відновлення – $k_1 = 0,5$, кут між вектором початкової швидкості кулі та поверхнею перешкоди – $\alpha = 30^\circ$, швидкість кулі до удару об поверхню пластини – $V_{10} = 700 \text{ м/с}$, тривалість удару – $[0; t_k]$, де $t_k = 0,00005 \text{ с}$, то:

- кут, під яким куля відіб'ється від поверхні пластини, враховуючи залежність (3.30), дорівнює – $\beta = 0,389 \text{ рад}$ або $\beta = 22^\circ$;
- швидкість кулі після відбиття від поверхні пластини, враховуючи залежність (3.29), дорівнює – $V_{1k} = 459 \text{ м/с}$;
- швидкість пластини після спіудару тіл, враховуючи залежність (3.28), дорівнює – $V_{2k} = 2,01 \text{ м/с}$;
- сила нормальної реакції пластини, враховуючи залежність (3.31), дорівнює – $F_{12n} = 80485 \text{ н}$.

Для визначення сили нормальної реакції пластини, якщо б пластина була нерухома, використаємо формулу (3.12)

$$F_{1nst} = \frac{m_1(1 + k_1)V_{10} \sin \alpha_1}{t_k}.$$

Підставляючи значення величин, отримаємо

$$F_{1nst} = \frac{0,0096 \text{ кг} (1 + 0,5) 700 \text{ м/с} \sin 30^\circ}{0,00005 \text{ с}} = 100800 \text{ н}.$$

Порівнюючи значення нормальної реакції пластини $F_{12n} = 80485 \text{ н}$, якщо вона має можливість переміщуватись, з величиною нормальної реакції

$F_{\text{нст}} = 100800 \text{ н}$, якщо вона не може переміщуватись, отримаємо, що величина сили нормальної реакції зменшилась на 20%.

Висновок. Можливість переміщуватись пластині, під час удару об неї кулі, дозволяє зменшити величину нормальної реакції пластини [91].

3.4. Динаміка захисної конструкції під час удару об неї кулі

Розглядається динаміка захисної конструкції під час удару об неї кулі. Вважається, що пружні елементи в конструкції працюють лише на стиск.

Введено наступні позначення: x_1 – довжина шляху, який куля пройшла в першій передній захисній пластині, x_2, x_4, x_6, x_8 – величини переміщень відповідних передніх захисних пластин, x_3, x_5, x_7, x_9 – величини переміщень тилового ряду захисних пластин.

В загальному випадку захисна конструкція має $2n$ ступенів вільності, що відповідає кількості захисних пластин.

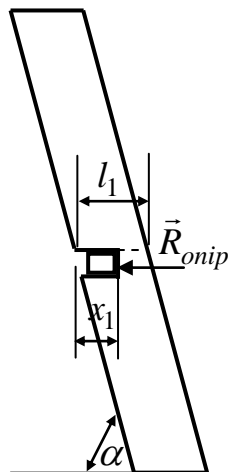


Рис. 3.11. Схема руху кулі в першій захисній пластині

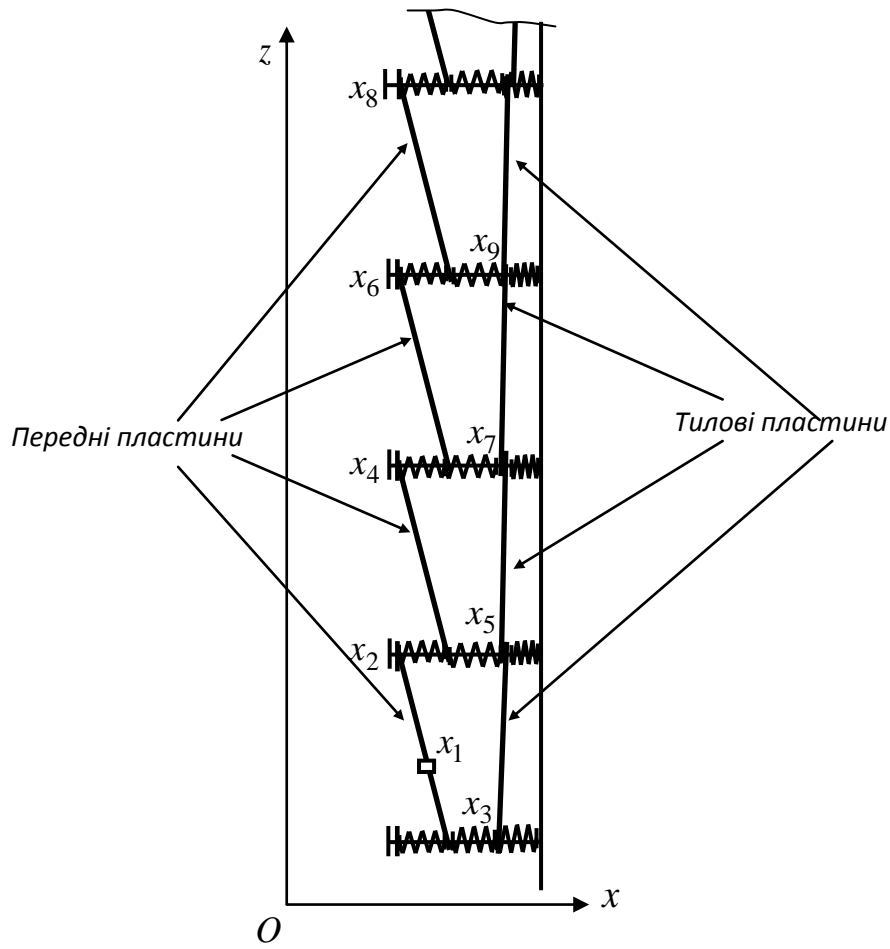


Рис. 3.12. Загальна схема захисної конструкції

Для вивчення динаміки захисної конструкції використаємо рівняння Лагранжа другого роду [57]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_{q_i}, \quad (i = \overline{1, 2n+1}), \quad (3.32)$$

де T – кінетична енергія механічної системи. Вона дорівнює

$$T = \frac{m_1(\dot{x}_1 + \dot{x}_2)^2}{2} + \frac{m_2\dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3\dot{x}_3^2}{2} + \frac{m_2\dot{x}_4^2}{2} + \frac{m_3\dot{x}_5^2}{2} + \dots, \quad (3.33)$$

де m_1 – маса кулі, m_2 – маса кожної передньої пластини (розміщені під кутом α до горизонту), m_3 – маса кожної тилової пластини (розташовані вертикально).

За узагальнені координати взято координату кулі x_1 відносно першої передньої пластини, та координати переміщення всіх захисних пластин x_2, x_3, x_4, \dots .

Узагальнена сила за координатою x_1 дорівнює величині опору матеріалу з якого виготовлена передня захисна пластина, тобто

$$Q_{x_1} = -R_{onip}. \quad (3.34)$$

Для визначення узагальнених сил за координатами x_2, x_3, x_4, \dots будемо вважати, що

$$x_2 > x_3 > x_4 > \dots \quad (3.35)$$

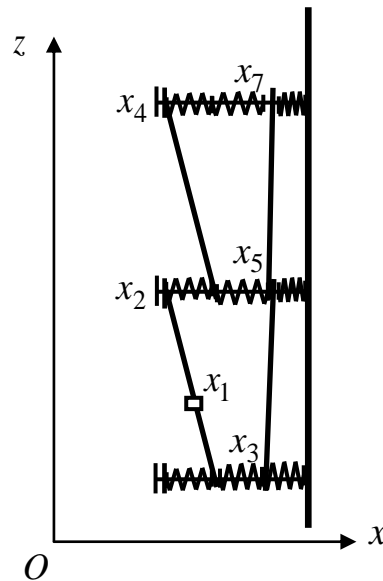


Рис. 3.13. Схема частини захисної конструкції для визначення узагальненої сили за координатами x_2 і x_3

Узагальнена сила за координатою x_2 дорівнює

$$Q_{x_2} = -c_1(x_2 - x_4) - c_2(x_2 - x_3), \quad (3.36)$$

де c_1 — жорсткість лівого, c_2 — жорсткість середнього і c_3 — жорсткість правого пружних елементів встановлених на захисну конструкцію.

Узагальнена сила за координатою x_3 дорівнює

$$Q_{x_3} = c_2(x_2 - x_3) - c_3x_3. \quad (3.37)$$

Узагальнені сили за координатами x_4 і x_5 відповідно дорівнюють

$$Q_{x_4} = -c_1(x_4 - x_6) - c_2(x_4 - x_5) + c_1(x_2 - x_4). \quad (3.38)$$

$$Q_{x_5} = c_2(x_4 - x_5) - c_3x_5. \quad (3.39)$$

Запис узагальнених сил за наступними узагальненими координатами буде мати аналогічний вигляд до запису узагальнених сил Q_{x_4} і Q_{x_5} .

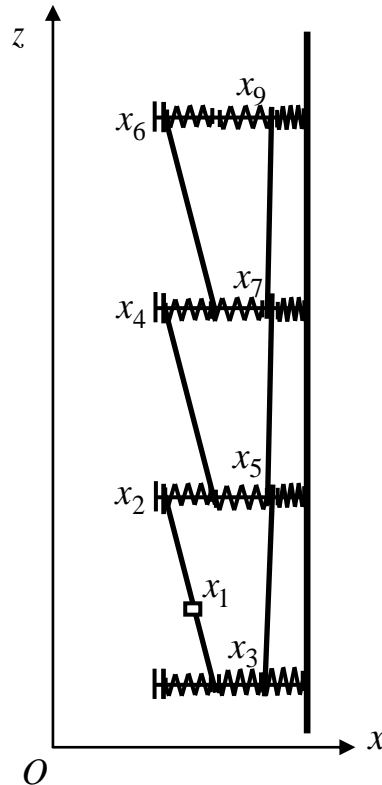


Рис. 3.14. Схема частини захисної конструкції для визначення узагальненої сили за координатами x_4 і x_5

Враховуючи отримані результати (3.33) – (3.39) рівняння Лагранжа другого роду (3.32), для вказаної механічної системи, набудуть наступного вигляду

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) &= -R_{onip}, \\ m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_2\ddot{x}_2 &= -c_1(x_2 - x_4) - c_2(x_2 - x_3), \\ m_3\ddot{x}_3 &= c_2(x_2 - x_3) - c_3x_3, \\ m_2\ddot{x}_4 &= -c_1(x_4 - x_6) - c_2(x_4 - x_5) + c_1(x_2 - x_4), \\ m_3\ddot{x}_5 &= c_2(x_4 - x_5) - c_3x_5, \\ m_2\ddot{x}_6 &= -c_1(x_6 - x_8) - c_2(x_6 - x_7) + c_1(x_4 - x_6) \text{ і т.д.} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Оскільки, система диференціальних рівнянь має $2n+1$ рівнянь і її розв'язування матиме певні труднощі, то будемо розв'язувати наближено, поступово збільшуючи кількість рівнянь.

Розглядаємо випадок, коли на удар кулі реагує тільки перша захисна пластина, в цьому випадку $x_3 = 0$, $x_4 = 0$ і т. д. Тоді система диференціальних рівнянь (3.40) набуде вигляду

$$m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) = -R_{onip}, \quad (3.41)$$

$$m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_2\ddot{x}_2 = -c_1x_2 - c_2x_2.$$

Розв'язуючи систему рівнянь отримаємо, що

$$x_1(t) = -\frac{R_{onip}t^2}{2m_1} - C_1 \sin k_{12}t - C_2 \cos k_{12}t - \frac{R_{onip}}{\tilde{n}_{12}} + C_3t + C_4,$$

$$x_2(t) = C_1 \sin k_{12}t + C_2 \cos k_{12}t + \frac{R_{onip}}{\tilde{n}_{12}},$$

де $k_{12} = \sqrt{\frac{c_{12}}{m_2}}$ і $c_{12} = c_1 + c_2$.

Сталі інтегрування визначаємо з початкових умов $x_1(0) = 0$, $\dot{x}_1(0) = V_{10}$, $x_2(0) = 0$ і $\dot{x}_2(0) = 0$. Тоді $C_1 = 0$, $C_2 = -\frac{R_{onip}}{\tilde{n}_{12}}$, $C_3 = V_{10}$ і $C_4 = 0$.

Отже, закон руху кулі та першої передньої пластини, якщо удар кулі сприймає тільки вона, описується рівняннями

$$x_1(t) = V_{10}t - \frac{R_{onip}t^2}{2m_1} - \frac{R_{onip}}{c_{12}}(1 - \cos k_{12}t), \quad (3.42)$$

$$x_2(t) = \frac{R_{onip}}{c_{12}}(1 - \cos k_{12}t). \quad (3.43)$$

В момент часу, коли куля пробиває першу захисну пластину, повинна виконуватись умова

$$x_1(t_k) = l_1, \quad (3.44)$$

де l_1 – шлях, який куля повинна подолати в передній захисній пластині.

З геометрії рис. 3.11 отримаємо, що

$$l_1 = \frac{d}{\sin \alpha}, \quad (3.45)$$

де d – товщина першої захисної пластини.

Враховуючи (3.42), (3.44) і (3.45) отримаємо рівняння для визначення тривалості руху t_k кулі в першій захисній пластині

$$V_{10}t_k - \frac{R_{onip}t_k^2}{2m_1} - \frac{R_{onip}}{c_{12}}(1 - \cos k_{12}t_k) = \frac{d}{\sin \alpha}. \quad (3.46)$$

Розв'язавши рівняння (3.46) відносно величини t_k визначаємо тривалість часу за який куля проб'є захисну пластину. Тоді використовуючи рівняння (3.43) визначимо величину переміщення та швидкість пластини в момент часу t_k , тобто

$$x_2(t_k) = \frac{R_{onip}}{c_{12}}(1 - \cos k_{12}t_k) \text{ і } \dot{x}_2(t_k) = \frac{R_{onip}}{\sqrt{m_2 c_{12}}} \sin k_{12}t_k. \quad (3.47)$$

Абсолютна швидкість кулі після пробиття захисної пластини визначається з рівняння

$$V_1(t_k) = V_{10} - \frac{R_{onip}}{m_1}t_k, \quad (3.48)$$

Якщо $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $m_2 = 2 \text{ кг}$, $V_{10} = 700 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $R_{onip} = 400000 \text{ н}$,
 $c_1 = c_2 = c_3 = 1500 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$, $d = 0,003 \text{ м}$, $\alpha = 70^\circ$, то проміжок часу за який куля пробиває першу захисну пластину дорівнює $t_k = 0,0000047 \text{ с}$. Абсолютна швидкість кулі та першої захисної пластини, в цей момент часу, дорівнюють $V_1(t_k) = 501,55 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\dot{x}_2(t_k) = 0,952 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ і пластина пройде шлях $x_2(t_k) = 0,0000023 \text{ м}$.

Аналізуючи отримані результати можна стверджувати, що при попаданні кулі в захисну пластину швидкість кулі суттєво зменшується, пластина отримує певну швидкість але її переміщення за проміжок часу, коли куля її пробиває – незначне.

Розглядаємо випадок, коли на удар кулі реагують перша пластина з переднього ряду і перша – з другого ряду, тоді $x_4 = 0$, $x_5 = 0$ і т. д. В цьому випадку система диференціальних рівнянь (3.40) набуде вигляду

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) &= -R_{onip}, \\ m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_2\ddot{x}_2 &= -c_1x_2 - c_2(x_2 - x_3), \\ m_3\ddot{x}_3 &= c_2(x_2 - x_3) - c_3x_3. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Враховуючи перше і друге рівняння системи (3.49) отримаємо

$$m_2\ddot{x}_2 = R_{onip} - \tilde{n}_{12}x_2 + c_2x_3. \quad (3.50)$$

З цього рівняння визначимо

$$x_3 = \frac{m_2\ddot{x}_2 + c_{12}x_2 - R_{onip}}{c_2}. \quad (3.51)$$

Підставляючи цю залежність в третє рівняння (3.49) запишемо

$$m_3 \frac{m_2x_2^{IV} + c_{12}\ddot{x}_2}{c_2} = c_2x_2 - c_{23} \frac{m_2\ddot{x}_2 + c_{12}x_2 - R_{onip}}{c_2},$$

де $c_{23} = c_2 + c_3$.

Здійснюючи математичні перетворення перепишемо це рівняння у вигляді

$$m_2m_3x_2^{IV} + c_{12}m_3\ddot{x}_2 = c_2^2x_2 - c_{23}m_2\ddot{x}_2 - c_{12}c_{23}x_2 + R_{onip}c_{23}.$$

Групуючи вирази отримаємо лінійне диференціальне рівняння четвертого порядку

$$x_2^{IV} + \frac{m_2c_{23} + m_3c_{12}}{m_2m_3}\ddot{x}_2 + \frac{c_{12}c_{23} - c_2^2}{m_2m_3}x_2 = \frac{c_{23}R_{onip}}{m_2m_3}. \quad (3.52)$$

Загальний розв'язок диференціального рівняння (3.52) дорівнює сумі розв'язку відповідного однорідного диференціального рівняння та частинного розв'язку, тобто

$$x_2(t) = x_{2od}(t) + x_{2част}(t). \quad (3.53)$$

Однорідне диференціальне рівняння має вигляд

$$x_2^{IV} + \frac{m_2c_{23} + m_3c_{12}}{m_2m_3}\ddot{x}_2 + \frac{c_{12}c_{23} - c_2^2}{m_2m_3}x_2 = 0. \quad (3.54)$$

Його характеристичне рівняння наступне

$$\lambda^4 + \frac{m_2 c_{23} + m_3 c_{12}}{m_2 m_3} \lambda^2 + \frac{c_{12} c_{23} - c_2^2}{m_2 m_3} = 0. \quad (3.55)$$

Це рівняння є біквдратним і його дискримінант дорівнює

$$D = \frac{(m_2 c_{23} - m_3 c_{12})^2 + 4m_2 m_3 c_2^2}{m_2^2 m_3^2}.$$

Корні біквдратного рівняння (3.55) визначаємо з рівняння

$$\lambda_{1,3}^2 = -\frac{m_2 c_{23} + m_3 c_{12} \pm \sqrt{(m_2 c_{23} - m_3 c_{12})^2 + 4m_2 m_3 c_2^2}}{2m_2 m_3},$$

тоді

$$\lambda_1^2 = -\left(\frac{m_2 c_{23} + m_3 c_{12} + \sqrt{(m_2 c_{23} - m_3 c_{12})^2 + 4m_2 m_3 c_2^2}}{2m_2 m_3} \right),$$

$$\lambda_3^2 = -\left(\frac{m_2 c_{23} + m_3 c_{12} - \sqrt{(m_2 c_{23} - m_3 c_{12})^2 + 4m_2 m_3 c_2^2}}{2m_2 m_3} \right).$$

Отже, коренями характеристичного рівняння (3.55) будуть комплексні числа тільки з уявною частиною

$$\lambda_1 = k_1 i, \quad \lambda_2 = -k_1 i, \quad \lambda_3 = k_2 i, \quad \lambda_4 = -k_2 i. \quad (3.56)$$

де $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця,

$$k_1 = \sqrt{\frac{m_2 c_{23} + m_3 c_{12} + \sqrt{(m_2 c_{23} - m_3 c_{12})^2 + 4m_2 m_3 c_2^2}}{2m_2 m_3}},$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{m_2 c_{23} + m_3 c_{12} - \sqrt{(m_2 c_{23} - m_3 c_{12})^2 + 4m_2 m_3 c_2^2}}{2m_2 m_3}}. \quad (3.57)$$

Загальний розв'язок лінійного однорідного диференціального рівняння (3.54) матиме вигляд

$$x_{2одн}(t) = C_1 \sin k_1 t + C_2 \cos k_1 t + C_3 \sin k_2 t + C_4 \cos k_2 t. \quad (3.58)$$

Частинний розв'язок диференціального рівняння (3.52) наступний

$$x_{2част}(t) = \frac{c_{23}R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2}. \quad (3.59)$$

Отже, загальний розв'язок диференціального рівняння (3.52) має вид

$$x_2(t) = C_1 \sin k_1 t + C_2 \cos k_1 t + C_3 \sin k_2 t + C_4 \cos k_2 t + \frac{c_{23}R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2}. \quad (3.60)$$

Враховуючи залежність (3.51) отримаємо, що

$$\begin{aligned} x_3(t) = & \frac{(c_{12} - m_2 k_1^2)}{c_2} (C_1 \sin k_1 t + C_2 \cos k_1 t) + \\ & + \frac{(c_{12} - m_2 k_2^2)}{c_2} (C_3 \sin k_2 t + C_4 \cos k_2 t) + \frac{c_2 R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2}. \end{aligned} \quad (3.61)$$

Довільні сталі C_1 , C_2 , C_3 і C_4 визначаємо з початкових умов

$$x_2(0) = 0, \dot{x}_2(0) = 0, x_3(0) = 0 \text{ і } \dot{x}_3(0) = 0. \quad (3.62)$$

Враховуючи (3.60) – (3.62) отримаємо систему рівнянь для визначення довільних сталих C_1 , C_2 , C_3 і C_4

$$\begin{aligned} C_2 + C_4 + \frac{c_{23}R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2} &= 0, \\ k_1 C_1 + k_2 C_3 &= 0, \\ \frac{(c_{12} - m_2 k_1^2)}{c_2} C_2 + \frac{(c_{12} - m_2 k_2^2)}{c_2} C_4 + \frac{c_2 R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2} &= 0, \\ \frac{(c_{12} - m_2 k_1^2)}{c_2} k_1 C_1 + \frac{(c_{12} - m_2 k_2^2)}{c_2} k_2 C_3 &= 0. \end{aligned}$$

Розв'язуючи систему рівнянь визначаємо сталі інтегрування

$$C_2 = \frac{(c_{12}c_{23} - c_2^2 - c_{23}m_2k_2^2)R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)}, C_4 = \frac{(c_2^2 - c_{12}c_{23} + m_2k_1^2c_{23})R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)}, C_1 = C_3 = 0.$$

Підставляючи значення сталих величин C_1 , C_2 , C_3 і C_4 в рівняння (3.60) і (3.61) запишемо закони руху відповідних пластин

$$x_2(t) = \frac{(c_{12}c_{23} - c_2^2 - c_{23}m_2k_2^2)R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_1 t +$$

$$+ \frac{(c_2^2 - c_{12}c_{23} + m_2k_1^2c_{23})R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_2 t + \frac{c_{23}R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2}, \quad (3.63)$$

$$x_3(t) = \frac{(c_{12} - m_2k_1^2)}{c_2} \frac{(c_{12}c_{23} - c_2^2 - c_{23}m_2k_2^2)R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_1 t + \\ + \frac{(c_{12} - m_2k_2^2)}{c_2} \frac{(c_2^2 - c_{12}c_{23} + m_2k_1^2c_{23})R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_2 t + \frac{c_2R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2}. \quad (3.64)$$

Враховуючи перше рівняння системи рівнянь (3.49) отримаємо

$$\ddot{x}_1(t) = -\ddot{x}_2(t) - \frac{R_{onip}}{m_1}.$$

Інтегруючи це рівняння запишемо

$$\dot{x}_1(t) = -\dot{x}_2(t) - \frac{R_{onip}}{m_1}t + C_5,$$

$$x_1(t) = -x_2(t) - \frac{R_{onip}}{2m_1}t^2 + C_5t + C_6.$$

Сталі інтегрування C_5 і C_6 визначаємо враховуючи початкові умови

$$x_1(0) = 0 \text{ і } \dot{x}_1(0) = V_{10}, \quad (3.65)$$

тоді $C_5 = V_{10}$ і $C_6 = 0$.

Отже, закон руху кулі відносно першого захисного листа описується рівнянням

$$x_1(t) = V_{10}t - \frac{R_{onip}t^2}{2m_1} - \frac{(c_{12}c_{23} - c_2^2 - c_{23}m_2k_2^2)R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_1 t - \\ - \frac{(c_2^2 - c_{12}c_{23} + m_2k_1^2c_{23})R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_2 t - \frac{c_{23}R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2}. \quad (3.66)$$

З рівняння (3.66) визначимо тривалість часу t_k впродовж якого куля пробиває першу передню захисну пластину, тобто використовуємо умову

$$x_1(t_k) = l_1, \quad (3.67)$$

де l_1 – шлях, який куля повина подолати в першій захисній пластині.

Враховуючи (3.45), (3.66) і (3.67) отримаємо рівняння для визначення тривалості руху кулі в першій захисній пластині

$$V_{10}t_k - \frac{R_{onip}t_k^2}{2m_1} - \frac{(c_{12}c_{23} - c_2^2 - c_{23}m_2k_2^2)R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_1 t_k - \frac{(c_2^2 - c_{12}c_{23} + m_2k_1^2c_{23})R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_2 t_k - \frac{c_{23}R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2} = \frac{d}{\sin \alpha}. \quad (3.68)$$

З рівняння (3.68) визначаємо тривалість часу t_k , за який куля проб'є пластину. Тоді використовуючи рівняння (3.63) і (3.64) визначимо величину переміщень відповідних захисних пластин за проміжок часу t_k .

$$x_2(t_k) = \frac{(c_{12}c_{23} - c_2^2 - c_{23}m_2k_2^2)R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_1 t_k + \frac{(c_2^2 - c_{12}c_{23} + m_2k_1^2c_{23})R_{onip}}{(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_2 t_k + \frac{c_{23}R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2}, \quad (3.69)$$

$$x_3(t_k) = \frac{(c_{12} - m_2k_1^2)(c_{12}c_{23} - c_2^2 - c_{23}m_2k_2^2)R_{onip}}{c_2(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_1 t_k + \frac{(c_{12} - m_2k_2^2)(c_2^2 - c_{12}c_{23} + m_2k_1^2c_{23})R_{onip}}{c_2(c_{12}c_{23} - c_2^2)m_2(k_2^2 - k_1^2)} \cos k_2 t_k + \frac{c_2R_{onip}}{c_{12}c_{23} - c_2^2}. \quad (3.70)$$

Враховуючи, що абсолютна швидкість кулі дорівнює

$$V_1(t) = \dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t),$$

то швидкість кулі після пробиття нею захисної пластини визначається з рівняння

$$V_1(t_k) = V_{10} - \frac{R_{onip}}{m_1} t_k.$$

Якщо $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $m_2 = 2 \text{ кг}$, $m_3 = 1,8 \text{ кг}$, $V_{10} = 700 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $R_{onip} = 400000 \text{ н}$, $c_1 = c_2 = c_3 = 1500 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$, $d = 0,003 \text{ м}$, $\alpha = 70^\circ$, то проміжок часу за який куля пробиває передню захисну пластину дорівнює $t_k = 0,0000048 \text{ с}$.

Абсолютна швидкість кулі, передньої і тилової захисних пластин відповідно дорівнюють $V_1(t_k) = 499,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\dot{x}_2(t_k) = 0,962 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ і $\dot{x}_3(t_k) = 0,000003 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

За проміжок часу $t_k = 0,0000048$ с передня і тилова захисні пластини здійснять переміщення $x_2(t_k) = 2,3 \cdot 10^{-6}$ м і $x_3(t_k) = 3,7 \cdot 10^{-12}$ м.

Аналізуючи отримані вище результати можна стверджувати, що при попаданні кулі в передню захисну пластину всі інші пластини, в час контакту кулі із нею, силу удару кулі майже не сприймають.

3.5. Висновки до третього розділу

Аналіз результатів досліджень дає можливість стверджувати:

- при більшому значенні коефіцієнта відновлення або кількості руху елемента ураження, явище рикошету можливе при меншому куті між напрямком вектора швидкості та дотичною проведеною до поверхні захисної перешкоди;
- можливість явища рикошету зростає, якщо величина сили опору матеріалу перешкоди більша;
- можливість переміщуватись захисним пластинам, підчас удару об них елемента ураження, зменшує величину нормальної реакції пластини, тобто реалізація явища рикошету зростає;
- при попаданні кулі в захисну пластину конструкції інші її захисні пластини силу удару кулі майже не сприймають, оскільки величина переміщення цих пластин складає десятки мікронів;
- якщо ж елемент ураження пробиває передню захисну пластину (захисної конструкції з рознесеними захисними пластинами), то на його шляху опиняється інша пластинка.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА РІВНЯ ЗАХИЩЕНОСТІ ОБ'ЄКТА

Питання захищеності об'єкту від ураження було і є актуальним у військовій справі. Сутність вирішення питання захищеності людини і наземного рухомого або нерухомого об'єктів є з суттєвими відмінностями. Спільним у питанні захисту цих об'єктів, від елементів ураження, є зменшення їх кінетичної енергії, яка є доволі великою, або зміною напрямку кількості руху, тобто скерування лету елемента ураження в сторону від об'єкту захисту. Захищеність об'єктів реалізовується комплексом заходів на етапах конструювання, виробництва і застосування [104, 105, 106, 107, 108].

Тому у цьому розділі розвивається ідея підвищення захищеності об'єкту з одночасно можливим зменшенням маси захисної конструкції (а від так її собівартості) на базі конструктивного вирішення питання: двох шарової конструкції з тиловим шаром, який найбільш доцільно вибирати пружним з регресивною характеристикою; та з рознесеними пластинами.

4.1. Кінетичні характеристики впливу захисної конструкції на об'єкт захисту

Підвищення захисних властивостей конструкції на базі часткового покращення фізико-механічних властивостей матеріалу, збільшення його товщини з тактико-технічних, експлуатаційних характеристик БМ (та й економічної сторони) є не завжди вигідним та можливим.

Використання елементів захисту повинно базуватись на рекомендаціях по їх застосуванню, в яких вказують рівень захищеності об'єкту та зони ураження. На основі статистичних даних, отриманих внаслідок практичного використання елементів захисту, експлуатаційниками виробляються рекомендації до конструкторів та виробників. В цих рекомендаціях вказуються позитивні та негативні якості елементів захисту та можливі удосконалення. Рівень захищеності

об'єкту базується на теоретичних і експериментальних дослідженнях та статистичному аналізі уражень об'єктів отриманих під час практичних їх використань. Експериментальні дослідження базуються на аналізі статистичних даних отриманих внаслідок лабораторних і полігонних досліджень, та результатів бойового використання елементів захисту.

Що стосується теоретичних досліджень, то вони в першу чергу ґрунтуються на створенні адекватних фізичних, а від так математичних моделей процесу взаємодії елемента ураження та об'єкту захисту. Однак, математична модель не дає повного опису фізико-механічних процесів взаємодії елемента ураження і захисту та отримання чисельних результатів супроводжується певними наближеннями.

Балістична стійкість захисту переважно визначається експериментальним шляхом, тобто обстрілом її кулями. Характеристиками балістичної стійкості захисту є:

- значення швидкості елемента ураження нижче якої забезпечується 100% захист. Ця характеристика в основному поширюється на випадки, коли куля взаємодіє із захистом по нормалі до поверхні захисту;

- значення швидкості елемента ураження при перевищенні якої має місце, практично, 100% пробиття захисту. В цьому випадку теж вважається, що швидкість кулі скерована по нормалі до поверхні захисту;

- швидкість елемента ураження, коли має місце 50% можливість пробиття захисту;

- граничне значення мінімального кута між нормаллю поверхні захисту та напрямком швидкості елемента ураження, після перевищення якого має місце 100% захист від пробиття елементом ураження.

На основі аналізу експериментальних досліджень виробляються рекомендації для проведення нових теоретичних розробок з їх подальшою перевіркою.

Пробивна дія кулі (осколку) залежить від її конструкції, маси, кінетичної енергії, міцності матеріалу осердя, а також міцності матеріалу, з якого виготовлений захист об'єкту.

Підвищеною пробивною здатністю володіють бронебійні кулі з термозміцненим осердям високовуглецевої сталі. Бронебійні кулі використовуються в довгоствольній зброї (довжина ствола гвинтівки СВД – 620 мм) та мають велику початкову швидкість ($V_0 = 820 \div 840 \frac{m}{c}$ – для СВД).

При проектуванні елементів двошарової конструкції необхідно враховувати величину імпульсного силового навантаження на об'єкт захисту. Значне силове навантаження на об'єкт захисту може бути причиною порушення тактико-технічних характеристик БМ та ураження людини. Ступінь пошкоджень залежить від величини переміщення конструкції, тривалості взаємодії елемента ураження з нею та місцем нанесення удару по ній.

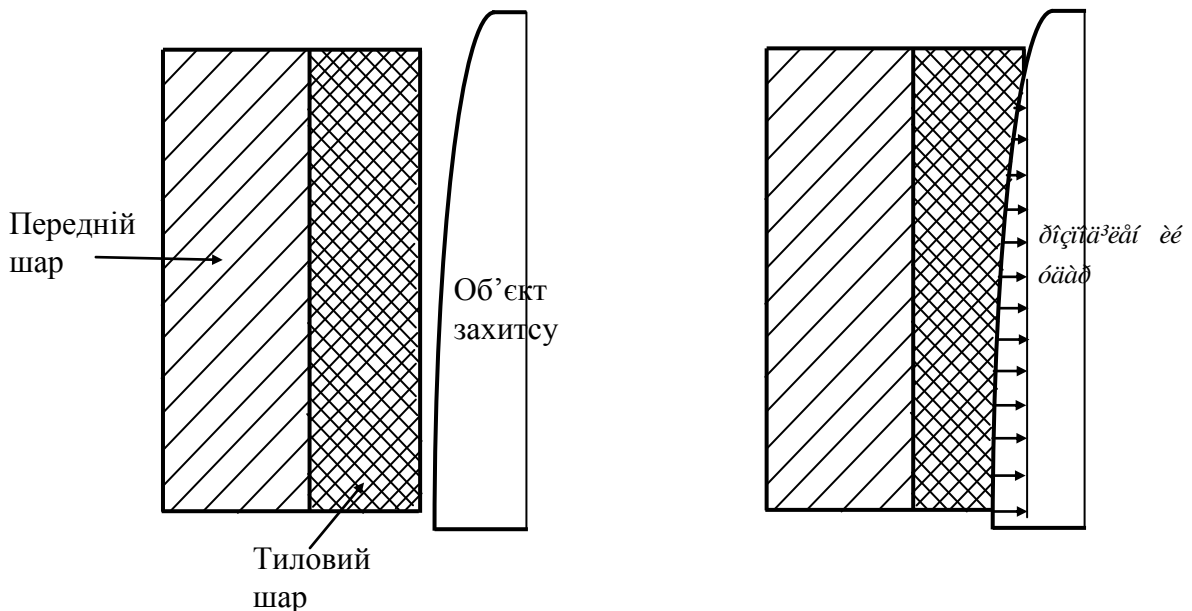


Рис. 4.1. Схема елемента двошарової конструкції

На основі теоретичних досліджень, здійснених в розділі 2, обґрунтовані пропозиції для розробки двошарової конструкції, яка дозволяє зменшити силове навантаження на об'єкт захисту внаслідок імпульсного силового навантаження елемента ураження об один з її елементів.

Внаслідок удару кулі об передній шар двошарової конструкції частина кінетичної енергії кулі трансформується в:

- пружно-пластичну енергію деформації переднього (твердого) шару та теплову енергію;
- пружну деформацію тилового (пружного) шару;
- кінетичну енергію конструкції.

Сила удару двошарової конструкції об об'єкт захисту, внаслідок наявності пружного шару, буде розподілятися на більшу площу та одночасно збільшиться тривалість удару, що приводить до зменшення його величини [92, 95].

Якщо пружність тилового шару описується залежністю $F_{\text{пружності}} = c(\Delta x)^\gamma$, то в таблиці 4.1 вказані числові значення його максимальної деформації x_{max} і сили тиску F_{max} на поверхню об'єкту захисту в залежності від значення параметра γ .

Таблиця 4.1.

Значення деформації тилового шару і максимального тиску на нерухому поверхню в залежності від величини параметра нелінійності γ , якщо куля застрягає в ньому.

| | $\gamma = 0,5$ | | $\gamma = 0,75$ | | $\gamma = 1$ | | $\gamma = 2$ | |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $c, \text{H}/\text{M}$ | x_{max}, M | F_{max}, H | x_{max}, M | F_{max}, H | x_{max}, M | F_{max}, H | x_{max}, M | F_{max}, 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 |

Аналізуючи значення результатів в таблиці 4.1, можна стверджувати, що із зростанням величини параметра c , тобто величини пружності тилового шару, його максимальна деформація зменшується але величина максимального тиску на нерухому поверхню зростає.

Якщо максимальна величина деформації тилового шару обмежена і дорівнює $x_{\text{max}} = 0,04 \text{ м}$, то мають місце наступні значення величин:

$$\gamma = 0,5, c = 8500 \frac{H}{M}, F_{\max} = 1699H;$$

$$\gamma = 1, c = 55500 \frac{H}{M}, F_{\max} = 2217H;$$

$$\gamma = 2, c = 2140000 \frac{H}{M}, F_{\max} = 3407H.$$

Аналізуючи ці значення можна стверджувати, якщо пружність тилового шару описується залежністю $F_{\text{пружності}} = c(\Delta x)^\gamma$ і величина його максимальної деформації є фіксована, то найменше значення максимальної величини сили удару буде при значеннях параметра $\gamma < 1$.

Наявність тилового шару сприяє частковому поглинанню осколків утворених в результаті взаємодії кулі та переднього (твердого) шару, а це зменшує за броньову дію елемента ураження на об'єкт захисту.

4.2. Вплив геометрії конструкції на зони захищеності та ураження об'єкту захисту

У цьому підрозділі досліджується вплив геометрії захисної конструкції на захищеність БМ. Базою для отримання результатів служать основні співвідношення отримані у розділі 3. Для їх використання виділимо із загальної схеми захисної конструкції (рис. 3.12) її частину, яку вказано на рис. 4.2.

Дослідимо, які зони захищеності та ураження створює конструкція для об'єкту захисту [88, 89]. Вважаємо, що елемент ураження проходить через точку $A_0(0, z_0)$ ($0 \leq z_0 \leq h$), яка розміщена на осі Oz , маючи швидкість \vec{V}_{10} та довільний напрям.

Нехай віддаль між точками O і A_1 , двох суміжних пластин, дорівнює h , тобто координати точки A_1 наступні $A_1(0, h)$. Пластини OA_0 і A_1A_4 нахилені до осі Ox під кутом α_{\max} , величину якого визначаємо з умови, що удар кулі об пластину під цим кутом (кут падіння) завершується її відбиттям (явище рикошету).

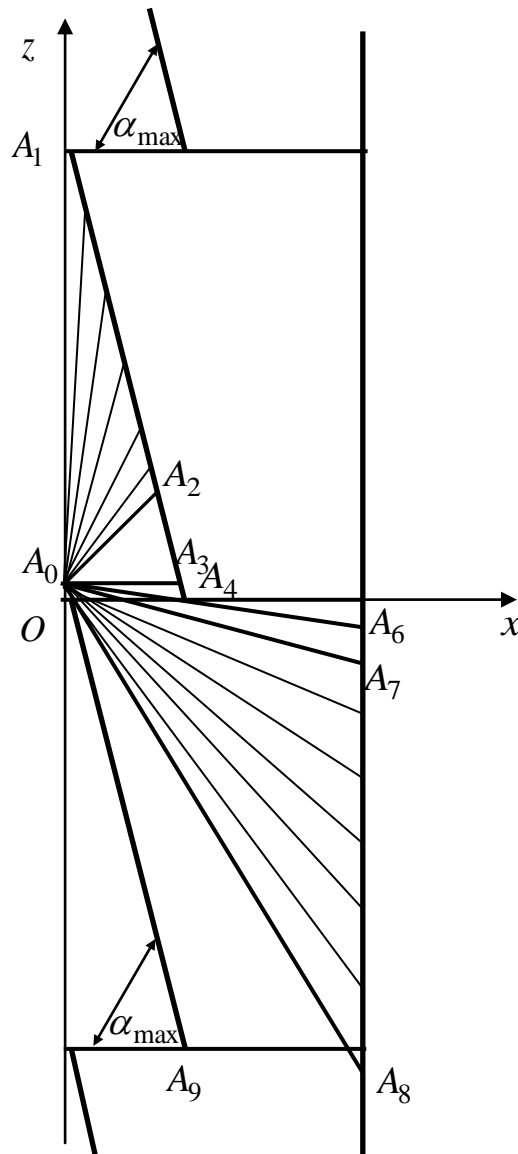


Рис. 4.2. Схема розподілу зон захищеності та ураження в конструкції, якщо куля (осколок) проходить через довільну точку $A_0(0, z_0)$

Аналізуючи рис. 4.2 можна стверджувати, якщо напрям початкової швидкості ЕУ \vec{V}_{10} такий, що він проходячи через точку $A_0(0, z_0)$ вдаряється об пластину на ділянці A_1A_2 , то він відбивається від пластини, оскільки $\angle A_0A_2A_3 = \alpha_{\max}$ і тому кут між напрямком початкової швидкості ЕУ \vec{V}_{10} і поверхнею пластини менше від кута α_{\max} .

Якщо напрям початкової швидкості \vec{V}_{10} ЕУ такий, що проходячи через точку $A_0(0, z_0)$ вдаряється об пластину на ділянці A_2A_3 , то він «застрягає» або

пробиває її, оскільки кут падіння більший від величини α_{\max} (пряма A_0A_3 паралельна до осі Ox).

Якщо ж напрям початкової швидкості \vec{V}_{10} ЕУ такий, що проходячи через точку $A_0(0, z_0)$ вдаряється об пластину на ділянці A_3A_4 , то він відбивається від пластини, оскільки кут між напрямком початкової швидкості і поверхнею пластини менше від кута α_{\max} .

Якщо напрям початкової швидкості ЕУ \vec{V}_{10} такий, що проходячи через точку $A_0(0, z_0)$ він обминає передню пластину, то він вдаряється об тилову пластину на ділянці A_6A_7 і може її пробити або застрягти, оскільки $\angle A_0A_7A_6 = \alpha_{\max}$.

Якщо напрям початкової швидкості ЕУ \vec{V}_{10} такий, що проходячи через точку $A_0(0, z_0)$ він обминає передню пластину і вдаряється об тилову на ділянці A_7A_8 , тоді він відбивається від пластини, через те що кут між напрямком його початкової швидкості та поверхнею пластини менший від кута α_{\max} .

Якщо напрям початкової швидкості \vec{V}_{10} такий, що ЕУ проходячи через точку $A_0(0, z_0)$ вдаряється об передню пластину на ділянці OA_9 , то він відбивається від пластини, оскільки кут між напрямком початкової швидкості \vec{V}_{10} і поверхнею пластини менший від кута α_{\max} .

Для того щоб не відбулося прямого попадання ЕУ в ділянку A_6A_7 пластини, з подальшим її пробиттям, необхідно збільшувати довжину пластини A_1A_4 . Визначимо її мінімальну довжину використовуючи геометрію рис. 4.3.

На основі теореми синусів для трикутника $A_0A_4A_5$ запишемо рівняння

$$\frac{A_0A_4}{\sin(2\alpha_{\max} - 90^\circ)} = \frac{A_4A_5}{\sin(90^\circ - \alpha_{\max})}. \quad (4.1)$$

Враховуючи, що $A_0A_4 = OA_1 \operatorname{ctg} \alpha_{\max}$ або $A_0A_4 = h \operatorname{ctg} \alpha_{\max}$, залежність (4.1) набуде вигляду

$$A_4 A_5 = \frac{h \operatorname{ctg} \alpha_{\max} \cos \alpha_{\max}}{\sin(2\alpha_{\max} - 90^\circ)}. \quad (4.2)$$

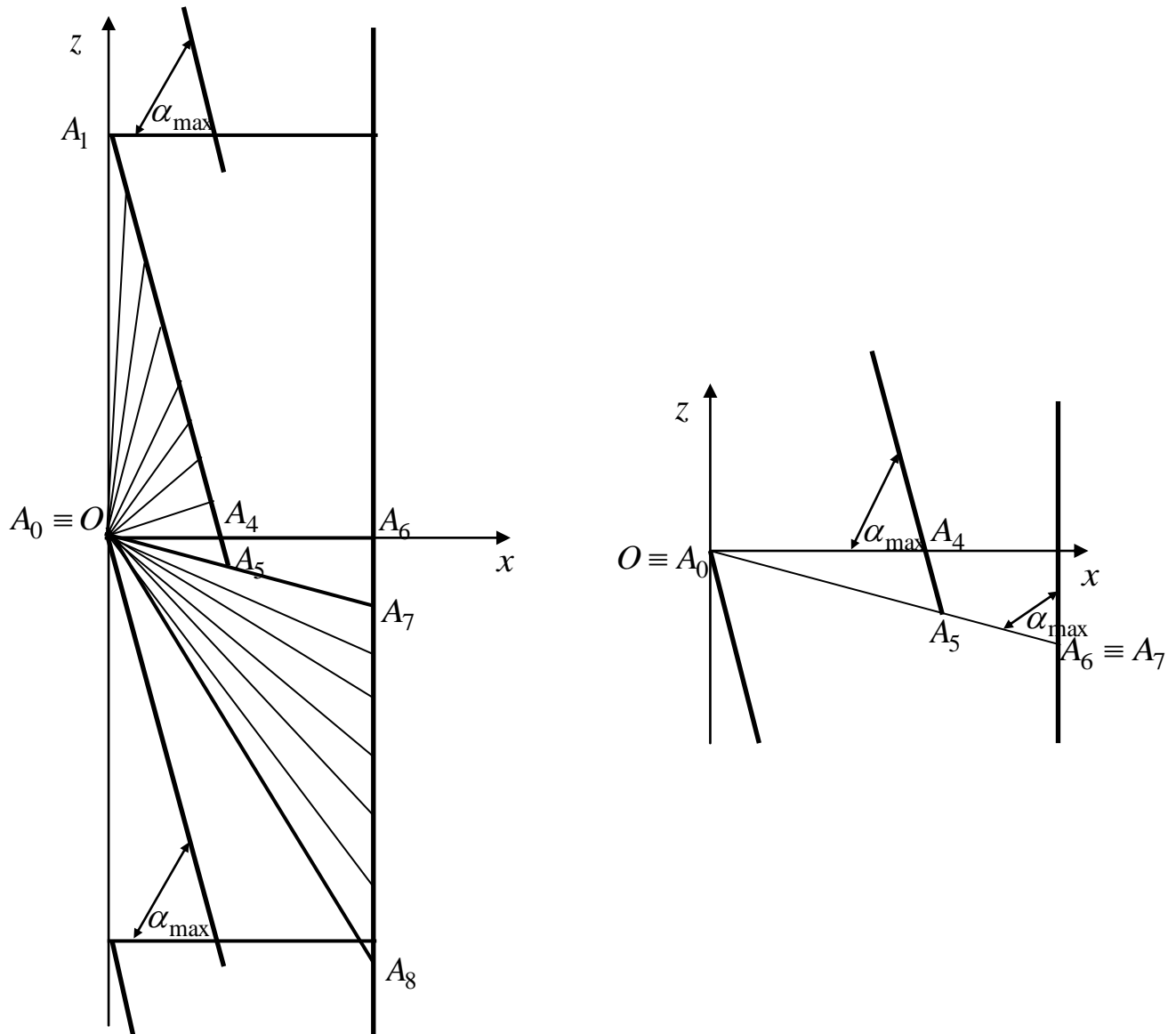


Рис. 4.3. Схема для визначення мінімальної довжини передньої пластини

Отже, мінімальна довжина передньої захисної пластини, щоб уникнути пробиття тилової, визначається з рівняння

$$A_1 A_5 = \frac{h}{\sin \alpha_{\max}} + \frac{h \operatorname{ctg} \alpha_{\max} \cos \alpha_{\max}}{\sin(2\alpha_{\max} - 90^\circ)} \quad \text{або} \quad l_{1\min} = \frac{h(\sin(2\alpha_{\max} - 90^\circ) + \operatorname{ctg} \alpha_{\max} \cos \alpha_{\max})}{\sin \alpha_{\max} \sin(2\alpha_{\max} - 90^\circ)}. \quad (4.3)$$

Зокрема, якщо віддаль між суміжними пластинами по вертикалі дорівнює $h = 200\text{мм}$ і кут $\alpha_{\max} = 65^\circ$, тоді мінімальна довжина передньої захисної пластини, як випливає із (4.3), рівна

$$l_{1\min} = \frac{200(\sin(2 \cdot 65^\circ - 90^\circ) + \operatorname{ctg} 65^\circ \cos 65^\circ)}{\sin 65^\circ \sin(2 \cdot 65^\circ - 90^\circ)} = \frac{200(\sin 40^\circ + \operatorname{ctg} 65^\circ \cos 65^\circ)}{\sin 65^\circ \sin(40^\circ)} = 288\text{мм}$$

а при $\alpha_{\max} = 70^\circ - l_{1\min} = 247\text{мм}$.

4.3. Кінематичні параметри елемента ураження після пробиття першої пластини конструкції

Теоретичними методами попередньо були дослідженні етапи проникнення і пробиття захисної конструкції. Однак детального дослідження потребує і завершальний етап (виліт кулі з захисної конструкції).

На завершальному етапі взаємодії елемента ураження і металевої пластини утворюється вирва в ній, яка характеризується глибиною і конфігурацією, а це в подальшому впливає на рух елемента ураження. Тобто відбувається зміна його лінійної швидкості, що є суттєвим, тому що елемент ураження починає перекидатись. Інформація про лінійну та кутову швидкості перекидування елемента ураження, після вильоту з броні, дозволить розробити захисну конструкцію з рознесеними пластинами підвищеної кулестійкості.

Розглядається процес вильоту елемента ураження (моделюємо його у вигляді прямокутного паралелепіпеда з основою розміром $b \times b$ та висотою L) з металевої броні. В такому разі на ЕУ зі сторони броні діють сила тертя $\vec{F}_{\text{тр}}$, нормальна реакція \vec{N} . Вважається, що ЕУ в процесі вильоту з захисної броні весь час торкається її в точці H (рис. 4.4).

В цьому випадку ЕУ буде мати два ступені вільності і для опису руху його використаємо теорію динаміки плоского руху тіла.

Диференціальні рівняння руху ЕУ матимуть вигляд

$$m_1 \ddot{x} = -F_{mp} \cos \varphi + N \sin \varphi;$$

$$I_C \ddot{\varphi} = 0,5 F_{mp} b + N(0,5L - \Delta_k + \Delta l), \quad (4.4)$$

де: x – координата центра мас тіла відносно осі Ox , y – координата центра мас тіла відносно осі Oy , m_1 – маса кулі, I_C – момент інерції кулі відносно осі перпендикулярної до площини рисунка, яка проходить через її центр мас, $BH = \Delta_k$ – довжина частини кулі, яка міститься в металевій пластині в початковий момент часу, Δl – величина переміщення точки B відносно осі Ox , φ – величина кута обертання кулі відносно її центра мас (додатна величина відліку кута проти руху стрілки годинника).

З геометрії рисунка (рис. 4.4) отримаємо

$$\Delta l = x - (0,5L - \Delta_k + \Delta l)(\cos \varphi - 1) - 0,5b \sin \varphi.$$

Здійснимо лінералізацію цього рівняння, тобто будемо вважати $\sin \varphi = \varphi$ і $\cos \varphi = 1$, тоді рівняння набуде вигляду

$$\Delta l = x - 0,5b \varphi. \quad (4.5)$$

Систему рівнянь (4.4), враховуючи (4.5), перепишемо

$$m_1 \ddot{x} = -F_{mp} + N \varphi;$$

$$I_C \ddot{\varphi} = 0,5 F_{mp} b + N(0,5L - \Delta_k + x - 0,5b \varphi). \quad (4.6)$$

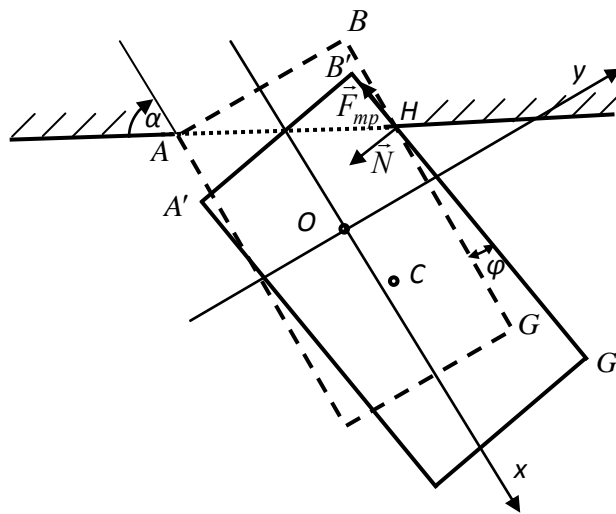


Рис. 4.4. Схематичне зображення ЕУ в момент вильоту з захисної пластини

Для розв'язування системи диференціальних рівнянь (4.6) з диференціюємо друге рівняння двічі

$$I_C \varphi^{IV} = N\ddot{x} - 0,5bN\ddot{\varphi}.$$

Враховуючи перше рівняння системи (4.6), отримаємо

$$I_C \varphi^{IV} + \frac{Nb}{2} \ddot{\varphi} - \frac{N^2}{m_1} \varphi = -\frac{NF_{mp}}{m_1}.$$

Перепишемо це рівняння у вигляді

$$\varphi^{IV} + \frac{Nb}{2I_C} \ddot{\varphi} - \frac{N^2}{m_1 I_C} \varphi = -\frac{NF_{mp}}{m_1 I_C}. \quad (4.7)$$

Загальний розв'язок диференціального рівняння (4.7) дорівнює сумі загального розв'язку відповідного однорідного диференціального

$$\varphi^{IV} + \frac{Nb}{2I_C} \ddot{\varphi} - \frac{N^2}{m_1 I_C} \varphi = 0 \quad (4.8)$$

і часткового розв'язку. Для визначення загального розв'язку однорідного диференціального рівняння (4.8) запишемо його характеристичне рівняння

$$k^4 + \frac{Nb}{2I_C} k^2 - \frac{N^2}{m_1 I_C} = 0. \quad (4.9)$$

Корені цього рівняння наступні

$$k_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{Nb}{4I_C} + \sqrt{\left(\frac{Nb}{4I_C}\right)^2 + \frac{N^2}{m_1 I_C}}}, \quad k_{3,4} = \pm i \sqrt{\frac{Nb}{4I_C} + \sqrt{\left(\frac{Nb}{4I_C}\right)^2 + \frac{N^2}{m_1 I_C}}}. \quad (4.10)$$

Позначимо

$$k_1 = \sqrt{-\frac{Nb}{4I_C} + \sqrt{\left(\frac{Nb}{4I_C}\right)^2 + \frac{N^2}{m_1 I_C}}} = k, \quad k_2 = -\sqrt{-\frac{Nb}{4I_C} + \sqrt{\left(\frac{Nb}{4I_C}\right)^2 + \frac{N^2}{m_1 I_C}}} = -k,$$

$$k_3 = i \sqrt{\frac{Nb}{4I_C} + \sqrt{\left(\frac{Nb}{4I_C}\right)^2 + \frac{N^2}{m_1 I_C}}} = i\lambda, \quad k_4 = -i \sqrt{\frac{Nb}{4I_C} + \sqrt{\left(\frac{Nb}{4I_C}\right)^2 + \frac{N^2}{m_1 I_C}}} = -i\lambda,$$

де $i^2 = -1$.

Загальний розв'язок однорідного диференціального рівняння (4.9) наступний

$$\varphi_{одн}(t) = C_1 e^{kt} + C_2 e^{-kt} + C_3 e^{i\lambda t} + C_4 e^{-i\lambda t}, \quad (4.11)$$

де: C_1, C_2, C_3 і C_4 – довільні сталі інтегрування.

Частковий розв'язок диференціального рівняння (4.7) матиме вигляд

$$\varphi_{част} = \frac{F_{mp}}{N}. \quad (4.12)$$

Отже, загальний розв'язок диференціального рівняння (4.7), враховуючи (4.11) і (4.12), буде

$$\varphi(t) = C_1 e^{kt} + C_2 e^{-kt} + C_3 e^{i\lambda t} + C_4 e^{-i\lambda t} + \frac{F_{mp}}{N}. \quad (4.13)$$

Підставляючи (4.13) в перше рівняння системи (4.6) отримаємо

$$m_1 \ddot{x} = -F_{mp} + N \left(C_1 e^{kt} + C_2 e^{-kt} + C_3 e^{i\lambda t} + C_4 e^{-i\lambda t} + \frac{F_{mp}}{N} \right). \quad (4.14)$$

Розв'язок цього диференціального рівняння наступний

$$x(t) = \frac{N}{m_1 k^2} (C_1 e^{kt} + C_2 e^{-kt}) + \frac{N}{m_1} \left(-\frac{C_3}{\lambda^2} e^{i\lambda t} - \frac{C_4}{\lambda^2} e^{-i\lambda t} \right) + C_5 t + C_6, \quad (4.15)$$

де C_5 і C_6 – довільні сталі інтегрування.

Підставляючи (4.13) і (4.15) в друге рівняння системи рівнянь (4.6), отримаємо

$$\begin{aligned} I_C (k^2 C_1 e^{kt} + k^2 C_2 e^{-kt} - \lambda^2 C_3 e^{i\lambda t} - \lambda^2 C_4 e^{-i\lambda t}) &= 0,5 F_{mp} b + 0,5 N L - N \Delta_k + \\ + \frac{N^2}{m_1 k^2} (C_1 e^{kt} + C_2 e^{-kt}) + \frac{N^2}{m_1 \lambda^2} (-C_3 e^{i\lambda t} - C_4 e^{-i\lambda t}) + N C_5 t + N C_6 - \\ - \frac{N b}{2} \left(C_1 e^{kt} + C_2 e^{-kt} + C_3 e^{i\lambda t} + C_4 e^{-i\lambda t} + \frac{F_{mp}}{N} \right). \end{aligned}$$

Здійснюючи математичні перетворення попереднє рівняння набуде вигляду

$$0,5 N L - N \Delta_k + N C_5 t + N C_6 = 0.$$

Аналізуючи цю залежність можна стверджувати, що

$$C_5 = 0 \text{ і } C_6 = \Delta_k - 0,5 L. \quad (4.16)$$

Враховуючи значення величин C_5 і C_6 залежність (4.15) буде наступна

$$x(t) = \frac{N}{m_1 k^2} (C_1 e^{kt} + C_2 e^{-kt}) - \frac{N}{m_1 \lambda^2} (C_3 e^{i\lambda t} + C_4 e^{-i\lambda t}) + \Delta_k - 0,5L. \quad (4.17)$$

Використовуючи початкові умови

$$\varphi(0) = 0; \dot{\varphi}(0) = 0; x(0) = 0; \dot{x}(0) = V_{10Z}, \quad (4.18)$$

визначаємо значення сталих інтегрування

$$\begin{aligned} C_1 &= -\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp} k^2 \lambda^2}{2Nk^2(k^2 + \lambda^2)} + \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2Nk(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp}}{2N}, \\ C_2 &= -\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp} k^2 \lambda^2}{2Nk^2(k^2 + \lambda^2)} - \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2N\lambda(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp}}{2N}, \\ C_3 &= \frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp} \lambda^2 k^2}{2N(k^2 + \lambda^2)k^2} + i \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2N\lambda(k^2 + \lambda^2)}, \\ C_4 &= \frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp} \lambda^2 k^2}{2N(k^2 + \lambda^2)k^2} - i \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2N\lambda(k^2 + \lambda^2)}, \end{aligned} \quad (4.19)$$

Отже, закони руху ЕУ, в процесі його вильоту із захисної пластини, матимуть

ВИГЛЯД

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \left(-\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp} k^2 \lambda^2}{2Nk^2(k^2 + \lambda^2)} + \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2Nk(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp}}{2N} \right) e^{kt} + \\ &+ \left(-\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp} k^2 \lambda^2}{2Nk^2(k^2 + \lambda^2)} - \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2N\lambda(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp}}{2N} \right) e^{-kt} + \\ &+ \left(\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp} \lambda^2 k^2}{2N(k^2 + \lambda^2)k^2} + i \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2N\lambda(k^2 + \lambda^2)} \right) e^{i\lambda t} + \\ &+ \left(\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp} \lambda^2 k^2}{2N(k^2 + \lambda^2)k^2} - i \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2N\lambda(k^2 + \lambda^2)} \right) e^{-i\lambda t} + \frac{F_{mp}}{N}, \\ x(t) &= \frac{N}{m_1 k^2} \left(-\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp} k^2 \lambda^2}{2Nk^2(k^2 + \lambda^2)} + \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2Nk(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp}}{2N} \right) e^{kt} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{N}{m_1 k^2} \left(-\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp} k^2 \lambda^2}{2Nk^2(k^2 + \lambda^2)} - \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2N\lambda(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp}}{2N} \right) e^{-kt} - \quad (4.21) \\
& - \frac{N}{m_1 \lambda^2} \left(\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp} \lambda^2 k^2}{2N(k^2 + \lambda^2)k^2} + i \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{0Z}}{2N\lambda(k^2 + \lambda^2)} \right) e^{i\lambda t} - \\
& - \frac{N}{m \lambda^2} \left(\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp} \lambda^2 k^2}{2N(k^2 + \lambda^2)k^2} - i \frac{m_1 k^2 \lambda^2 V_{10Z}}{2N\lambda(k^2 + \lambda^2)} \right) e^{-i\lambda t} + \Delta_k - 0,5L.
\end{aligned}$$

З врахуванням формули Ейлера $e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \sin \alpha$ запишемо, що

$$e^{i\lambda t} = \cos \lambda t + i \sin \lambda t \quad \text{і} \quad e^{-i\lambda t} = \cos \lambda t - i \sin \lambda t.$$

Підставляючи ці залежності у (4.20) і (4.21) отримаємо закон зміни кута обертання і рух центру мас ЕУ відносно осі Ox

$$\begin{aligned}
\varphi(t) = & \left(-\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp} \lambda^2}{2N(k^2 + \lambda^2)} + \frac{m_1 V_{10Z} k \lambda^2}{2N(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp}}{2N} \right) e^{kt} + \\
& + \left(-\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2N(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp} \lambda^2}{2N(k^2 + \lambda^2)} - \frac{m_1 V_{10Z} k \lambda^2}{2N(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp}}{2N} \right) e^{-kt} + \quad (4.22) \\
& + \left(\frac{m_1 k^2 \lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{N(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp} \lambda^2}{N(k^2 + \lambda^2)} \right) \cos \lambda t - \frac{m_1 V_{10Z} k^2 \lambda}{N(k^2 + \lambda^2)} \sin \lambda t + \frac{F_{mp}}{N},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x(t) = & \left(-\frac{\lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp} \lambda^2}{2m_1 k^2 (k^2 + \lambda^2)} + \frac{V_{10Z} \lambda^2}{2k(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp}}{2m_1 k^2} \right) e^{kt} + \\
& + \left(-\frac{\lambda^2 (\Delta_k - 0,5L)}{2(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp} \lambda^2}{2m_1 k^2 (k^2 + \lambda^2)} - \frac{V_{10Z} \lambda^2}{2k(k^2 + \lambda^2)} - \frac{F_{mp}}{2m_1 k^2} \right) e^{-kt} + \quad (4.23) \\
& + \left(-\frac{k^2 (\Delta_k - 0,5L)}{(k^2 + \lambda^2)} + \frac{F_{mp}}{m_1 (k^2 + \lambda^2)} \right) \cos \lambda t + \frac{V_{10Z} k^2}{\lambda (k^2 + \lambda^2)} \sin \lambda t + \Delta_k - 0,5L.
\end{aligned}$$

Рух центру мас кулі відносно осі ординат змінюється відповідно до закону

$$y(t) = 0,5b(1 - \cos \varphi) + (0,5L - \Delta_k + \Delta l) \sin \varphi,$$

яке для малих кутів повороту можна представити у вигляді

$$y(t) = (0,5L - \Delta_k + x - 0,5b\varphi) \varphi. \quad (4.24)$$

Запишемо закон руху точки B відносно осі Ox . В початковий момент часу її координата $x_B(0) = -0,5L$, а в довільний момент часу

$$x_B(t) = -0,5L + x(t) - 0,5b\varphi(t). \quad (4.25)$$

Куля вилітає із захисної конструкції, якщо

$$x_B(t_k) = -0,5L + \Delta_k. \quad (4.26)$$

Враховуючи (4.25) умова (4.26) набуде вигляду

$$\begin{aligned} -0,5L + \Delta_k &= -0,5L + x(t_k) - 0,5b\varphi(t_k) \text{ або} \\ x(t_k) &= \Delta_k + 0,5b\varphi(t_k). \end{aligned} \quad (4.27)$$

Отже, в момент часу t_k , коли виконується умова (4.27), куля вилітає з металевої пластини.

Після вильоту кулі з металевої пластини, вона здійснює плоский рух і координати її центр мас та кут обертання змінюються відповідно

$$\begin{aligned} x(t) &= \dot{x}(t_k)(t - t_k) + x(t_k), \\ y(t) &= \dot{y}(t_k)(t - t_k) + y(t_k), \\ \varphi(t) &= \dot{\varphi}(t_k)(t - t_k) + \varphi(t_k). \end{aligned} \quad (4.28)$$

Примітка. Співвідношення 4.28 мають місце у випадку незаповненого міжшарового простору.

Таким чином внаслідок пробиття кулею першого шару куля отримує кутову швидкість $\dot{\varphi}(t_k)$, а саме цей параметр є визначальним для оцінки кулестійкості захисної конструкції.

У таблицях 4.2-4.4 наведені значення швидкості нутації ЕУ в момент його вильоту з металевої пластини при різних швидкостях його та кутах зустрічі.

Таблиця 4.2.

при $V_{10Z} = 500 \text{ м/с}$ і $\alpha = 60^{\circ}$.

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

Таблиця 4.3.

при $V_{10Z} = 700 \text{ м/с}$ і $\alpha = 60^{\circ}$.

| | $F_{mp} = 5\text{Н}$ | $F_{mp} = 50\text{Н}$ | $F_{mp} = 500\text{Н}$ | $F_{mp} = 5000\text{Н}$ |
|-------------------|--|--|--|---|
| $N = 0,1\text{Н}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 0,14 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 1,37 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 13,6 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 136 \text{ с}^{-1}$ |
| $N = 1\text{Н}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 0,23 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 1,46 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 13,7 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 137 \text{ с}^{-1}$ |
| $N = 10\text{Н}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 1,13 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 2,36 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 14,6 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 137 \text{ с}^{-1}$ |
| $N = 100\text{Н}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 10,1 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 11,3 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 23,5 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 146 \text{ с}^{-1}$ |

Таблиця 4.4.

при $V_{10Z} = 700 \text{ м/с}$ і $\alpha = 45^{\circ}$.

| | $F_{mp} = 5\text{Н}$ | $F_{mp} = 50\text{Н}$ | $F_{mp} = 500\text{Н}$ | $F_{mp} = 5000\text{Н}$ |
|-------------------|--|--|--|---|
| $N = 0,1\text{Н}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 0,25 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 2,37 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 23,5 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 236 \text{ с}^{-1}$ |
| $N = 1\text{Н}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 0,39 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 2,50 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 23,7 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 237 \text{ с}^{-1}$ |
| $N = 10\text{Н}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 1,76 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 3,87 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 25,1 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 238 \text{ с}^{-1}$ |
| $N = 100\text{Н}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 15,5 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 17,6 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 38,7 \text{ с}^{-1}$ | $\dot{\varphi}(t_k) = 252 \text{ с}^{-1}$ |

Аналізуючи результати всіх обчислень, частина яких вказані в таблицях 4.2 – 4.4, можна стверджувати:

- на завершальному етапі (виліт кулі з захисної броні) величина її швидкості V майже не змінюється, тобто $V(t_k) \approx V_{10Z}$;
- чим більша сила тертя між кулею та металевою пластиною тим швидкість нутації кулі $\dot{\varphi}(t_k)$, в момент вильоту із захисної броні, буде більша;
- чим більший кут α між напрямком швидкості кулі та дотичною проведеною до поверхні металевої пластини, тим швидкість нутації кулі $\dot{\varphi}(t_k)$ буде менша;
- чим менша величина швидкості кулі V , в момент її вильоту з металевої пластини, тим кутова швидкість нутації кулі $\dot{\varphi}(t_k)$ буде більша.

Куля, після її вильоту з тіла, здійснює плоский рух і тому відповідно до залежностей (4.28) можна підрахувати величину кута нутації на який вона повернеться пройшовши певний шлях до наступної пластини.

Зокрема, при: а) кутовій швидкості нутації $\dot{\varphi}(t_k) = 252c^{-1}$ (див. табл. 4.2-4.4), б) віддалі між пластинами $d = 0,5m$, в) швидкості кулі $V_{10Z} = 700 \frac{m}{c}$, г) куті між напрямком швидкості кулі та дотичною проведеною до поверхні металевої пластини $\alpha = 45^0$ – величина кута нутації кулі рівна

$$\varphi_{kz} = \frac{\omega(t_k)d}{V_0 \sin \alpha} = \frac{252 \cdot 0,5}{700 \cdot \sin 45^0} = 0,25 \text{ рад.} = 14^0.$$

4.4. Вплив кутової швидкості нутації елемента ураження на його пробивну здатність

Метою цього підрозділу є отримати достатню умову удару кулі боковою поверхнею об другу пластину, щоб суттєво зменшити пробивну здатність кулі. Динаміку кулі на цьому етапі визначають сили взаємодії кулі та другої пластини. Тому, вважається, що у випадку пробивання ЕУ передньої захисної пластини він, маючи лінійну швидкість центру мас \vec{V}_0 , рухається в подальшому з кутовою

швидкістю нутації $\dot{\varphi}(t_k)=\dot{\varphi}_{kz}$ (див. п. 4.3). Оскільки між передньою захисною пластиною і наступною є певна віддаль d , то в момент торкання ЕУ поверхні наступної пластини напрям швидкості його центру мас відхилиться від осі симетрії на величину $\varphi(t_k)=\varphi_{kz}$. Вважається, що швидкість центру мас ЕУ \vec{V}_0 утворює кут α з поверхнею другої пластини в момент його дотику. Моделюємо ЕУ прямокутним паралелепіпедом з вершиною у вигляді зрізаної піраміди. Верхньою основою якої є квадрат розміром $b \times b$. Вважаємо, що довжина ЕУ - L .

Початкову стадію контакту ЕУ з поверхнею пластини зображено на рис. 4.3.

Деформування зазнає тільки ЕУ і він відносно поверхні перешкоди не ковзає. Для опису цього процесу вибираємо систему координат $A\xi\eta$ як вказано на рис. 4.5.

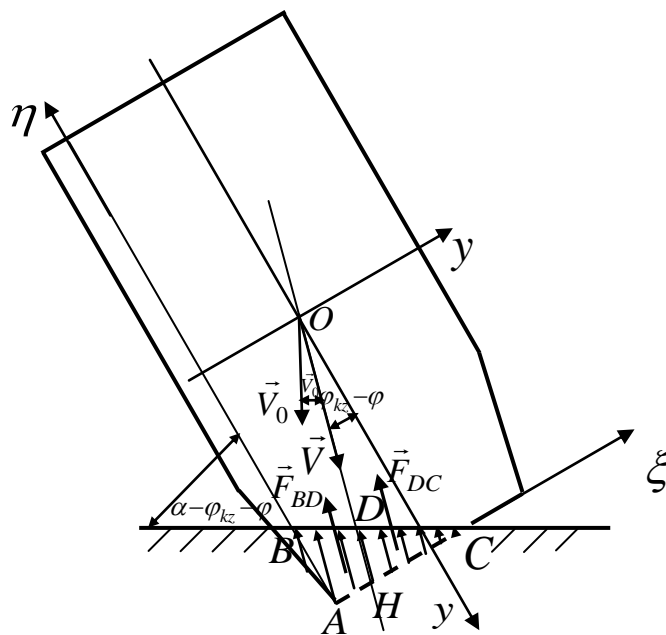


Рис. 4.5. Схема контакту ЕУ з поверхнею металевої пластини при наявності його кутової швидкості нутації

Переміщення ЕУ і його обертання будемо характеризувати параметром $AB=\eta_B$.

Рівняння прямої OH , яка проходить через центр мас ЕУ O і співпадає з векторним зображенням його швидкості \vec{V} , матиме вигляд

$$\eta = \xi \cdot \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) + 0,5L - 0,5b \cdot \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi), \quad (4.29)$$

де φ_{kz} – величина кута обертання ЕУ, на яке він обернувся після вильоту із передньої пластини аж до початку контакту з тиловою.

Пряма OH перетинає вісь $O\xi$ в точці H з координатами

$$\xi_H = 0,5b - 0,5L \operatorname{tg}(\varphi_{kz} - \varphi) \text{ і } \eta_H = 0. \quad (4.30)$$

Рівняння прямої BC матиме вигляд

$$\eta = -\xi \cdot \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi) + \eta_B. \quad (4.31)$$

Вона перетинає вісь $O\xi$ в точці C з координатами

$$\xi_C = \eta_B \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi) \text{ і } \eta_C = 0. \quad (4.32)$$

Координати точки D , яка є точкою перетину прямих OH і BC , наступні

$$\xi_D = \frac{\eta_B + 0,5b \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) - 0,5L}{\operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) + \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi)} \quad (4.33)$$

і

$$\eta_D = \frac{\eta_B \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) - 0,5b \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi) + 0,5L \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi)}{\operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) + \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi)}.$$

Вважається, що сила пружності, яка виникає внаслідок деформування ЕУ, описується залежністю $F_{np} = c \cdot \Delta l$, де c – коефіцієнт пружності матеріалу ЕУ, Δl – величина деформації [79, 93, 94]. Сумарна величина дії розподіленої сили пружності \vec{F}_{DC} , яка діє на відрізок DC , дорівнює

$$F_{DC} = c \cdot \frac{\eta_B \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) - 0,5b \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi) + 0,5L \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi)}{\operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) + \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi)} \times \\ \times \eta_B \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi) - 0,5b + 0,5L \operatorname{tg}(\varphi_{kz} - \varphi). \quad (4.34)$$

Її лінія дії віддалена від прямої OH на величину

$$d_{DC} = \frac{1}{3} |0,5L \sin(\varphi_{kz} - \varphi) - 0,5b \cos(\varphi_{kz} - \varphi) + \eta_B \cos(\varphi_{kz} - \varphi) \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi)|. \quad (4.35)$$

Момент сили \vec{F}_{DC} відносно центру мас ЕУ дорівнює

$$M_O(\vec{F}_{DC}) = F_{DC} \cdot d_{DC}. \quad (4.36)$$

Рівнодійна від розподіленого навантаження сил пружності, яке діє на відрізьку BD , дорівнює

$$F_{BD} = F_{ABH} + F_{BHD}, \quad (4.37)$$

де $F_{ABH} = 0,25c\eta_B(b - L \operatorname{tg}(\varphi_{kz} - \varphi))$,

$$\begin{aligned} F_{BHD} = & \frac{c}{2}(0,5(b - L \operatorname{tg}(\varphi_{kz} - \varphi))(\eta_B \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) - 0,5b \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi) + \\ & + 0,5L \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi)) + \eta_B(\eta_B - 0,5b \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi) + \\ & + 0,5L \operatorname{tg}(\varphi_{kz} - \varphi) \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi))(\operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) + \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi))^{-1}. \end{aligned}$$

Момент сили \vec{F}_{BD} відносно центру мас ЕУ дорівнює

$$\begin{aligned} M_O(\vec{F}_{BD}) = & -F_{ABH} |(L - \eta_B) \sin(\varphi_{kz} - \varphi) - b \cos(\varphi_{kz} - \varphi)| - \\ & -F_{BHD} |(\xi_3 - 0,5b) \cos(\varphi_{kz} - \varphi) - (\eta_3 - 0,5L) \sin(\varphi_{kz} - \varphi)|, \end{aligned} \quad (4.38)$$

де

$$\begin{aligned} \xi_3 = & \frac{b \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) + 0,5b \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi) - L - 0,5L \operatorname{tg}(\varphi_{kz} - \varphi) \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi) + \eta_B}{3(\operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) + \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi))}, \\ \eta_3 = & \frac{2\eta_B \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) + (\eta_B + 0,5L) \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi) - 0,5b \operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi)}{3(\operatorname{ctg}(\varphi_{kz} - \varphi) + \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi_{kz} - \varphi))}. \end{aligned}$$

Елемент ураження, після початкового контакту з поверхнею другої пластини, здійснює плоский рух, тому диференціальні рівняння, які описують його рух матимуть вигляд

$$m\ddot{x} = -(F_{DC} + F_{BD}) \cos(\varphi_{kz} - \varphi);$$

$$I_o \ddot{\varphi} = M_O(\vec{F}_{DC}) + M_O(\vec{F}_{BD}).$$

Отримати аналітичний і числовий розв'язок цієї системи диференціальних рівнянь при початкових умовах

$$x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = V_{0z} \cos \varphi_{kz}, \quad \varphi(0) = 0 \quad \text{і} \quad \dot{\varphi}(0) = \dot{\varphi}_{kz}$$

доволі проблематично.

Оскільки, досліджується вплив кутової швидкості нутації ЕУ на його пробивну здатність, бажаним є те, щоб величина кута нутації зростала. З фізичних міркувань (для випадку вказаного на рис. 4.3) впливає, що ЕУ повинен

обертатись проти руху стрілки годинника, тому необхідно, щоб сумарний момент $M_O(\vec{F}_{DC})+M_O(\vec{F}_{BD})$, від розподіленого навантаження сил пружності був не від'ємним. Значення сумарного моменту сил пружності відносно центру мас ЕУ і при різних значеннях кута α та $L=0,323\text{м}$, $b=0,0016\text{м}$, $c=36\cdot 10^7 \text{ Н/м}$, представлені в таблицях 4.5-4.7

Таблиця 4.5.

Значення сумарного моменту сил пружності при $\alpha=45^0$

| | $\eta_B = 0,0001\text{м}$ | $\eta_B = 0,001\text{м}$ |
|----------------------------|--|--|
| $\varphi_{kz}, \text{рад}$ | $M_O(\vec{F}_{DC})+M_O(\vec{F}_{BD}), \text{НМ}$ | $M_O(\vec{F}_{DC})+M_O(\vec{F}_{BD}), \text{НМ}$ |
| 0,01 | $-1,069 \cdot 10^{-3}$ | -0,0563 |
| 0,015 | $-9,185 \cdot 10^{-4}$ | -0,042 |
| 0,02 | $-7,705 \cdot 10^{-4}$ | -0,028 |
| 0,025 | $-6,252 \cdot 10^{-4}$ | -0,015 |
| 0,03 | $-4,828 \cdot 10^{-4}$ | $-1,94 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,035 | $-3,432 \cdot 10^{-4}$ | 0,011 |
| 0,04 | $-2,062 \cdot 10^{-4}$ | 0,023 |
| 0,045 | $-7,197 \cdot 10^{-5}$ | 0,036 |
| b/L | $4,751 \cdot 10^{-5}$ | 0,047 |
| 0,05 | $5,963 \cdot 10^{-5}$ | 0,048 |

Таблиця 4.6.

Значення сумарного моменту сил пружності при $\alpha=60^0$

| | $\eta_B = 0,0001\text{м}$ | $\eta_B = 0,001\text{м}$ |
|----------------------------|--|--|
| $\varphi_{kz}, \text{рад}$ | $M_O(\vec{F}_{DC})+M_O(\vec{F}_{BD}), \hat{u}$ | $M_O(\vec{F}_{DC})+M_O(\vec{F}_{BD}), \hat{u}$ |
| 1 | 2 | 3 |
| 0,01 | $-1,774 \cdot 10^{-3}$ | -0,024 |
| 0,015 | $-1,513 \cdot 10^{-3}$ | $-1,469 \cdot 10^{-3}$ |
| 0,02 | $-1,258 \cdot 10^{-3}$ | 0,02 |
| 0,025 | $-1,008 \cdot 10^{-3}$ | 0,041 |
| 0,03 | $-7,639 \cdot 10^{-4}$ | 0,062 |
| 0,035 | $-5,249 \cdot 10^{-4}$ | 0,083 |

| 1 | 2 | 3 |
|-------|------------------------|-------|
| 0,04 | $-2,919 \cdot 10^{-4}$ | 0,103 |
| 0,045 | $-6,218 \cdot 10^{-5}$ | 0,122 |
| b/L | $1,411 \cdot 10^{-4}$ | 0,139 |
| 0,05 | $1,617 \cdot 10^{-4}$ | 0,141 |

Таблиця 4.7

Значення сумарного моменту сил пружності при $\alpha = 75^{\circ}$,

| | $\eta_B = 0,0001m$ | $\eta_B = 0,001m$ |
|----------------------------|--|--|
| $\varphi_{kz}, \text{рад}$ | $M_O(\vec{F}_{DC}) + M_O(\vec{F}_{BD}), \hat{u}$ | $M_O(\vec{F}_{DC}) + M_O(\vec{F}_{BD}), \hat{u}$ |
| 0,010 | $-3,353 \cdot 10^{-3}$ | 0,358 |
| 0,015 | $-2,793 \cdot 10^{-3}$ | 0,387 |
| 0,020 | $-2,253 \cdot 10^{-3}$ | 0,415 |
| 0,025 | $-1,733 \cdot 10^{-3}$ | 0,443 |
| 0,03 | $-1,230 \cdot 10^{-3}$ | 0,470 |
| 0,035 | $-7,452 \cdot 10^{-4}$ | 0,496 |
| 0,04 | $-2,768 \cdot 10^{-4}$ | 0,522 |
| 0,045 | $1,757 \cdot 10^{-4}$ | 0,547 |
| b/L | $5,731 \cdot 10^{-4}$ | 0,570 |
| 0,05 | $6,131 \cdot 10^{-4}$ | 0,572 |

Таким чином, якщо під час переміщення ЕУ, від передньої захисної пластини до другої, обернеться на величину $\varphi_{kz} \geq \frac{b}{L}$, то під час його контакту з другою пластиною буде збільшуватись кут нутації, а це зменшує пробивну здатність ЕУ.

Зокрема визначимо мінімальну віддаль між передньою і тиловою пластинами якщо: $V_0 = 500 \text{ м/с}$, $b = 0,0016 \text{ м}$, $L = 0,0323 \text{ м}$, $\alpha = 70^{\circ}$, $\dot{\varphi}_{kz} = 100 \text{ с}^{-1}$. Для цього використаємо залежність $d = \frac{bV_0 \sin \alpha}{L \dot{\varphi}_{kz}}$. Підставляючи значення величин отримаємо

$$d = \frac{0,0016 \cdot 500 \cdot \sin 60^{\circ}}{0,0323 \cdot 50} = 0,233 \text{ м}$$

4.5. Діаграма зони рикошету і зон застрягання та пробивання елементом ураження

У цьому підрозділі досліджується вплив координат вогневої точки на пробивну здатність ЕУ. З попередніх підрозділів відомо, що за певних кутів між вектором швидкості ЕУ і дотичною площиною до поверхні конструкції захисту у точці їх взаємодії, можливі випадки: проникнення ЕУ у елемент захисної конструкції, її пробиття ЕУ і рикошет останнього. Маючи інформацію про джерело вогневого ураження (його розташування, типаж та інше) на основі отриманих результатів можна розмістити захисну конструкцію таким чином, щоб мінімізувати динамічну дію ЕУ на елемент захисної конструкції, тобто досягнути рикошету ЕУ.

Для вирішення поставленої задачі необхідно розглянути задачу зовнішньої балістики, тобто рух ЕУ в просторі на ділянці від вогневої точки до захисної конструкції. Отримані співвідношення (2.8) і (2.9) розділу 2, а також результати розділу 3 (див. залежності 3.12 і 3.15) дозволяють визначити середню величину нормальної реакції F_{2n} поверхні перешкоди

$$F_{2n} = \frac{m_1(1+k)V(t_k)\sin\alpha}{t_{mp}}, \quad (4.39)$$

де k – коефіцієнт відновлення для ЕУ та матеріалу поверхні перешкоди, α – кут між напрямком швидкості ЕУ, в момент його торкання поверхні перешкоди, та дотичною проведеною до поверхні перешкоди в точці контакту тіла та поверхні, t_{mp} – тривалість контакту з перешкодою.

З іншого боку, умова рикошету $F_{2n} \leq R_{on}$ дозволяє отримати співвідношення

$$\frac{m_1(1+k)V(t_k)\sin\alpha}{t_{mp}} \leq R_{on}. \quad (4.40)$$

Ця нерівність є базовою для визначення максимального кута α_{\max} , при якому ЕУ відбивається від перешкоди (має місце явище рикошету)

$$\sin \alpha_{\max} \leq \frac{R_{on} t_{mp}}{m_1(1+k)V(t_k)}. \quad (4.41)$$

Куля випущена з СВД і маючи швидкість 500 м/с , в момент дотику до перешкоди (виготовленої з матеріалу Сталь «44»), застрягає в ній пройшовши шлях $d = 2,65 \text{ мм}$ [71, 120]. Використовуючи вказаний результат на базі теореми про зміну кінетичної енергії можна визначити середнє значення сили опору цього

$$\text{матеріалу } R_{on} = \frac{m_1 V^2}{2d} \text{ і вона - } R_{on} = \frac{0,0096 \text{ кг} \cdot (500 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 0,00265 \text{ мм}} = 452830 \text{ Н}.$$

Якщо захисна конструкція виготовлена з Сталі «44» та товщиною $d = 2,65 \text{ мм}$, то у таблиці 4.8 наведені залежності величин віддалі від вогневої точки до неї, швидкості кулі в момент її дотику до поверхні захисної конструкції та максимального кута при якому має місце рикошет для кулі калібру 7,62 мм, та параметрами $m_1 = 0,0096 \text{ кг}$, $V_{10} = 830 \text{ м/с}$, $\gamma_1 = -0,247$, $\beta_1 = -0,005$ $c = 0,9$, $k = 0,3$, $t_{mp} = 0,00001 \text{ с}$, $s = \pi \cdot 0,00381^2 \text{ м}^2$ випущеної із СВД.

Таблиця 4.8

Значення величин часу t лету кулі, віддалі l , швидкості V та максимального кута α_{\max} при якому відбувається рикошет

| | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| $t, \text{с}$ | 0 | 0,128 | 0,269 | 0,426 | 0,60 | 0,79 | 1,01 | 1,26 | 1,38 | 1,54 |
| $l, \text{м}$ | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 745 | 800 |
| $V, \text{м/с}$ | 830 | 745 | 675 | 608 | 545 | 486 | 432 | 384 | 363 | 343 |
| α_{\max} | 26^0 | 29^0 | 32^0 | 37^0 | 42^0 | 48^0 | 57^0 | 71^0 | 90^0 | <i>рикошет</i> |

Якщо куля (Б-32) калібру 7,62 мм, масою $m_1 = 0,0079 \text{ кг}$ випущена з АКМ в металеву броню товщиною 2,65 мм виготовленої з Сталь «44» [70], та параметрах $V = 715 \text{ м/с}$, $s = \pi \cdot 0,00381^2 \text{ м}^2$, $k = 0,3$, $t_{mp} = 0,00001 \text{ с}$, $c = 0,9$, $\gamma_1 = -0,2285$, $\beta_1 = -0,001$ то явище рикошету відбудеться при наступних значеннях

Таблиця 4.9

Значення величин часу t лету кулі, віддалі l , швидкості V та максимального кута α_{\max} при якому відбувається рикошет.

| | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| t, c | 0 | 0,1502 | 0,3235 | 0,5245 | 0,5899 | 0,7589 |
| l, m | 0 | 100 | 200 | 300 | 329 | 400 |
| $V, m/c$ | 715 | 623 | 537 | 459 | 441 | 391 |
| α_{\max} | 38^0 | 45^0 | 55^0 | 74^0 | 90^0 | <i>рикошет</i> |

На рис. 4.6 представлена діаграма зон проникнення і пробивання та рикошету. Для кулі випущеної з СВД ($V_{10} = 830 \cdot m/c$, $m_1 = 0,0096$ кг) зона рикошету міститься за межами області заштрихованої нахиленими прямими; для кулі випущеної з АКМ (калібру 7,62 мм, $m_1 = 0,0079$ кг, $V_{10} = 715 \cdot m/c$) – заштрихованої горизонтальними і нахиленими прямими.

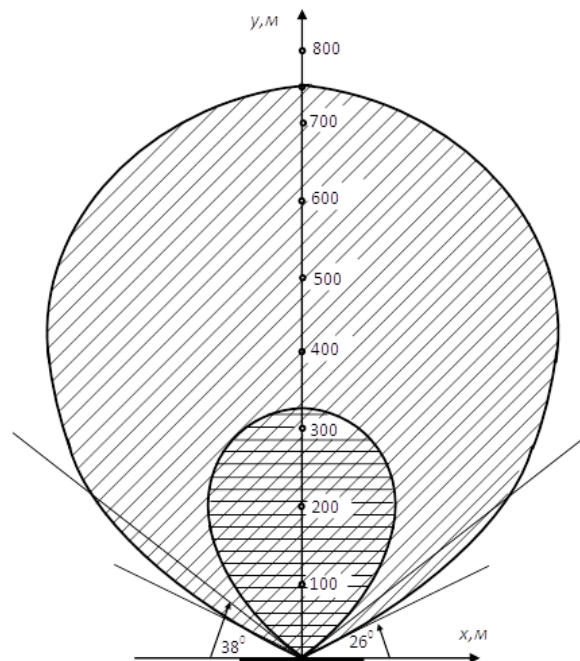


Рис. 4.6. Діаграми зони рикошету та зон застрягання і пробивання металевої броні товщиною 2,65 мм виготовленої з Сталь "44"

4.6. Висновки до четвертого розділу

Встановлено, що:

1. Наявність пружного проміжного шару захисної конструкції дозволяє зменшити величину сили удару на об'єкт захисту. Якщо пружні властивості проміжного шару описуються залежністю $F_{\text{пружності}} = c(\Delta x)^\gamma$, то сила удару приймає мінімальне значення при $\gamma < 1$.

2. Чим більша сила тертя між кулею та металеву броню на етапі вильоту кулі із захисної броні, тим її кутова швидкість нутації $\dot{\phi}(t_k)$, в момент вильоту із захисної броні, буде більша.

3. Для більших значень кута α між напрямком швидкості кулі, на етапі вильоту із захисної броні, та дотичною проведеною до поверхні металевої броні, тим кутова швидкість нутації $\dot{\phi}(t_k)$ буде менша.

4. Для менших значень величини швидкості кулі в момент її вильоту з металевої броні кутова швидкість нутації кулі буде більша, що сприяє підвищенню захищеності об'єкту захисту.

5. Чим більша кутова швидкість нутації ЕУ між передньою і тиловою пластинами, тим віддаль між ними може бути меншою і куле стійкість захисної конструкції не погіршиться.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язане науково-технічне завдання, суть якого полягає у розробці методики оцінки дії елементу 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 елементу ураження стрілецької зброї, осколків 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 елементу ураження з перешкодою, встановлено, що існуючі захисні конструкції для бойових машин базуються на поглинанні кінетичної енергії елементу ураження. Однак вони не повністю забезпечують успішне виконання поставлених завдань у зв'язку з мобільністю бойових дій та з нарощенням пробивної здатності елементу ураження.

2. Здійснено комплексне дослідження взаємодії елементу 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 елементу 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 елементу 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 двохарової захисної конструкції наявність тилового шару з регресивно пружною характеристикою дозволяє зменшити силові 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексенцева С.Е. Ударно-волновые процессы взаимодействия высокоскоростных элементов с конденсированными средами / С.Е. Алексенцева // Диссертация. – РФ: «СГТУ» 2015. –173 с.
2. Ардюков Г.С. Взаимодействие кумулятивной струи с некоторыми защитными элементами / Г.С. Ардюков, А.И. Валишев // Инф. бюллетень ИГ СО АН СССР, ВУЗ № 14. – Новосибирск. – 1981.
3. Ардюков Г.С. О схемах динамической защиты / Г.С. Ардюков, А.И. Валишев, В.И. Лаптев, Ю.А. Тришин // Взрыв, удар, защита. Инф. бюллетень Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО АН СССР. – 1985. – Вып. 16. – С. 23 – 29.
4. Баранников Я.Н. Разработка связующего модуля для расчета процессов взрыва при помощи пре-постпроцессора ANSYS и решателя LS-DYNA/ Я.Н. Баранников, Н.А. Ткачук, А. В. Литвиненко // Весник НТУ "ХПИ". Тем. вип.: Машинознавство и САПР. – 2006.– № 3. – С. 3 – 9.
5. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах: Учеб. Пособие для вузов. В 3-х т. Т.2. Динамика. – 8-е изд., перераб. / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 640 с.
6. Баум Ф.А. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович, В.П. Челышев, Б.И. Шехтер. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
7. Белов А.В. Разрушение цилиндрического поражающего элемента при ударе по тонкому экрану / А.В. Белов и др. // Сборн. матер. симп. «Исследование высокоскоростного соударения». – Томск, 1975. – вып. II. – С. 35 –41.
8. Беляев Н.М. Соппротивление материалов. / Н.М. Беляев // – М.: Наука, 1976. – 608 с.
9. Беспалов С. Защищенность боевых колесных машин / С. Беспалов, О. Гапоненко, А. Кулешов // Техника и вооружение. – 1994. – № 1-2. – 36 с.

10. Білик А.С. Оптимальний вибір конструкцій з дискретно змінною схемою навантаження / А.С. Білик // Зб. наук. пр. Укр. Інст. стал. констр. ім. В.М. Шимановського. – 2014 р. – Вип. 14. – С. 70-78.
11. Бісик С.П. Концепція побудови бойових броньованих машин з підвищеним рівнем протимінного захисту / С.П. Бісик // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ. Збірник тез 14-15 травня 2015 р. – Львів: НАСВ. – С. 15–16.
12. Богомолова А.И. Приближённое определение глубины проникания длинных стержней / А.И. Богомолова и др. // Сбор. матер. симп. «Исследование высокоскоростного соударения». – Томск, 1975. – Вып. I. – С. 56-59.
13. Боевое применение вооружения и военной техники в горно-пустынной местности Афганистана. – М.: Воениздат 1990. – 231 с.
14. Бодров С.А. Оценка воздействия боеприпаса динамической защиты на легкобронированную ВГМ / С.А. Бодров, С.В. Королев // Вестник бронетанковой техники. – 1991. – № 4. – С. 28 – 30.
15. Болтунов М. Боевой опыт Чеченской войны / М. Болтунов. – М.: Яуза, Эксмо, 2008. – 320 с.
16. Бондаренко С.В. Аналіз існуючих та перспективних методів визначення сили опору повітря руху снарядів / В.І. Грабчак, С.В. Бондаренко // Військово-технічний збірник. – Львів: АСВ. – 2013. – Вип. 2 (9). – С. 13-19.
17. Бруль С.Т. К вопросу моделирования реакции корпусов легкобронированных машин на действие ударно- импульсных нагрузок / С.Т. Бруль // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Серія : Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 43 (1016). – С. 46-50.
18. Буланцев Г.М. Рикошет цилиндрических модельных снарядов от преград / Г.М. Буланцев, А.И. Корнеев, А.П. Николаев // Оборонная техника. – 1986. – №8. – С. 23-25.
19. Бусяк Ю.М. Повышение защищенности танков за счёт применения модульных защитных устройств при проведении модернизации / Ю.М. Бусяк,

М.И. Васьковский, Ю.Г. Горожанин, В.В. Дураченко, Н.К. Куров, Ю.И. Таран, И.Б. Чепков // *Механіка та машинобудування*. – 2004. – №1. – С. 106-116.

20. Василенко В.В. Вогнева підготовка: [Навч. посібник (з метод. рек.)] В.В. Василенко, В.М. Дзюба, О.Ю. Окунський, Б.І. Пилипів, за ред. Пилипіва Б.І., - К.: Вид. Паливода А.В., 2003. – 272 с.

21. Васильев А.Ю. Численное моделирование реакции бронекорпусов легкобронированных машин на действие ударно-волновой загрузки / А.Ю. Васильев // *Механіка та машинобудування*. – ХП.: – Харків, 2010. – №2. – С. 73-97.

22. 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.

23. 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. – 529 с.

24. 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.

25. Войцеховский Б.В. Динамическая антикумулятивная защита / Б.В. Войцеховский, В.Л. Истомин // *Физика горения и взрыва*. – 2000. – Т. 36, №6. – С. 87 – 90.

26. Галушко С. Военная техника для миротворческих операций / С. Галушко // *Defenseexpress*. – 2003. – №12(25). – С. 18-24.

27. Герасимов А.В. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под ред. А.В. Герасимова. – Томск: Изд-во Том.ун-та, 2007. – 572 с.
28. Глазырин В.П. Деформирование и разрушение неоднородных материалов и конструкций при ударе и взрыве: автореф. дис. на соиск. науч. степени док. физ.-мат. наук: спец. 01.02.04 «механика деформируемого твердого тела» / В.П. Глазырин. – Томск, 2008. – 54 с.
29. Новосад І. Я. Технологічне забезпечення виготовлення секцій робочих органів гнучких гвинтових конвеєрів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І. Я. Новосад. – Тернопіль, 2007. – 20 с.
30. Голуб В.А. Балістичний та протимінний захист бойових колісних машин. Методологічні основи побудови: Монографія / В.А. Голуб. – Л.: АСВ, 2014. – 224 с.
31. Гольдсмит В. Удар / В. Гольдсмит. – М.: Стройиздат, 1965. – 446 с.
32. Гродненский Н.Н. Неоконченная война: История вооруженного конфликта в Чечне / Н.Н. Гродненский. – Мінськ: Харвест, 2004. – 672 с.
33. Гребенник А.Н. Анализ использования и поражения автомобилей многоцелевого назначения / А.Н. Гребенник // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – №1.– С. 36 – 40.
34. Григорян В.А. Частные вопросы конечной баллистики / Под.ред. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 592 с.
35. Григорян В.А. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков – М.: Изд. РадиоСофт. 2008. – 406 с.
36. Гриднева В.А. Численный метод расчёта взаимодействия поражающего элемента произвольной формы с преградой конечной толщины / В.А. Гриднева, Г.П. Михайлов // Материалы XV-ой научной конференции Томского университета по математике и механике. – Томск, 1975. – Т.1. – С.128-130.

37. Гриднёва В.А. Прогнозирование численным методом результатов взаимодействия поражающих элементов с преградами / В.А. Гриднёва и др. // Материалы XV-ой научной конференции Томского университета по математике и механике. – Томск, 1975. – Т.1. – С. 110-112.
38. Гудименко Ф.С. Збірник задач з диференціальних рівнянь / Ф.С. Гудименко, І.А. Павлюк, В.О. Волкова. – Київ: Видавництво “Вища школа”, 1972. – 154 с.
39. Долганина Н.Ю. Связь динамической прочности арамидных тканей с искривлением нитей в них / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников // Наука и Технологии. Труды XXV Российской школы и XXXV Уральского семинара, посвященных 60-летию Победы. – М.: 2005. – С. 103-110.
40. Дяченко С.С. Матеріалознавство. [Підручник] / С.С.Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян, Е.І. Плешаков. – Харків: ХНАДУ, 2007. – 440 с.
41. Игнатова А.М. Анализ фрагментации синтетических минеральных сплавов при высокоскоростном ударе методом визуализации // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – №3. – С. 63-73.
42. Івасишен С.Д. Диференціальні рівняння: методи та застосування. [Навч. Посібник] / С.Д. Івасишен, В.П. Лавренчук, П.П. Настасієв, І.І. Дрінь. – Чернівці, Чернівецький нац. ун–т, 2010. – 288 с.
43. Івасюк М.О. Організація виконання завдань частинами і підрозділами інженерних військ Збройних Сил України. Частина II. Інженерне забезпечення бойових дій: Навчальний посібник / [М.О. Івасюк, Ю.О. Фтемов, В.А. Мілютін та ін.]. – Львів: НАСВ, 2015. – 490 с.
44. Иоффе А.Ф. Экспериментальные данные и соображения к вопросу о конструктивной броне / А.Ф. Иоффе – М.: Минтрансаш СССР, 1946. – 208 с.
45. Інформаційно-аналітичні матеріали: Експлуатація бронетанкового озброєння та військової техніки в умовах спекотного пустельного клімату Республіки Ірак. – К.: ННДЦ ОТ і ВБ України, 2005. – 400 с.

46. Эйгельбергер П. Высокоскоростной удар в физике быстропротекающих процессов / П. Эйгельбергер, Э. Каймаке. – М.: Мир, 1971. – Т. 2. – 452 с.
47. Эйгельбергер П. Физические особенности разрушения преград конечной толщины при высокоскоростном пробитии их различными ударниками / П. Эйгельбергер, Э. Каймаке // – Вестник ТГУ. – 2013. – Т.18, вып.4. – 269 с.
48. Закусило П.С. Удосконалення методу обґрунтування календарного строку служби зразка озброєння та військової техніки / П.С. Закусило // Збірник наукових праць. – К.: ЦНДІ ЗСУ, 2016. – №1 (75). – 344 с.
49. Зукас Дж.А. Динамика удара: / Дж.А. Зукас, Т. Николас, Х.Ф. Свифт и др. – М.: Мир, 1985. – 296 с.
50. Захаров В.В. Инженерное рассмотрение теории бронебаллистики / В.В. Захаров, С.А. Хореев // Сборник материалов симпозиума «Исследование высокоскоростного соударения». – Томск, 1975. – вып. I. – С. 46-48.
51. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке // – М.: Наука, 1971. – 576 с.
52. Кирющенко Е.В. Влияние толщины пластины на эффективность динамической защиты / Е.В. Кирющенко, Н.А. Каштанов, Д.А. Рототаев, В.А. Григорян // Вестник бронетанковой техники. – 1991. – № 11. – С. 22 – 26.
53. Королев С.В. Оценка энергетических соотношений процесса взаимодействия кумулятивной струи с динамической защиты / С.В. Королев, М.И. Маресев, Д.А. Рототаев // Боеприпасы. – 1988. – № 1. – С. 36 – 39.
54. Костюк В.В. Підвищення рівня захищеності автомобілів багатоцільового призначення локальним бронюванням / В.В. Костюк, П.О. Русіло, В.П. Белена // Військово-технічний збірник. – 2012. – №2(5). – С. 17–22.
55. Кравченко В. О концепции современной БМП / В. Кравченко // Техника и вооружение. – 2002. – №4. – С. 26-29.
56. Краснов М.Л. Сборник задач по обыкновенным дифференциальным уравнениям / М.Л. Краснов и др. // – М.: Высш. школа, 1978. – 287 с.

57. Кривошея С.А. Диференціальні та інтегральні рівняння / С.А. Кривошея, М.О. Перестюк, В.М. Бурим – Київ.: Либідь, 2004. – 408 с.
58. Крыжний А.В. Особенности применения боевых машин легкой категории веса в современных вооруженных конфликтах / А.В. Крыжний, В.М. Зиркевич // Наука и оборона. – 2005. – №3. – С. 45-47.
59. Кунву Ли Основы САПР САД/САМ/САЕ / Кунву Ли // – С.-П.: Питер, 2004. – 560 с.
60. Кучинский А.В. Метод оценки демпфирующих устройств взрывной защиты боевых бронированных машин / А.В. Кучинский, М.И. Васьковский, И.Б. Чепков [и др.] // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2007. – № 1. – С. 3-8.
61. Ларин А.Ю. Повышение стойкости противопульной брони за счет увеличения угла нутации кинетического боеприпаса до его взаимодействия с преградой / А.Ю. Ларин, И.Б. Чепков // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2005. – № 1. – С. 36-39.
62. Лапицкий С.В. Методология исследования сложных систем военного назначения / С.В. Лапицкий, А.В. Кучинский, А.И. Сбитнев [и др.]; ред.: С.В. Лапицкий. – К.: 2013. – 477 с.
63. Литвиненко А.В. Общий подход к проектно-технологическому обеспечению защищенности бронекорпусов транспортных средств специального назначения / А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук, Б.Я. Литвин [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – № 2. – С. 221-229.
64. Любченко А.А. Основные направления разработки высокопрочных броневых сталей / А.А. Любченко, Г.П. Анастасиади, А.Ю. Баландин // Вопросы оборонной техники. – 1988. – Вып. 5. – С. 4-7.
65. Майер В.В. Кумулятивный эффект в простых опытах / В.В. Майер // – М.: Наука, 1989. – 192 с.
66. Медико-технические требования к обитаемости наземных подвижных образцов военной техники Сухопутных войск. – М.: Воениздат, 1983. – 32 с.
67. Медведков В.И. Автомобильная техника Сухопутных войск: / В.И. Медведков, Я.С. Агейкин, Д.А. Антонов и др. – М.: ВА БТВ, 1979. – 200 с.

68. Митропольский Ю.А. Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения / Ю.А. Митропольский. – Київ: Ін-т математики НАН України, 1994. – 231 с.
69. Меньшиков Г.П. Внедрение цилиндрического ударника в конечную плиту / Г.П. Меньшиков, В.А. Одинцов, Л.А. Чудов // Механика твердого тела. – 1976. – №1. – С.125-130.
70. Музеймек А.Ю. Математическое моделирование процесса удара и взрыва в программе LS-DYNA: [Учеб.пос.] / А.Ю. Музеймек, А.А. Богач. – Пенза: Информационно издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.
71. Наставление по стрелковому делу. М.: Воениздат, 1982. – 236 с.
72. Орленко Л.П. Физика взрыва // Л.П. Орленко. Т. 2 – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 156 с.
73. Одинцов В. Скандинавская ласточка / В. Одинцов // Техника и вооружение. – 2004. – №9. – С. 8–11.
74. Опыт боевых действий в горно-пустынной местности. – М.: Воениздат, 1981. – 96 с.
75. Павловський М.А. Теоретична механіка: Підручник / М.А. Павловський. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.
76. Пановко Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – М.: Наука, 1967. – 420 с.
77. Пастернак Г.Б. БМП: о путях развития и совершенствования / Г.Б. Пастернак // Техника и вооружение. – 2004. - №4. – С. 11–15.
78. 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.
79. 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.

80. 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.

81. 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.

82. 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. – С. 357-362.

83. 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.

84. Петрученко О.С. Вплив нелінійного підпружинення бойового модуля на його амплітудно-частотні характеристики / О.С. Петрученко // Військово-технічний збірник. – 2015. – №12. – С. 45-49.

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.

89. 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.

90. 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.

91. 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. – 2016. – №16. – С. 44-50.

92. 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.

93. 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.

94. 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.

95. 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.

96. Пучков В.М. Вопросы бронепробиваемости и прочности бронебойных снарядов: Дисс. докт. техн. наук. 05.05.04. – М., 1958. – 323 с.
97. Рини Т. Численное моделирование явлений при высокоскоростном ударе / Т. Рини // Высокоскоростные ударные явления. – М.: Мир, 1973. – С.164-219.
98. Рудавський Ю.К. Математичний аналіз / Ю.К. Рудавський, П.П. Костробій, І.І. Лібацький, та ін. // Навч. посіб. для студ. ВНЗ. – Л.: НУЛП, 2003. – 404 с.
99. Савельев А. Тяжёлая боевая машина для пехоты / А.Савельев // Техника и вооружение. – 2004. – №10. – С. 20-23.
100. Сагомоян А.Я. Проникание: (проникание твердых тел в сжимаемые сплошные среды) / А.Я. Сагомоян // – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. – 299 с.
101. Самогонян А.Я. Динамика пробивания переград / А.Я. Сагомоян // – М.: Изд. МГУ, 1988. – 221 с.
102. Самойленко А.М. Дифференциальные уравнения: примеры и задачи. / А.М. Самойленко, С.А. Кривошея, Н.А. Перестюк // Учеб. пособие – М.: Высш. шк., 1989. – 383 с.
103. Сапожников С.Б. Моделирование динамики взаимодействия ударника и многослойного тканевого пакета / С.Б. Сапожников, Н.Ю. Долганина, С.А. Сахаров // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные и неметаллические материалы в машиностроении. Вып. 3(140)–4(141). М.: МНЦ “Информтехника”, 2005. – С. 38–41.
104. Сенник А.П. Моделювання зміцнення броньованих поверхонь шляхом обробки концентрованим потоком енергії / А.П. Сенник, О.І. Хитряк, О.С. Петрученко // Військово-технічний збірник. – Львів: АСВ, 2015. – С. 53-54.
105. 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.
106. 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.

107. Соколов Л.Д. Сопротивление металлов пластической деформации / Л.Д. Соколов // – М.: Металлургизд, 1963. – 284 с.

108. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением. [Учебник для вузов] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М., «Машиностроение», 1977, – 423 с.

109. Суворов С. Броня: как уменьшить потери. / С.Суворов // Техника и вооружение. – 2004. – №5. – С.38-41.

110. Таблицы стрельб по наземным целям из стрелкового оружия калибров 5,45 и 7,62 мм / – М.: Воениздат. – 1977. – 263 с.

111. Ткачук Н.А. Основы обобщенного параметрического описания сложных механических систем / Н.А. Ткачук, А.Д. Чепурной, Г.Д. Гриценко [и др.] // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В.Даля. – 2007. – №9 (115), част. 1. – С. 196 - 205.

112. Ткачук Н.А. Чувствительность прочностных и жесткостных характеристик тонкостенных элементов машиностроительных конструкций к неравномерному изменению толщины / Н.А. Ткачук, А.В. Литвиненко, А.В. Ткачук [и др.] // Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – Вип. 137. – С.187-191.

113. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг // . – М., 1968. – 480 с.

114. Тимошенко С.П. Курс теории упругости / С.П. Тимошенко // . – К.: Наукова думка, 1972. – 508 с.

115. Тимошенко А.Б. Поражающее действие комбинированных преград снарядоформирующими зарядами / А.Б. Тимошенко, И.Б. Чепков // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2011. – № 3. – С. 25-27.

116. Федосеев С. Уорриор – БМП по-британски // Техника и вооружение / С. Федосеев // . – 2003. – №3. – С. 32-38.

117. Форенталь М.В. Динамика деформирования и разрушения пластин при высокоскоростном нагружении ударниками со сложной структурой: автореф.

дис. на соиск. науч. степени к.т.н.: спец. 01.02.06 «динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» / М.В. Форенталь. – Челябинск, 2010. – 22 с.

118. Чепков И.Б. Принципы и методы решения проблемы повышения защищенности и живучести ББМ с использованием защитных устройств динамического типа / И.Б. Чепков, М.И. Васьковский, А.Н. Неговский // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2006. – № 1. – С. 11–16.

119. Хабибулин М.В. Математическое моделирование явлений, происходящих в твердых телах в результате высокоскоростного удара и взрыва: автореф. дис. на соиск. науч. степени док. физ.-мат. наук: спец. 01.02.04 «механика деформируемого твердого тела» / М.В. Хабибулин. – Томск, 2008. – 28с.

120. Чернозубов А.Д. Внешняя баллистика / А.Д. Чернозубов, В.Д. Кириченко, И.И. Разин, К.В. Михайлов. – Москва – 1954. – 460 с.

121. Шунков В.Н. Бронетехника / В.Н. Шунков. – Минск: Попурри, 2000. – 445 с.

122. Шкіль М.І. Звичайні диференціальні рівняння. / М.І. Шкіль, М.А. Сотніченко. – К.: Вища школа. – 1992. – 303 с.

123. Ярославцев И. Техника для войн прошлого / И. Ярославцев // Независимое военное Обозрение. – 2000. – №34. – С. 5–6.

124. Alan M. Mosher. Light Armor MOUT. Doctrine: Imperative Change or Business as Usual / M. Alan // Armada international. – 1993. – №6. – P.59.

125. Beer Johnston. Vector mechanics for engineers. Statics & Dynamics. / J. Beer // Seventh Edition, 2004. – 1326 p.

126. Bertholf et al. Damage in steel plates from hypervelocity impact // J.Appl. Phys. – 1975. – V. 46. – №9. – P. 67 – 74.

127. Broos H. Explicit FE modeling of ballistic impact on textile armour systems / H. Broos, K. Herlaar // Finite Element Modelling of Textiles and Textile Composites. St. Petersburg, 2007 (CD edition). LS-DYNA Keyword user's manual. 970. LSTC, 2003.

128. Ehsan N. A Comparison of the Performance of Various Light Armour Piercing Ammunition / N. Ehsan, W. Bishop // *Journal of Battlefield Technology*. – 2000. – Vol. 3, No. 3. – P. 11-20.
129. Jonnson G.R. Analysis of Elastic-Plastic Impact Involving Severe Distortions / G.R. Jonnson // *J. Appl. Mech.* – 1976. – V. 43, №3. – P. 85-90.
130. Ivanov D.S. Failure analysis of triaxial braided composite / D.S. Ivanov, F. Baudry, van den Broucke B., S.V. Lomov, H. Xie, I. Verpoest // *Composites Science and Technology*. – 2009. – V. 69, № 9. – P. 1372–1380.
131. Lambert, J.P. Ballistic Research Laboratory / J.P. Lambert // ARBRL. — 1978. – MP-02828.
132. Michael R. Matheny. Armor in Low-Intensity Conflict (LIC) / R. Michael // *Armor*. – 1988. – September-October. – P. 6-12.
133. Partom Y. Dependence of ceramic armor resistance on projectile velocity / Y. Partom, D.L. Littlefield // *14th International Symposium on Ballistics*. – Quebec, Canada, 1993. – 35 p.
134. Recht R.F. Analytical modeling of plate penetration dynamics // *High Velocity Impact Dynamics* / J.A. Zucas, R.F. Recht. New York: Wiley, 1990. – 390 p.
135. Roberts J.C. Modeling nonpenetrating ballistic impact on a human torso / J.C. Roberts, P.J. Biermann, J.V. O'Connor, E.E. Ward, R.P. Cain, B.G. Carkhuff, A.C. Merkle // *Johns Hopkins Applied Physics Laboratory Technical Digest*. – 2005. – 26, № 1. – P. 85–92.
136. Rupert H. Medium-caliber ammunition innovations for AFV applications / H. Rupert, J. Pengelley // *Armee Rundschau*. – 2004. – №1. – P. 52-56.
137. Segletis S.B. A model for rod ricochet / S.B. Segletis // *Int. J. Impact Eng.* – 2006. – V.32, № 9. – P. 1403-1439.
138. Shockeset S. Dymage in steel plates from hypervelocity impact / S. Shockeset et al. // *J. Appl. Phys.* – 1975. – V. 46, №9. – P. 47-50.
139. Viechnicki D.J. Development and current status of armor ceramics / D.J. Viechnicki, M.J. Slavin, V.I. Kliman // *Ceramic bulletin*. – 1991. – Vol. 70, No 6. – P. 1035–1039.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
доктор технічних наук, професор



Полковник

І.Б. ЧЕПКОВ
2016 року

АКТ

про реалізацію результатів дисертаційного дослідження старшого викладача кафедри інженерної механіки (ОПІВ) факультету підготовки спеціалістів бойового (оперативного) забезпечення
Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
ПЕТРУЧЕНКО Оксани Степанівни

Комісія у складі:

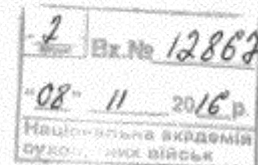
голова комісії – тимчасово виконуючий обов'язки заступника начальника Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України (далі ЦНДІ ОВТ ЗСУ) з наукової роботи, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Твердохлібов Володимир Віталійович;

члени комісії:

начальник науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ ЦНДІ ОВТ ЗСУ, доктор технічних наук, професор Васьківський Михайло Іванович;

начальник науково-дослідної лабораторії моделювання процесів функціонування зразків (комплексів, систем) озброєння та військової техніки Сухопутних військ ЦНДІ ОВТ ЗСУ, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Бісик Сергій Петрович

встановила, що наукові результати дисертаційних досліджень, а саме:
оцінка впливу рухомості захисної конструкції та її підпружинення на проникаючу здатність засобу ураження (кулі, осколка).



пропозиції побудови захисної конструкції для забезпечення ефективного захисту легкоброньованих та неброньованих об'єктів від куль чи осколків.

варіант захисної конструкцію (додатковий захисний екран) для легкоброньованих та неброньованих об'єктів, оснований на принципі зміни напрямку вектора швидкості вражаючих факторів,

розроблені особисто здобувачем і використані при виконанні науково-дослідної роботи, шифри "Швидкість-Б".

Голова комісії:

ТВО заступника начальника ЦНДІ ОВТ ЗСУ з наукової роботи
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
полковник

 В.В. ТВЕРДОХЛІБОВ

Члени комісії:

Начальник науково-дослідного управління ЦНДІ ОВТ ЗСУ
доктор технічних наук, професор
полковник

 М.І. ВАСЬКІВСЬКИЙ

Начальник науково-дослідної лабораторії ЦНДІ ОВТ ЗСУ
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
майор

 С.П. БІСИК

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. директора Державного підприємства
«Київський бронетанковий завод»

В. П. ШКАВРО

02 2017 р.

03" 02 2017 р.

м. Київ

АКТ

щодо впровадження результатів дисертаційної роботи

ПЕТРУЧЕНКО Оксани Степанівни

здобувача наукового ступеня доктора філософії (кандидата технічних наук) за
спеціальністю 255 (20.02.14) – озброєння і військова техніка

Засвідчує, що при проведенні проектно-конструкторських робіт зі створення нових та модернізації існуючих зразків колісних транспортних засобів спеціального призначення (КТЗСП), які б забезпечували надійний захист особового складу та обладнання від вражаючих факторів, були використані наступні результати дисертаційної роботи Петрученко О.С.:

- метод аналітичного дослідження впливу пружного підкріплення захисної конструкції на здатність рикошету або проникнення вражаючого фактора (кулі, осколка) в неї;
- методику визначення максимального кута падіння вражаючого фактору на поверхню елемента захисної конструкції, при якому реалізується явище рикошету;
- аналіз математичних досліджень динаміки взаємодії вражаючого фактору з елементом захисної конструкції, який вказує на те, що впродовж їх взаємодії вплив інших елементів конструкції мінімальний;

- пропозиції і рекомендації щодо створення додаткової захисної конструкції транспортних засобів спеціального призначення.

Вище зазначені результати, розглянуті комісією у складі:

- Головного інженера ДП «КБТЗ» Логвиненка М. Д.;
- Начальника технічного відділу Григораша О. Г.;
- Начальника конструкторського бюро Калита В. О.

та прийняті для розробки та удосконалення існуючих захисних конструкцій від вражаючих факторів (куль, осколків) транспортних засобів спеціального призначення, що дозволяє зменшити масу захисної конструкції при підвищенні рівня захищеності об'єкта або важливих ділянок корпусу КТЗСП.

Даний акт не є підставою для фінансових взаєморозрахунків.

Члени комісії:

Головний інженер ДП «КБТЗ»

Начальник технічного відділу

Начальник конструкторського бюро

М. Д. Логвиненко

О. Г. Григораш

В. О. Калита

Национальная академия сухопутных войск имени гетьмана Петра Сагайдачного

Акт про використання об'єкта права інтелектуальної власності

„07” 07 2017 р.

Назва і номер охоронного документа патент на корисну модель № 103351

Назва об'єкта права інтелектуальної власності (винаходу, корисної моделі, промислового зразка, компоновання інтегральних мікросхем, раціоналізаторської пропозиції)

Система захисту від дії куль, осколків снаряду на об'єкт

Винахід використано в наукових розробках кафедри Інженерної механіки (озброєння та техніки інженерних військ), під час проведення лекційних і практичних занять з курсу «Динаміка та стійкість інженерних споруд» в розділі «Динаміка взаємодії вражаючого фактора та елементів захисту», дипломному проектуванню, НДР, для курсантів Національної академії сухопутних військ.

Дата початку використання січень 2017 р.

Начальник Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

генерал-лейтенант  П.П. ТКАЧУК

Завідувач кафедри Інженерної механіки (ОТІВ) факультету підготовки спеціалістів бойового (оперативного) забезпечення Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

прац. ЗСУ, д.т.н., проф.



Б.І. СОКІЛ

Прим № 1

УДК 623.023
 Інв. № 01-НОВ-2016

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
 НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ СУХОПУТНИХ ВІЙСЬК
 ІМЕНІ ГЕТЬМАНА ПЕТРА САГАЙДАЧНОГО
 79012, м. Львів, вул. Героїв Майдану, 32;
 тел. (032) 258-44-26.

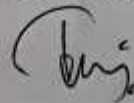
ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник начальника Національної
 академії сухопутних військ імені
 гетьмана Петра Сагайдачного з наукової
 роботи
 к.т.н. доцент
 підполковник А.В. СЛЮСАРЕНКО

01. 06 . 2016 року

ЗВІТ
 ПРО ВИКОНАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ
 “ ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖИ КОНДИЦІЙНОГО УРАЖЕННЯ ЗА КУТОМ
 ЗУСТРІЧІ КУЛІ З ЗАХИСНОЮ КОНСТРУКЦІЄЮ ”

Науковий керівник експерименту – завідувач
 кафедри інженерної механіки (ОТІВ),
 факультету підготовки спеціалістів бойового
 (оперативного) забезпечення,
 доктор технічних наук, професор



СОКІЛ Б.І.

Результати звіту розглянуто на засіданні кафедри інженерної механіки (ОТІВ)
 протокол № 17 від 27.05. 2016 р.

ЛЬВІВ 2016 р.

1. Об'єкт дослідження: динаміка захисної конструкції та вражаючого фактору (кулі, осколка) за їх ударної взаємодії

2. Предмет дослідження: вплив величини кута зустрічі на явище рикошету, якщо елементи захисної конструкції закріплені жорстко або підпружинені.

3. Мета дослідження: оцінити вплив фізико-механічних властивостей елементів захисної конструкції та кута зустрічі на пробивну здатність вражаючого фактору і встановити граничні значення кутів зустрічі з поверхнею захисної конструкції, коли має місце явище рикошету.

6. Умови проведення експерименту:

Матеріально-технічне забезпечення експерименту

| № з/п | Найменування | Кількість |
|-------|-----------------------------------|-----------|
| 1. | Захисна конструкція. | 1 од. |
| 2. | Фотоапарат Nikon 3100 зі штативом | 1 од. |
| 3. | 1.1.1 Щит дерев'яний 100x100 (см) | 1 шт. |
| 4. | 1.1.2 АК-74 | 1 од. |
| 5. | 1.1.3 СВД | 1 од. |
| 6. | 1.1.4 Набої 5,45 ПС | 120 шт. |
| 7. | 1.1.5 Набої 7,62 СН | 100 шт. |
| 8. | Мірна лінійка | 1 шт. |

Експеримент проводився при наступних метеорологічних умовах.

| № з/п | Умови моделювання | Значення |
|-------|--|-------------------------|
| 1 | Розмір та вид полігону | ділянка №14, 100×1000 м |
| | Погодні умови: | |
| | температура повітря | +15 °С |
| | атмосферний тиск | 729 мм.рт.ст |
| | туман, хмарність, інтенсивність опадів | малохмарно, 0% |
| | швидкість вітру | південний, 0-5 м/с |
| 2 | Опади | без опадів |
| 3 | Час доби | 9.00 год. – 14.00 год. |

ВИСНОВКИ ПО ПРОВЕДЕННЮ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Найбільш небезпечним для захисту об'єкту є ударна взаємодія вражаючого фактору (кулі) з плоскою бронепластиною при перпендикулярності напрямку швидкості кулі до її площини. Крім того, під час зіткнення вражаючого фактору з бронепластиною виникає ударне силове навантаження на об'єкт захисту. Його величина є достатньо велика і воно викликає надмірні пошкодження об'єкту (окрім дії сердечника кулі на захищувальний об'єкт додаються осколки металу чи броні). У роботі досліджено принципову різницю між жорстко закріпленими та підпружиненими сталевими пластинами захисної конструкції. Отже, захисна конструкція з підпружиненими пластинами має підвищену пробивну стійкість в порівнянні з конструкцією в якій пластини жорстко закріплені.