

УДК 623.4

**О.С. Петрученко***Національна Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, Україна***ЩОДО ВИВЧЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КУЛІ ЧИ ОСКОЛКА СНАРЯДА З ПЕРЕШКОДОЮ**

*Розглядаються умови взаємодії кулі чи осколків снарядів з елементом захисної конструкції з огляду на можливість її використання для зменшення кута зустрічі кулі (осколка) з об'єктом, який захищають. Встановлено зв'язок кута зустрічі кулі з перешкодою з фізико-механічними та геометричними характеристиками останньої для досягнення зменшення кута зустрічі. Проведено кількісний аналіз отриманих залежностей.*

**Ключові слова:** захисна конструкція, куля, кут зустрічі кулі (осколка) з перешкодою.

**Актуальність теми та мета роботи**

У зв'язку з бойовими діями на сході України розвиток військової техніки, створення ефективних засобів захисту її та особового складу від куль і осколків стає особливо актуальним завданням. Захист від куль чи осколків та інших уражаючих факторів полягає в їхньому зупиненні або відбитті від захищуваного об'єкта за допомогою спеціальних захисних конструкцій. Базовим елементом таких конструкцій є броня [1-3]. Сучасна промисловість пропонує великий вибір броні. Однак покращення захисту тільки за рахунок підвищення якості і геометричних параметрів броні стикається з проблемою зростання ваги захисної конструкції та об'єкта, який захищається. Зараз ведуться пошуки конструктивних рішень, які б дозволили покращити рівень захисту об'єктів без підвищення ваги броні [4]. Для цього треба створити такі захисні конструкції, які б забирали чи розсіювали частину кінетичної енергії уражаючого фактора без або за обмеженого проникнення його в броню [7], чи забезпечили зміну його напрямку так, щоб він минув об'єкт, який захищають [6].

Іншою проблемою захисту особового складу від куль чи осколків є виникнення ударних хвиль при зупинці їх у захисній конструкції. Ці хвилі можуть спричинити вторинні уражаючі дії на людей, в тому числі контузії [6]. Використання способів зміни напрямку руху куль (осколків) чи «м'якого» поглинання їх енергії зменшує роль таких вторинних факторів.

У зв'язку зі сказаним, дослідження закономірностей взаємодії куль чи осколків з перешкодами, розробка способів зменшення їх енергії, змін напрямку їхнього руху є актуальною проблемою створення нових ефективних захисних конструкцій.

Метою цього дослідження є вивчення умов відбивання чи проникнення кулі або осколка (надалі – уражаючого об'єкта) в перешкоду, залежно від геометрії перешкоди, фізико-механічних властивостей її матеріалу та кута удару.

**Постановка та розв'язання задачі**

Розглянемо елемент захисної конструкції (перешкоди) у вигляді двох пластин під деяким кутом одна до одної (рис. 1). Об'єкту вдаряється вражаючий об'єкт (куля, осколок) масою  $m$ , швидкість якого  $\vec{V}_{10}$ , а кут між площиною пластини і напрямком руху об'єкта складає  $\alpha_1$ . Поведінка вражаючого об'єкта після зіткнення з перешкодою буде залежати від низки факторів: величини кута  $\alpha_1$ , маси та швидкості об'єкта, фізико-механічних властивостей матеріалу перешкоди. Надалі останні будемо характеризувати інтегральними параметрами: силою опору  $R_{1отп}$  проникненню вражаючого об'єкта в пластину та коефіцієнтом відновлення  $k_1$  (за Ньютоном), який дорівнює відношенню

модуля нормальної складової відносної швидкості між тілами після удару до модуля нормальної складової відносної швидкості між тілами до удару.

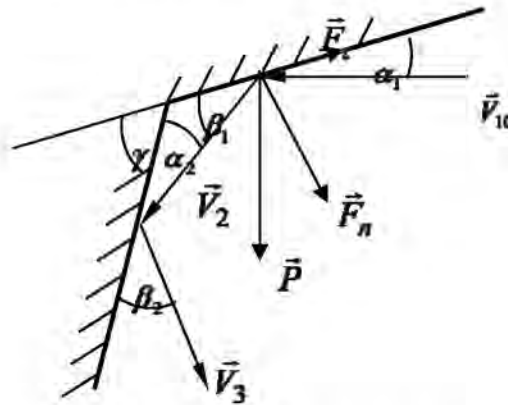


Рис. 1 – Схема удару кулі об поверхню перешкоди

Важливою характеристикою взаємодії вражаючого об’єкта з перешкодою є гранично допустимий кут  $\alpha_{1max}$  – максимальне значення кута удару, за якого ще відбувається відбивання від пластини. Для його визначення використаємо теорему про зміну кількості руху вражаючого об’єкта [5]

$$\bar{K}_k - \bar{K}_0 = \sum \bar{S}(t), \tag{1}$$

де  $\bar{K}_k = m\bar{V}_2$  – кількість руху об’єкта після відбиття від перешкоди;  $\bar{K}_0 = m\bar{V}_{10}$  – його кількість руху до удару об перешкоду;  $\bar{V}_2$  – швидкість вражаючого об’єкта після відбиття від перешкоди;  $\sum \bar{S}(t)$  – сума імпульсів всіх сил, які діють на об’єкт під час його контакту з перешкодою.

При взаємодії вражаючого об’єкта з перешкодою на нього діють:  $\bar{P}$  – сила його ваги;  $\bar{F}_n$  – нормальна складова реакції поверхні перешкоди,  $\bar{F}_t$  – дотична складова реакції поверхні перешкоди. Отже імпульс цих сил дорівнює

$$\sum \bar{S}(t) = (\bar{P} + \bar{F}_n + \bar{F}_t) dt_1, \tag{2}$$

де  $dt_1$  – елементарний проміжок часу, впродовж якого вражаючий об’єкт контактує з нерухомою поверхнею перешкоди.

Підставляючи записані залежності у співвідношення (1), отримаємо, що

$$m\bar{V}_2 - m\bar{V}_{10} = (\bar{P} + \bar{F}_n + \bar{F}_t) dt_1, \tag{3}$$

Проектуючи цю залежність на нормальний і тангенціальний напрямки поверхні перешкоди отримаємо

$$mV_2 \sin \beta_1 - (-mV_{10} \sin \alpha_1) = (F_n + P \cos \alpha_1) dt_1, \tag{4}$$

$$mV_2 \cos \beta_1 - mV_{10} \cos \alpha_1 = (-F_t + P \sin \alpha_1) dt_1, \tag{5}$$

де  $\beta_1$  – кут, під яким вражаючий об’єкт відбивається від поверхні перешкоди.

Враховуючи, що тривалість часу  $dt_1$  контакту кулі з поверхнею перешкоди є малою величиною, а величини сил  $P$  та  $F_t$  є значно менші від величини сили  $F_n$ , систему рівнянь (4) і (5) переписемо у вигляді

$$mV_2 \sin \beta_1 + mV_{10} \sin \alpha_1 = F_n dt_1, \tag{6}$$



$$mV_2 \cos \beta_1 - mV_{10} \cos \alpha_1 = 0 \quad (7)$$

Для коефіцієнта відновлення тепер можемо записати формулу

$$\frac{V_2 \sin \beta_1}{V_{10} \sin \alpha_1} = k_1 \quad (8)$$

Зауважимо, що величину коефіцієнта відновлення  $k_1$  визначають експериментальним шляхом і

$$0 \leq k_1 < 1$$

Враховуючи залежність (7) і (8), отримаємо, що

$$V_2 \cos \beta_1 = V_{10} \cos \alpha_1, \quad V_2 = \frac{V_{10} \cos \alpha_1}{\cos \beta_1}, \quad \frac{V_{10} \cos \alpha_1 \sin \beta_1}{V_{10} \sin \alpha_1 \cos \beta_1} = k_1 \quad \text{або}$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = k_1 \operatorname{tg} \alpha_1 \quad (9)$$

З рівняння (9) можна визначити величину кута  $\beta_1$ , під яким вражаючий об'єкт відбивається від поверхні перешкоди. Дійсно, враховуючи, що  $\cos \beta_1 = \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_1}}$ , із співвідношення (9) отримуємо

$$\cos \beta_1 = \sqrt{\frac{1}{1 + k_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_1}} \quad (10)$$

З рівнянь (8) і (10) визначаємо швидкість  $V_2$  вражаючого об'єкта після відбиття від поверхні перешкоди

$$V_2 = V_{10} \cos \alpha_1 \sqrt{1 + k_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_1} \quad (11)$$

Величина нормальної реакції  $F_n$  поверхні перешкоди, згідно рівнянь (6) і (11), визначається виразом

$$F_n = \frac{m(1 + k_1)V_{10} \sin \alpha_1}{dt_1} \quad (12)$$

Умова відбивання вражаючого об'єкта від поверхні перешкоди буде залежати від співвідношення між величинами сил  $F_n$  нормальної реакції та опору матеріалу  $R_{\text{ломр}}$  перешкоди.

Надалі приймемо за таку умову співвідношення

$$F_n \leq R_{\text{ломр}} \quad (13)$$

Якщо врахувати вираз (12) для величини сили нормальної реакції, то це співвідношення набуде вигляду

$$\frac{m(1 + k_1)V_{10} \sin \alpha_1}{dt_1} \leq R_{\text{ломр}} \quad (14)$$

За умови рівності лівої та правої частин (14) отримуємо рівняння, з якого визначаємо максимальну величину кута удару  $\alpha_{1\text{max}}$ , при якому вражаючий об'єкт відбивається від поверхні перешкоди

$$\sin \alpha_{1\text{max}} = \frac{R_{\text{ломр}} dt_1}{m(1 + k_1)V_{10}} \quad (15)$$

Якщо вражаючий об'єкт відбився від першої пластини, то надалі він вдаряється об другу поверхню перешкоди під кутом  $\alpha_2$ , який дорівнює

$$\alpha_2 = \gamma - \beta_1, \quad (16)$$

де  $\gamma$  – кут між поверхнями перешкод (рис. 1).

Використовуючи попередні результати можна стверджувати, якщо кут  $\alpha_2$ , під яким куля вдаряється о другу перешкоди, менше граничної величини

$$\alpha_2 \leq \alpha_{2\max}, \quad (17)$$

де  $\alpha_{2\max}$  визначається співвідношенням

$$\sin \alpha_{2\max} = \frac{R_{2\text{опр}} dt_2}{m(1+k_2)V_2}, \quad (18)$$

то вона відіб'ється від поверхні перешкоди. Тут позначено:  $R_{2\text{опр}}$  – величина сили опору матеріалу другої перешкоди,  $dt_2$  – тривалість часу контакту між вражаючим об'єктом і другою поверхню перешкоди,  $k_2 = V_3 \sin \beta_2 / V_2 \sin \alpha_2$  – коефіцієнт відновлення для матеріалу другої пластини. При цьому швидкість  $V_3$  визначаємо за формулою, аналогічною формулі (11) із заміною  $V_{10}, V_2, k_1, \alpha_1$  на  $V_2, V_3, k_2, \alpha_2$  відповідно.

Враховуючи залежність (14) та використовуючи співвідношення (15), (16) можемо обчислити величину кута  $\gamma$  між поверхнями перешкод з нерівності

$$\sin(\gamma - \beta_1) \leq \frac{R_{2\text{опр}} dt}{m(1+k_2)V_2}, \quad (19)$$

або

$$\sin(\gamma - \beta_1) \leq \frac{R_{2\text{опр}} dt_2}{m(1+k_2)V_{10} \cos \alpha_1 \sqrt{1+k_1^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_1}}. \quad (20)$$

Співвідношення (17) або (18) дозволяють встановити межі зміни кута між пластинами перешкоди, за яких після відбивання вражаючого об'єкта від першої пластини буде мати місце відбивання і від другої.

### Кількісний аналіз розв'язку

Приведені співвідношення дозволяють провести кількісні оцінки параметрів розташування перешкоди та її елементів для забезпечення зміни напрямку кулі (осколка) за характеристиками їх, їхнього початкового руху та фізико-механічних властивостей матеріалу перешкоди. Дійсно, розглянемо приклад визначення кутів удару  $\alpha_{1\max}$  і  $\gamma$  між поверхнями перешкоди, якщо  $m = 0,0096 \text{ кг}$ ,  $V_{10} = 800 \text{ м/с}$ ,  $R_{1\text{опр}} = 20000 \text{ Н}$ ,  $dt_1 = 0,0001 \text{ с}$ ,  $k_1 = 0,5$ ,  $R_{2\text{опр}} = 20000 \text{ Н}$ ,  $dt_2 = 0,00015 \text{ с}$ ,  $k_2 = 0,5$ . Здійснюючи математичні обчислення за наведеними вище формулами отримаємо, що  $\alpha_{1\max} = 10^\circ$ ,  $\beta_1 = 5^\circ$ ,  $V_2 = 790 \text{ м/с}$ ,  $\alpha_{2\max} = 15^\circ$ ,  $V_3 = 770 \text{ м/с}$ ,  $\gamma = 20^\circ$ . Таким чином захисний елемент буде змінювати напрям руху вражаючого об'єкта за відносно невеликих кутів удару та невеликого кута між обома пластинами перешкоди. При цьому взаємодія вражаючого об'єкта з перешкодою мало змінює його швидкість.



Як видно з формул (12)–(15), величина кута удару і його максимальне значення суттєво залежать від маси та початкової швидкості, тобто імпульсу  $p = mV_{10}$  вражаючого об'єкта. Це ілюструють криві, приведені на рис. 2.

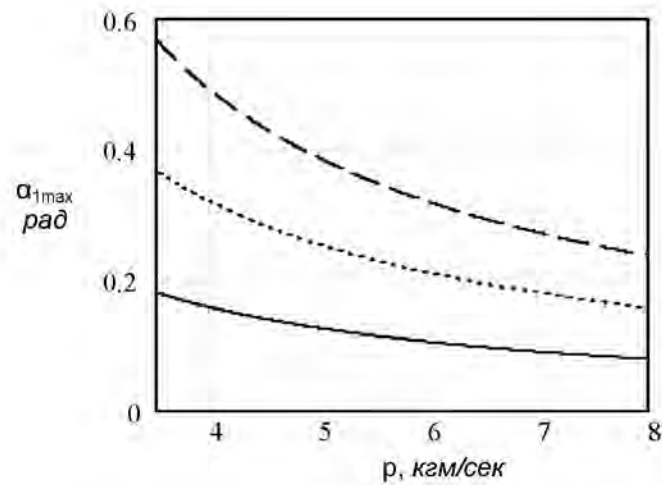


Рис. 2 – Залежність максимального кута падіння вражаючого об'єкта від його імпульсу для  $\kappa_1=0,6$ ,  $R_{10np}=10000, 20000, 30000$  (суцільні, пунктирні, штрихові лінії відповідно)

Область зміни імпульсу вражаючого об'єкта на рисунку вибрана характерною для стрілецької зброї. Бачимо, що максимальний кут удару, за якого ще відбувається відбивання, зменшується з ростом кількості руху вражаючого об'єкта і суттєво залежить від сили опору матеріалу перешкоди. Це ілюструють криві, приведені на рис. 3

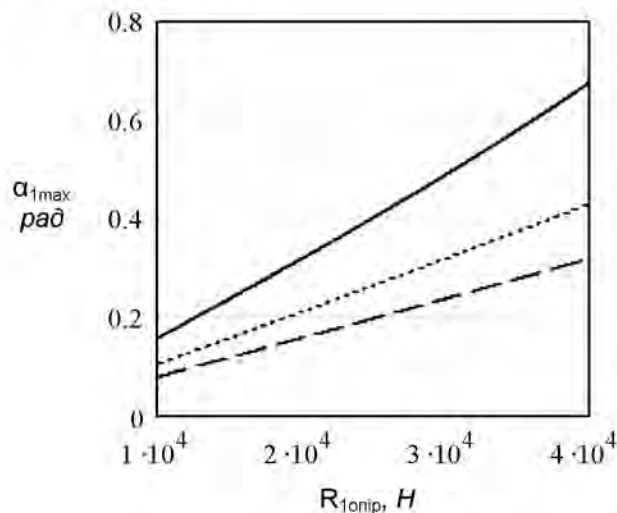


Рис. 3 – Залежність максимального кута падіння вражаючого об'єкта від сили опору  $R_{10np}$  для  $\kappa_1=0,6$ ,  $p=4, 6, 8$  (суцільні, пунктирні, штрихові лінії відповідно)

Зауважимо, що залежність максимального кута удару вражаючого об'єкта від сили опору матеріалу є практично лінійною.

На рис. 4 приведені криві залежності максимального кута удару від коефіцієнта відновлення. Бачимо, зокрема, що інтервал зміни максимального кута, спричинений зміною коефіцієнта відновлення більший для більших значень сили опору матеріалу перешкоди.

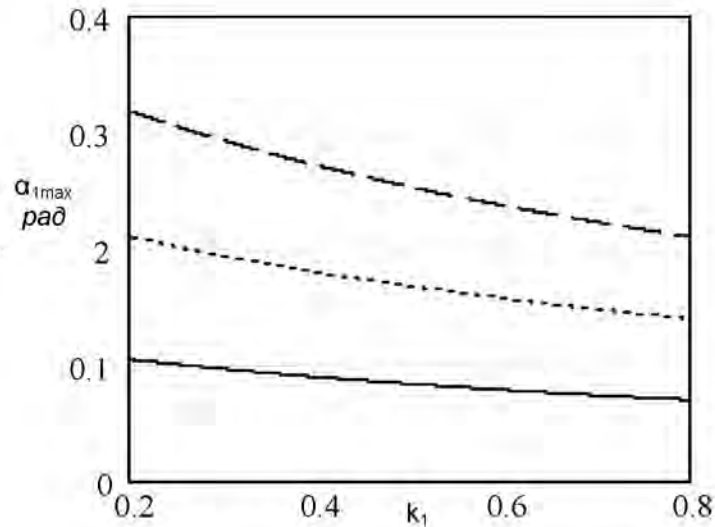


Рис. 4 – Залежність максимального кута падіння вражаючого об’єкта від коефіцієнта відновлення  $k_1$  для імпульсу  $p=8$ ,  $R_{10000}$ ,  $20000$ ,  $30000$  (суцільні, пунктирні, штрихові лінії відповідно)

Якщо кут удару  $\alpha_1$  менший від  $\alpha_{1max}$ , тобто має місце залежність  $0 \leq \alpha \leq \alpha_{1max}$ , тоді, відбившись від поверхні першої перешкоди, вражаючий об’єкт потрапляє на другу поверхню перешкоди зі швидкістю

$$V_2 = V_{10} \cos \alpha_1 \sqrt{1 + k_1^2 \tan^2 \alpha_1} \tag{21}$$

та вдаряється об цю поверхню під кутом  $\alpha_2$ , який дорівнює  $\alpha_2 = \gamma - \beta_1$ , де кут  $\beta_1$  визначається з рівняння (10).

Сила удару вражаючого об’єкта об другу поверхню перешкоди дорівнює

$$F_{2n} = \frac{m(1 + k_2)V_2 \sin \alpha_2}{dt_2} \tag{22}$$

Щоб вражаючий об’єкт відбився від другої поверхні перешкоди повинна виконуватись умова  $F_{2n} \leq R_{20000}$ , тобто

$$\frac{m(1 + k_2)V_2 \sin \alpha_2}{dt_2} \leq R_{20000} \tag{23}$$

У випадку падіння вражаючого об’єкта під кутом  $\alpha_1 = 0^0$ , тоді  $V_2 = V_{10}$ ,  $\beta_1 = 0^0$ ,  $\gamma = \alpha_2$  і величину кута між поверхнями першої та другої перешкод можна визначити з рівняння

$$\sin \gamma = \sin \alpha_{2max} = \frac{R_{20000} dt_2}{m(1 + k_2)V_{10}} \tag{24}$$

Якщо вважати, що  $m = 0,01 \text{ кг}$ ,  $k_2 = 0,6$ ,  $V_{10} = 400 \text{ м/с}$  і тривалості часу контакту вражаючого об’єкта з поверхнями перешкоди дорівнюють відповідно  $dt_1 = 0,0001 \text{ с}$   $dt_2 = 0,00015 \text{ с}$ , то визначена зі співвідношень (10), (15), (20) залежність максимального значення величини кута  $\gamma$  від величини сили опору першої пластини перешкоди для різних значень її коефіцієнта відновлення за фіксованих значень імпульсу вражаючого об’єкта та сили опору і коефіцієнта відновлення другої пластини, подано на рис. 5.



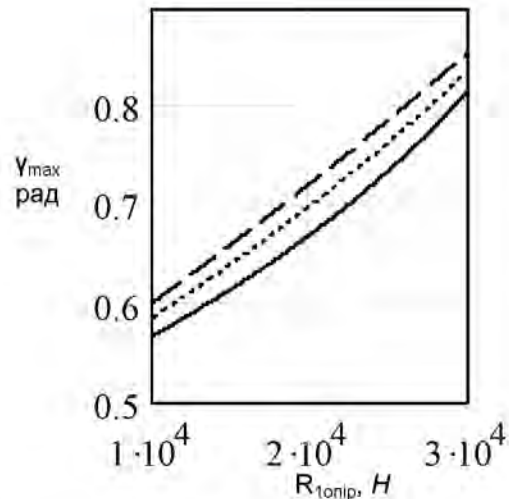


Рис. 5 – Залежність максимального значення кута між пластинами від сили опору першої пластини для  $p=4$ ,  $R_{2\text{опір}}=20000$ ,  $k_2=0,6$ ,  $k_1=0,4; 0,6; 0,8$  (суцільні, пунктирні, штрихові лінії відповідно)

Бачимо, що максимальна величина кута  $\gamma$  збільшується з ростом як сили опору першої пластини, так і збільшенням її коефіцієнта відновлення. Можна стверджувати, що чим більша сила опору перешкоди, тим ймовірність пробиття перешкоди менша і тому може бути більший кут між поверхнею перешкоди і напрямком швидкості вражаючого об'єкта. Подібним чином максимальний кут  $\gamma$  залежить і від сили опору другої пластини. Максимальні значення кута удару та кута між пластинами збільшуються також з ростом часу удару. Це видно, наприклад, з формул (18), (20), (24).

### Висновки

Таким чином, проведені дослідження дозволило встановити умови, що пов'язують параметри руху кулі (осколка) із фізико-механічними та геометричними характеристиками захисної конструкції (чи її елемента) у вигляді з'єднаних під деяким кутом пластин, за виконання яких кулі чи осколки снарядів (вражаючі фактори) будуть відхилитися від об'єкта, який захищають. Встановлено, зокрема, що максимальний кут удару вражаючого об'єкта об перешкоду, за якого ще відбувається його відбивання, суттєво залежить від сили опору матеріалу перешкоди, часу удару, збільшуючись з їх ростом, і кількості руху вражаючого об'єкта та коефіцієнта відновлення перешкоди, спадаючи з їх збільшенням. Вибором вказаних параметрів можна, зокрема, оптимізувати геометрію та вагу захисної конструкції при збереженні її захисних властивостей.

### Список використаних джерел

1. Семькин В.В. Средства индивидуальной бронезащиты: учебное пособие / В.В. Семькин. – М.: Московский университет МВД России, 2008. – 66 с.
2. Иванюк А.М. Специальные средства индивидуальной бронезащиты и активной обороны. Техника и тактика их применения: Учебно-методическое пособие / А.М. Иванюк, В.В. Зарецкий. – Калининград: Калининградский Юридический институт МВД России, 2009. – 52 с.
3. Галиновский А. Л. Анализ эффективности различных средств индивидуальной бронезащиты / А. Л. Галиновский, В. И. Колпаков, С. Г. Муляр // Наука и образование: электронное научно-техническое издание – № 3. – 2012. – С. 1-12.
4. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования [И.Ф. Кобылкин, В.А. Григорян, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяко]. – М.: РадиоСофт, 2008.

5. Гаральд Ір. Класична механіка / Гаральд Ір; Переклад з нім. Гайда Р., Головач Ю. – Л. :В-во ЛНУ ім. І.Франка, 1999. – 464 с.
6. Андрущук Д. Вогнепальні контузійні травми / Дмитро Андрущук.
7. Петрученко О.С. Зменшення ефективної дії кулі, осколка снаряду на об'єкт захисту / О.С. Петрученко, О.І. Хитряк, Л.Д. Величко. – Військово-технічний збірник. – №12 – Львів, 2015. – С. 9–14.

**Рецензент:** Кондрат Василь Федорович, д.ф.-м.н., проф. кафедри інженерної механіки (ОПВ), Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

## К ИЗУЧЕНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЛИ ИЛИ ОСКОЛКОВ СНАРЯДОВ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

О.С. Петрученко

*Рассматриваются условия взаимодействия пули или осколков снарядов с элементом защитной конструкции с учетом возможности его использования для уменьшения угла встречи пули (осколка) с объектом, который защищают. Установлена связь угла встречи пули с преградой, при котором обеспечивается отражение пули от защитной конструкции, с ее физико-механическими и геометрическими характеристиками. Проведен количественный анализ полученных зависимостей.*

**Ключевые слова:** защитная конструкция, пуля, угол встречи пули (осколка) с преградой.

## FOR THE STUDY OF THE INTERACTION BULLET OR PROJECTILE FRAGMENT WITH AN OBSTACLE

O. Petruchenko

*Studied the conditions of interaction of bullets or shell's fragments with protective structure's elements to find the opportunity to reduce the angle of meeting bullet (fragment) with the object, which protect. Found the correlation between the angle of meeting bullet (fragment) with an obstacle and its physical, mechanical and geometric characteristics, to achieve the reduction of the angle of meeting. Performed the quantitative analysis of the obtained dependencies.*

**Keywords:** protective structure, bullet, fragment, angle of meeting bullet (fragment).