

УДК 004.942:623.565:623.451.2

Ю.М. Сидоренко¹, В.В. Яковенко²

¹ НТУУ «Київський політехнічний інститут», Київ,

² Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

ПРО ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ОСКОЛКОУТВОРЮЮЧИХ ДИСКІВ ОСКОЛКОВО-ПУЧКОВОГО СНАРЯДА НА ЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСЬОВОГО ОСКОЛКОВОГО ПОЛЯ

В роботі представлені результати досліджень зі встановлення параметрів просторово-масового розподілу металевих дисків природного подрібнення, що входять до складу осколково-пучкового снаряда. Дослідження проводились із застосуванням чисельного методу комп'ютерного моделювання динамічних нестационарних процесів в континуальній постановці за допомогою програми LS-DYNA.

Ключові слова: осколковий диск, металевий блок, осколково-пучковий снаряд, моделювання процесу вибуху.

Вступ

Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз стану сучасних засобів ураження свідчить, що протитанкові снаряди танкових гармат (кумулятивні і підкаліберні) проходять період бурхливого розвитку і безперервного удосконалення. В той же час єдиний тип танкових снарядів, що спроможний вести боротьбу з танконебезпечною живою силою і вертольотами, – осколково-фугасний снаряд зупинився у своєму розвитку на рубежі 30-х років минулого століття.

Необхідно відмітити, що сучасний етап ведення збройної боротьби (швидкоплинність, маневреність, інформативність) вимагає від виробників створення системи ураження «скальпельного» типу. Разом з тим, розузгодженість густини розсіювання точок падіння осколково-фугасних снарядів; настільність траєкторії з еліпсом розсіювання на дальності 2000 м з відношенням великих осей 50:1; розліт основної маси осколків в напрямі, перпендикулярному траєкторії польоту снаряда; відносно невисокий коефіцієнт наповнення (0,14), а також низькі осколкові властивості снарядної хромової сталі 45X1 з утворенням переважно осколків «сабельного» типу, призвели до концептуально нового підходу в сфері модернізації осколково-фугасних снарядів з відмовою від використання технічних рішень, спрямованих на формування «нерациональних» з точки зору бойової ефективності кругових осколкових полів, до створення боєприпасів із спрямованими керованими осколковими полями. Таким чином, напрям вдосконалення боєприпасів в плані із керованими осколковими полями є **актуальним**.

Аналіз доступних патентних, відкритих інформаційних джерел спеціалізованих ЗМІ свідчить про визначення нових шляхів розвитку боєприпасів – створенням осколково-пучкових снарядів [1–8], що призначені для ураження неброньованої та легкоброньованої техніки, живої сили противника шляхом створення в напрямку своєї осі симетрії осьового осколкового поля.

Ідея цього снаряда була висунута в МГТУ ім. Баумана (тоді МВТУ) в 1972 р., а перший патент отриманий МГТУ в 1994 р. Надалі в даній сфері МГТУ було отримано 35 патентів, а також різні конструктивні схеми осколково-пучкових боєприпасів різних класів.

Крім того, сам процес створення даного класу снарядів умовно можна розділити на два етапи. **Перший етап** – формування мети та задач проектування. **Другий етап** – безпосередньо сам процес проектування.

Наприклад, до першого етапу відноситься задача встановлення для кожного параметра осколкового поля (кутова ширина поля, розподіл осколків в середині кута розльоту за масою, формою і швидкістю польоту та інші) такого числового значення, яке відповідає найвищій ефективності дії снаряда. Слід зазначити, що дана робота проводиться, як правило, з використанням методів та методик теорій бойової ефективності дії відповідної зброї.

На другому етапі проводиться пошук конструктивного рішення, що дозволяє осколково-пучковим снарядам під час вибуху формувати осьове поле осколків з оптимальними параметрами. В свою чергу проводити такий пошук можна лише за умови наявності математичних залежностей між

геометричними параметрами снаряда та параметрами осколкового поля, що він утворює. Але сьогодні для осколково-пучкових снарядів такий математичний апарат ще тільки розробляється. В роботах [9–13] вже описані деякі особливості процесу формування осколкового поля за різних початкових умов. Було розглянуто вплив на його масово-швидкісні параметри наступних параметрів:

- товщини осколкового блока;
- положення точки ініціації детонації заряду вибухової речовини;
- величини границі текучості матеріалу осколкового блока;
- мідної положки між осколковим блоком та зарядом вибухової речовини;
- зазору між несучим корпусом снаряда та розміщеним у нього в середині осколкового блока;
- форми осколкового блока, якщо він був виконаний у вигляді суцільного диску природного дроблення та набору з п'яти концентричних кілець.

Знаходження таких залежностей можливе експериментальним шляхом або методами математичного моделювання.

Вартість проведення натурного експерименту досить висока. Тому їх використовують для проведення проміжного контролю процесу моделювання та в якості основного способу оцінки результатів проектування.

Мета статті

У даній роботі представлені результати досліджень, метою яких було встановлення для моделі осколково-пучкового снаряда параметрів просторово-масового розподілу його осколкового блока, який виготовляється як набір металевих дисків природного дроблення.

У подальшому дану модель будемо називати металевим блоком, розрахункові схеми конструкцій якого представлені на рис. 1.

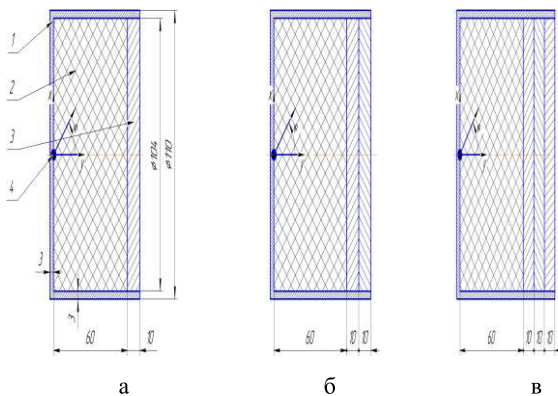


Рис. 1. Розрахункові схеми конструкцій металевго блока: а – з одним диском, б – з двома дисками, в – з трьома дисками; 1 – корпус, 2 – заряд вибухової речовини, 3 – металевий диск, 4 – місце ініціації детонації заряду вибухової речовини

Виклад основного матеріалу

Конструкція металевго блока має циліндричний корпус з закритою донною частиною 1, діаметром зовнішньої поверхні 110 мм і товщиною стінки 3 мм. В середині корпусу розміщується заряд вибухової речовини 2 (ВР) з точкою ініціації детонації 4. З протилежного боку заряду в контакт з ним знаходиться або один диск 3 (рис. 1а), або два диски (рис. 1б), або три диски (рис. 1в) природного дроблення.

Для встановлення значень кінематичних параметрів осколкового поля, що формується в результаті вибуху таких конструкцій, використовувалася метод математичного моделювання.

Зарядом ВР була обрана вибухова суміш Н-6 (RDX-40% (гексоген), TNT-30% (тринітротолуол), Al-20%, Wax-10% (пластифікатор)) густиною $\rho=1760$ кг/м³, швидкістю детонації $D=7470$ м/с, тиском на фронті детонаційної хвилі $P_{CJ}=29$ ГПа. Маса заряду становить 897 г.

Розширення його продуктів детонації описувалось за допомогою рівняння стану у формі Джонса-Уілкінса-Лі (JWL) [14, 15]

$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{\omega \cdot E}{V},$$

де V – відносний об'єм ПД, а значення коефіцієнтів рівняння становили

$$A=758,1 \text{ ГПа}; B=8,513 \text{ ГПа}; R_1=4,9; R_2=1,1; \omega=0,2; E_0=10,3 \text{ ГПа}.$$

Поведінка оточуючого їх повітря з початковим значенням густини $\rho_0=1,26$ кг/м³ описувалось за допомогою рівняння стану у формі лінійного поліному

$$P = C_0 + C_1 \cdot \mu + C_2 \cdot \mu^2 + C_3 \cdot \mu^3 + (C_4 + C_5 \cdot \mu + C_6 \cdot \mu^2) \cdot E,$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1,$$

де ρ – поточне значення густини повітря. Коефіцієнти даного рівняння обирались згідно з рекомендацією [16].

Для матеріалу корпусу металевго блока та осколкового диска була обрана пружно-пластична модель з кінематичним зміцненням «PLASTIC-KINEMATIC» з такими параметрами:

- густина $\rho = 7850$ кг/м³,
- модуль пружності першого роду $E = 210$ ГПа,
- коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,33$,
- межа текучості $\sigma_T = 288$ МПа,
- тангенціальний модуль пружності $E_t = 1$ ГПа.

Таким чином, маса одного осколкового диска складала 667 г, а маса корпусу – 778 г.

Розширення корпусу металюного блока та процес метання осколкового диска під дією продуктів детонації описувались в рамках континуальної моделі, тобто без врахування процесів руйнування. Можливість використання такого підходу на етапі встановлення значень саме кінематичних параметрів осколкового поля показано в роботах [17–20].

Незважаючи на те, що конструкція металюного блока має осьову симетрію і моделювання в принципі можна проводити у спрощеній двомірній вісесиметричній постановці, використання в програмі LS-DYNA змішаного лагранжів-ейлерівового підходу можливо лише за умови моделювання процесів вибухового деформування осколкових дисків тільки у тривимірній (3D) постановці. Така умова вимагає використання значно більшої кількості скінченних елементів, якщо зберегти такий самий розмір скінченного елемента, який би обирався для розв'язання задачі у двомірній вісесиметричній постановці. Як наслідок цього, збільшуються вимоги до комп'ютерної техніки у зв'язку із значним зростанням загальної тривалості розрахунку.

Для проведення чисельних досліджень була обрана комп'ютерна програма «ANSYS/LS-DYNA», оскільки вона дозволяє застосувати лагранжів або ейлерів підхід для опису поведінки середовища. Враховуючи те, що в нашій задачі присутні як газоподібні (продукти детонації (ПД) та повітря), так і металеві тіла (корпус та диски), то доцільно комп'ютерне моделювання проводити з використанням змішаного лагранжів-ейлерівового підходу [16, 21–27].

Але 3D схему металюного блока можна дещо спростити. В розрахунок можна закласти не повно-розмірну модель блока, а лише $\frac{1}{4}$ частину з накладеними на неї відповідними граничними умовами.

Таким чином, для побудови скінченноелементної моделі задачі використовувався 8-вузловий скінченний елемент SOLID164 з характерним розміром – $1 \times 1 \times 1$ мм. Даний елемент є об'ємний, має форму гексаедра та застосовується для розв'язання динамічних нестационарних тривимірних задач. Загальна кількість елементів на одну розрахункову схему коливалась від 620880 шт до 662640 шт.

Середня тривалість розрахунку однієї конструктивної схеми металюного на 4-ядерному персональному комп'ютері IntelCore2Quad з тактовою частотою ядра 2,83 ГГц, 8 Гб оперативної пам'яті та 2 Тб жорстким диском тривала 1,5 год.

Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибуху металюного блока, що має у своїй

конструкції два та три осколкових диски, зображені на рис. 2 та рис. 3 відповідно.

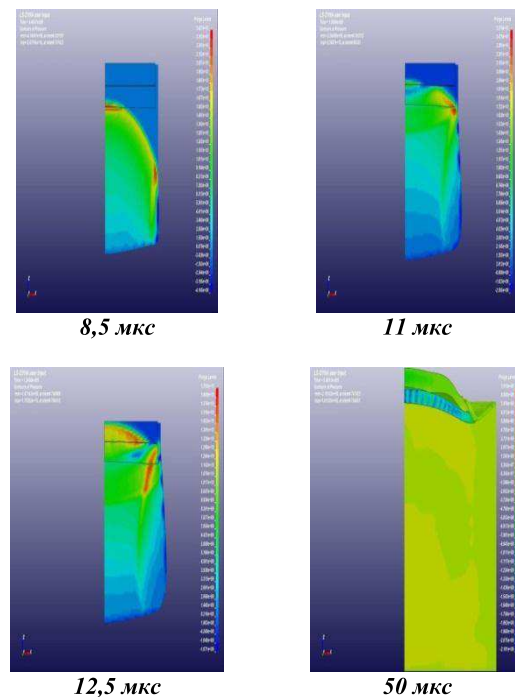


Рис. 2. Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибухового метання двох сталюних осколкових дисків

На рис. 2 та рис. 3 можна спостерігати хвильові процеси як в продуктах детонації, так і в металевих дисках. На момент 8,5 мкс процесу відбувається процес відбиття детонаційного фронту (ДФ) від внутрішньої поверхні першого осколкового диска.

Осколкові диски, що знаходяться в безпосередньому контакті з вибуховою речовиною, будемо вважати першими та позначимо як диск 1/1, диск 1/2 та диск 1/3 для схем металюного блока з одним, двома та трьома дисками відповідно. Аналогічно диск 2/2 та диск 2/3 будуть мати № 2 для схем блока з двома та трьома дисками відповідно.

В результаті такої взаємодії ДФ та диска в ПД формується фронт ударної хвилі стиску, що рухається вздовж осі симетрії блока в напрямку точки ініціації детонації. В протилежний бік в диску формується аналогічна ударна хвиля стиску, яка на момент $t = 10$ мкс проходить його товщину, виходить на зовнішню поверхню та відбивається від неї. В результаті даного процесу диск починає переміщуватися, і на 11 мкс повітряний зазор на осі симетрії між першим та другим дисками починає закриватися з формуванням у другому диску відповідної ударної хвилі стиску. Дана хвиля на момент $t = 12,5$ мкс також проходить товщину диска № 2 і відбивається від його зовнішньої поверхні. Аналогічний хвильовий процес відбувається і всередині третього диска.

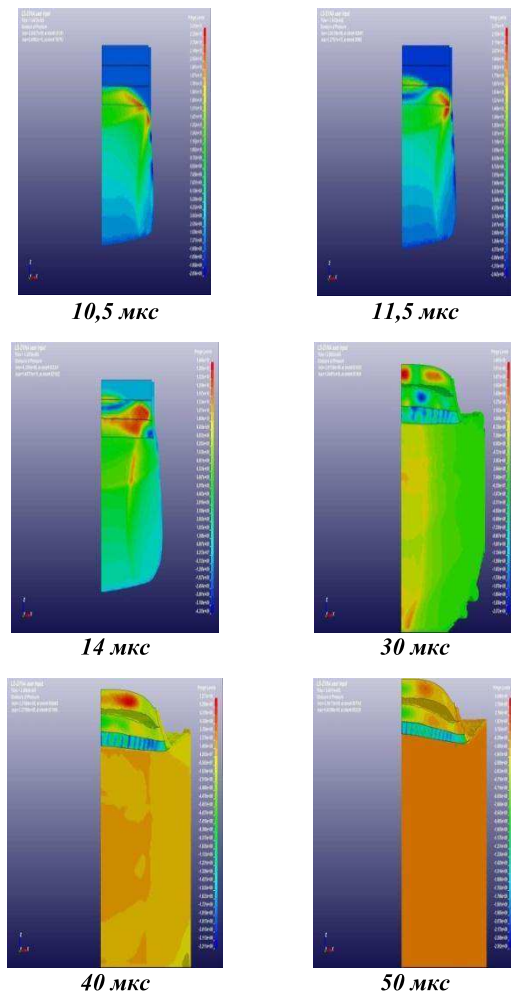


Рис. 3. Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибухового метання трьох сталевих осколкових дисків

Вочевидь, такі процеси повинні відобразитися на поведінці значень швидкості польоту кожного осколкового диска. Наприклад, на рис. 4 показані графіки зміни значень осрової швидкості руху вузлів скінченно-елементної сітки, розташованих на осі симетрії посередині товщини першого (диск 1/1) та другого (диск 1/2) осколкових дисків, що метаються за другою схемою (рис. 1б).

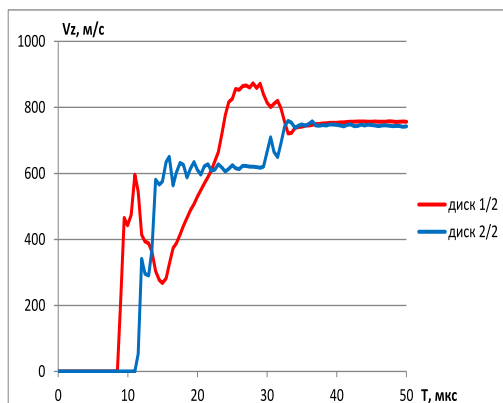


Рис. 4. Осрова швидкість руху вузлів скінченно-елементної сітки розташованих на осі симетрії посередині товщини першого та другого осколкового дисків

З рис. 4 видно, що падіння швидкості диска 1/2 в період з 10 по 16 мкс відбувається на фоні зростання швидкості диска 2/2. Це пов'язано з передачею частини кінетичної енергії від диска до диска в момент їх першого контакту. В подальшому диски розходяться. Повітряний зазор між ними збільшується. Швидкість диска 2/2 практично не змінюється, та її значення коливаються навколо середньої величини як наслідок внутрішніх хвилювих процесів.

Повторне зростання швидкості цього диска в момент 28...33 мкс пов'язано з повторним зіткненням з диском 1/1, який до цього моменту збільшував свою швидкість за рахунок тиску на нього продуктів детонації.

Надалі диски знову розходяться, але значення їх осрових швидкостей вже змінюються не так суттєво. Хоча слід відмітити, що на момент завершення другого контакту швидкість диска 1/2 знову менша за швидкість диска 2/2, але з часом картина змінюється. Тому можна прогнозувати, що в подальшому вони вже втретє увійдуть у контакт один з одним, але на більш пізніх стадіях процесу метання. Також тут слід враховувати те, що моделювання проводиться в континуальній постановці. Тому цей контакт в дійсності може не відбутися у зв'язку з тим, що диски до цього моменту вже зруйнуються та сформують певне осколкове поле.

Таким чином, для встановлення параметрів просторово-масового розподілу маси дисків та їх швидкостей за меридіональним кутом розльоту слід обмежитись першими 50 мкс процесу їх вибухового деформування.

Як результат чисельного аналізу на рис. 5 показані залежності, що характеризують зміну значень повної швидкості та меридіонального кута польоту дисків посередині їх товщини від осі симетрії в напрямку торцевої поверхні.

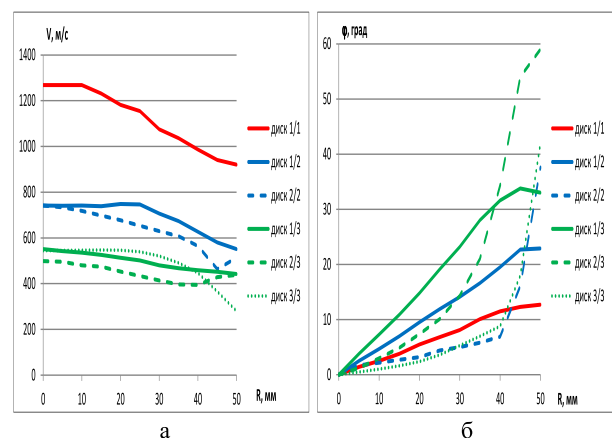


Рис. 5. Розподіл значень: а – швидкості польоту V ; б – меридіонального кута польоту φ різних частин осколкових дисків

З рис. 5а видно, що зі збільшенням кількості осколкових дисків у металному блоці їх швидкість метання знижується. Це добре корелює з висновками закону збереження енергії замкнутої системи. Як було прийнято раніше, маса вибухової речовини в кожній зі схем металного блока є сталою величиною. Проте загальна маса осколкових блоків від схеми до схеми пропорційно зростає. Якщо прийняти, що вся енергія вибухової речовини буде повністю переходити у кінетичну енергію осколкових дисків, то значення їх середньої швидкості можна розрахувати за формулою

$$V_i = \sqrt{\frac{2CQ_V}{M_i}}, \quad (1)$$

де C – маса ВР, Q_V – теплотворна здатність ВР;

M_i – маса дисків;

i – кількість дисків.

Враховуючи те, що маса двох дисків дорівнює $2 \cdot M_1$, а трьох – $3 \cdot M_1$, то

$$V_2 = \frac{V_1}{\sqrt{2}}, \quad V_3 = \frac{V_1}{\sqrt{3}}.$$

Якщо порівняти середні значення швидкостей частин дисків, розташованих на осі симетрії, які були отримані за результатами комп'ютерного моделювання (1268 м/с – 1 диск, 742 м/с – 2 диски і 540 м/с – 3 диски), то можна стверджувати, що вказана вище залежність зменшення швидкості польоту не підтверджується, а має такий характер:

$$V_2 \approx \frac{V_1}{\sqrt{3}}, \quad V_3 \approx \frac{V_1}{\sqrt{5}}.$$

Очевидно, це пов'язано з тим, що значна доля енергії вибухової речовини іде на процес пластичного деформування дисків та корпусу металного блока, що не враховувалось у формулі (1).

Також привертає увагу поведінка самих графіків швидкості (рис. 5а). Видно, що зі збільшенням кількості осколкових дисків зменшується перепад між мінімальним і максимальним значеннями швидкості в одному диску. Така поведінка повинна сформувані більш рівномірний розподіл значень швидкості в кутових зонах розльоту майбутніх осколків.

З рис. 5б можна встановити, що практично всі залежності меридіонального кута польоту φ різних частин осколкових дисків до величини $R = 40$ мм мають лінійний характер, але різний кут нахилу до лінії абсцис. Таким чином, чим менше кут нахилу, тим менше загальний кут розльоту диска. Якщо не

враховувати поведінку периферійних частин дисків (розташованих на відстані $R > 40$ мм), які мають великий рівень деформування та складають приблизно 20...25% загальної маси диска, можна зробити висновок, що найменший кут розльоту (до 10...12°) належить трьом дискам: диск 1/1, диск 2/2 та диск 3/3, тобто крайнім дискам, що не мають контакту з ВР.

Також просліджується певна залежність в поведінці даної величини для перших дисків, тобто дисків, які знаходяться в безпосередньому контакті з вибуховою речовиною.

Видно, що зі збільшенням кількості дисків в металному блоці кут розльоту перших дисків постійно зростає приблизно на 10° (диск 1/1 – $\varphi = 11,5^\circ$, диск 1/2 – $\varphi = 19,5^\circ$, диск 1/3 – $\varphi = 31,6^\circ$).

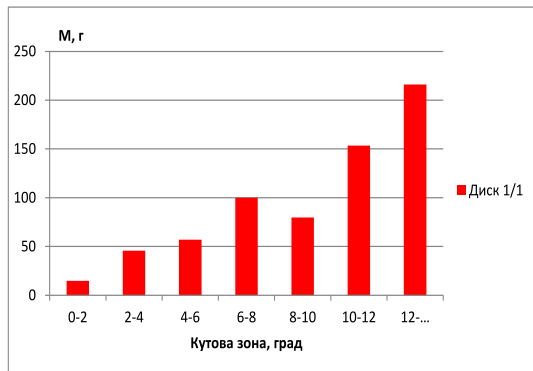
Тут слід оговорити, що під кутом розльоту розуміється кут, на який відхиляється потік осколків від осі симетрії снаряда. Якщо говорити про загальний кут розльоту, в якому будуть знаходитися всі осколки, що рухаються в осьовому напрямку, то дану величину необхідно помножити на 2.

Отримана інформація про поведінку значень швидкості та меридіонального кута розльоту вздовж радіуса дисків посередині їх товщини може бути використана для встановлення просторово-масового розподілу маси та швидкості кожного диска окремо та всіх разом за меридіональним кутом розльоту. Для цього можна використати спеціальну методику, що розроблялась саме для осколково-пучкових снарядів, яка описана у роботі [28]. Саме така інформація закладається в розрахунок величини ефективності дії осколкових боєприпасів.

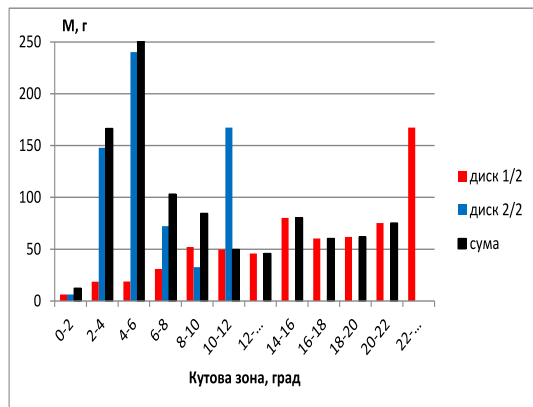
Для побудови даних діаграм були обрані 2° кутові зони розльоту. Політ частини маси дисків в напрямку 0° відповідав її руху вздовж лінії симетрії снаряда. Отримані гістограми представлені на рис. 6 та рис. 7. На даних рисунках представлені гістограми, що належать дискам, які мають контакт із зарядом вибухової речовини (диск 1/1, диск 1/2, диск 1/3). А також ті, що знаходяться одразу за першими дисками (диск 2/2 та диск 2/3) та зеленим – останній третій диск 3/3. Параметри загального просторово-масового розподілу конструкції позначені чорним кольором.

З представленої графічної інформації видно, що варіант конструкції з одним осколковим диском є найменш оптимальним з точки зору забезпечення рівномірного просторового розподілу маси. З розрахунку видно, що на фоні достатньо високих значень швидкості польоту (рис. 7а) основна маса осколкового диска, а в майбутньому після його руйнування і осколків, зміщена в район 6-12° (рис. 6а). В осьовому напрямку (до 6°) зосереджено лише 17,5% загальної маси осколкового диска.

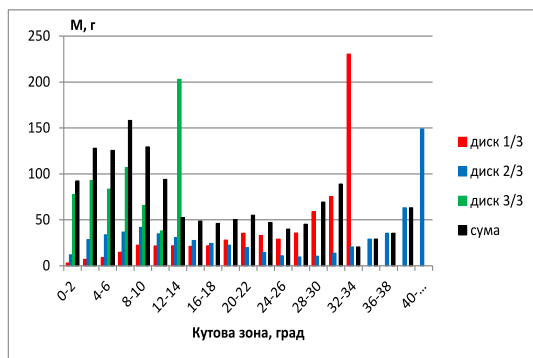
Схема металюного блока з трьома осколковими дисками є найменш ефективною. Мало того, що значення польотної швидкості понад у 2 рази менше, ніж у схеми з одним блоком, так розподіл маси дисків відбувається в куті понад 40° , що у перерахування на конус осколкового поля дає кут 80° . Але перевагою даної конструкції є те, що в діапазоні $0...10^\circ$ сумарна маса дисків, що метасться, має практично рівномірний розподіл з середнім значенням $125...130$ г на одну 2° кутову зону.



а

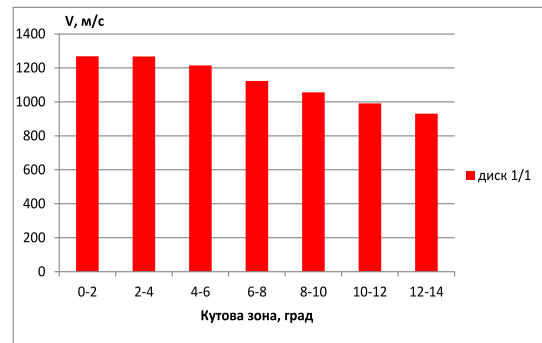


б

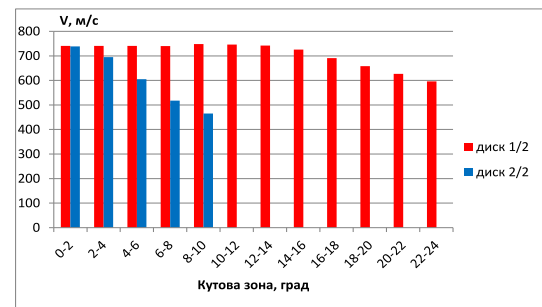


в

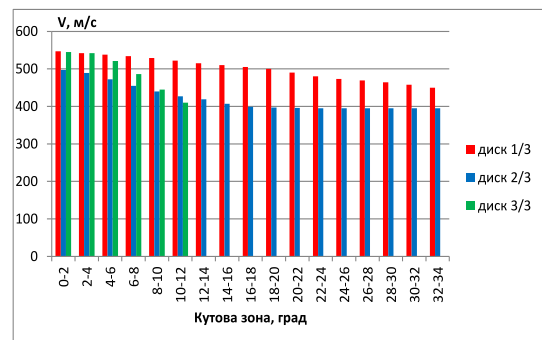
Рис. 6. Розподіл маси осколкового диска за меридіональним кутом розльоту:
а – 1 диск, б – 2 диски, в – 3 диски



а



б



в

Рис. 7. Розподіл швидкості осколкового диска за меридіональним кутом розльоту:
а – 1 диск, б – 2 диски, в – 3 диски

У подальшому автори передбачають провести додаткові як експериментальні, так і математичні дослідження з використанням відповідних математичних моделей руйнування матеріалів під дією імпульсного навантаження.

Висновки

1. З розглянутих трьох схем металюного блока саме схема з двома осколковоими дисками дає найбільш бажаний результат формування високошвидкісного вузького рівномірно заповненого масою дисків просторово-масового розподілу.

2. В кутовому діапазоні $0...8^\circ$ середнє значення швидкості польоту складає 700 м/с та знаходиться понад 40% всієї маси дисків, що розлітається.

3. За результатами досліджень було встановлено, що:

- зменшення середньої швидкості їх розльоту в $\sqrt{3}$ разів для схеми, що складається з двох дисків, і в $\sqrt{5}$ разів для схеми, що складається з трьох дисків;
- практично всі залежності меридіонального кута польоту φ різних частин осколкових дисків до величини $R = 40$ мм мають лінійний характер, але різний кут нахилу до лінії абсцис;
- зростання кута розльоту перших осколкових дисків (що мають контакт із зарядом вибухової речовини) приблизно на 10° на кожний доданий у схему осколковий диск;
- загальний кут розльоту зовнішніх дисків є найменшим з усіх дисків блока, сталою величиною не залежно від їх кількості в блоці та складає $10...12^\circ$.

Список літератури

1. Одинцов В.А. Перспективы развития осколочных боеприпасов осевого действия // Боеприпасы. – 1994. – № 3-4.
2. Одинцов В.А. Перспективные схемы танковых многоцелевых снарядов // Оборонная техника. – 1995. – № 1. – С. 40-47.
3. Молчанов Ю.С., Одинцов В.А., Сидоренко Ю.М. и др. Адаптивные осколочные снаряды осевого действия // Оборонная техника. – 1999. – № 1-2. – С. 61-68.
4. Сидоренко Ю.М. Некоторые пути повышения осколочного действия осколочно-фугасных снарядов // Артиллерийское стрелковое вооружение. – 2006. – № 1. – С. 24-29.
5. Одинцов В.А. Осколочно-пучковые снаряды // Оборонная техника. – 2006. – № 1-2. – С. 29-36.
6. Одинцов В.А. Новые виды осколочно-пучковых снарядов // Оборонная техника. – 2007. – № 3-4. – С. 30-38.
7. Одинцов В.А., Руденко Л.Н., Михайлов В.В. Осколочно-пучковый снаряд как перспективный снаряд танкового боекомплекта // Оборонная техника. – 2009. – № 1-2. – С. 21-27.
8. Одинцов В.А. Осколочно-пучковый снаряд ставит танк в нелегкие условия // Оборонная техника. – 2011. – № 2-3. – С. 24-30
9. Сидоренко Ю.М. Особенности процесса взрыва боеприпаса с осевым осколочным полем // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2006. – № 4. – С. 9-15.
10. Одинцов В.А., Долгопятова Н.Р., Туберозов В.С., Бубнов М.А., Козырев А.В. Влияние положения точки инициирования на характеристики осколочного осевого потока // Оборонная техника. – 2002. – № 1-2. – С. 53-59.
11. Одинцов В.А., Долгопятова Н.Р., Анисимов А.Ю., Бубнов М.А., Компьютерное моделирование процессов осевого метания пластин, облицовок и оболочек при различных значениях предела текучести // Оборонная техника. – 2003. – № 3-4. – С. 61-69.
12. Сидоренко Ю.М. О влиянии зазора между корпусом боеприпаса и осколочным блоком на формирование осевого осколочного поля // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2007. – № 1. – С. 20-26.
13. Деркач А.Д., Сидоренко Ю.М. О влиянии способа изготовления осколочного блока осколочно-пучкового снаряда на процесс формирования осколочного поля // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2010. – № 2. – С. 32-40.
14. Физика взрыва / С.Г. Андреев, Ю.А. Бабкин, Ф.А. Баум и др. / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – В 2 т. – Т. 1. – 832 с.
15. LLNL Explosive Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants / В.М. Dobratz, P.C. Crawford. Livermore. – California, 1985. – 541 p.
16. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: учебное пособие / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.
17. Одинцов В.А., Чудов А.А. Расширение и разрушение оболочек под действием продуктов детонации. В сб. Проблемы динамики упруго-пластических сред [Под ред. Г.С. Шапиро]. – М.: Мир, 1975. – С. 85-154.
18. Одинцов В.А., Сидоренко Ю.М., Туберозов В.С. Моделирование процесса взрыва осколочно-фугасного снаряда с помощью двумерного гидрокода // Оборонная техника. – 2000. – № 1-2. – С. 49-55.
19. Одинцов В.А., Сидоренко Ю.М. Моделирование процесса взрыва стандартного осколочного цилиндра с различной степенью детализации // Оборонная техника. – 2001. – № 1-2. – С. 17-20.
20. Сидоренко Ю.М. К вопросу о влиянии разрушения корпуса осколочно-фугасного снаряда на процесс формирования осколочного поля // Артиллерийское стрелковое вооружение. – 2009. – № 2. – С. 24-30.
21. LS-DYNA 971. Keyword user's manual. Livermore software technology corporation (LSTC), 2007. – Volume 1. – 2206 p.
22. John O. Hallquist. LS-DYNA. Theory manual. Livermore Software Technology Corporation. March 2006. – 680 p.
23. www.lstc.com
24. <http://www.ls-dyna.ru/>
25. www.ansys.com
26. Численные методы в задачах физики взрыва и удара: Учебник для втузов / А.В. Бабкин, В.И. Колпаков, В.Н. Охитин и др. [Под ред. В.В. Селиванова]. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – Т. 3. – 516 с.
27. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 379 с.: іл.
28. Сидоренко Ю.М. Особенности определения параметров зоны поражения осколочно-пучкового боеприпаса // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2007. – № 4. – С. 38-45.

Рецензент: В.М. Корольов, д.т.н., с.н.с., Академія сухопутних військ, Львів.

О ВЛИЯНИИ КОЛИЧЕСТВА ОСКОЛКОСОЗДАЮЩИХ ДИСКОВ ОСКОЛОЧНО-ПУЧКОВОГО СНАРЯДА НА ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОСЕВОГО ОСКОЛОЧНОГО ПОЛЯ

Ю.М. Сидоренко, В.В. Яковенко

В работе представлены результаты исследований по установлению параметров пространственно-массового распределения металлических дисков естественного дробления, входящих в состав осколочно-пучкового снаряда. Исследования проводились с применением численного метода компьютерного моделирования динамических нестационарных процессов в континуальной постановке с помощью LS-DYNA.

Ключевые слова: осколочный диск, метательный блок, осколочно-пучковый снаряд, моделирование процесса взрыва.

ON THE INFLUNCE OF QUANTITY OF FRAGMENT CREATING METAL LIDS OF FRAGMENTATION-BEAM SHELL ON THE VALUE OF AXIAL FRAGMENT CLOUD

Y. Sydorenko, V. Yakovenko

The article presents results of the research on definition of parameters of spacial mass distribution of natural fragmentation metal lids, that form part of fragmentation-beam shell. The research has been done using numerical method of computer modelling of dynamic nonstationary processes in continual organization supplemented by LS-DYNA.

Keywords: fragmentation disc, nonshattering unit, fragmentation-beam shell, explosion process modelling.

УДК 534.111

О.І. Хитряк¹, М.Б. Сокіл²

¹ Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

² НУ «Львівська політехніка», Львів

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ ГНУЧКИХ ДВОВИМІРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ПРИВОДУ

У статті розроблено методику дослідження резонансних коливань двовимірних гнучких елементів систем приводу. Отримано аналітичні залежності, які описують закони зміни амплітуди у зоні резонансу. Проведено аналіз впливу швидкості та нелінійних сил на значення резонансної амплітуди.

Ключові слова: нелінійні коливання, амплітуда, частота, резонанс, асимптотичний метод.

Актуальність і огляд основних результатів

Динамічні процеси у системах із розподіленими параметрами однозначно визначаються діючими силами, початковими та крайовими умовами [1, 2]. Такі задачі з урахуванням наведених вище факторів у нелінійній постановці для гнучких елементів систем приводів та транспортування (саме вони і є об'єктом досліджень роботи) є складні для розв'язання. Щоб частково подолати труднощі, пов'язані із побудовою розв'язків математичних моделей, які описують процеси у вказаних системах, використовують дещо спрощені підходи дослідження, наприклад, проводять лінеаризацію рівнянь, використовують принцип одночастотності коливань, не урахують початкові та спрощують крайові умови [3] тощо.

Такі не завжди обгрунтовані спрощення певною мірою спотворюють описання процесу. Тому метою даної роботи є розроблення на базі поєднання принципів одночастотності коливань та Ван-дер-Поля, хвильової теорії руху відносно простої методики дослідження динамічних процесів у двовимірних гнучких елементах систем приводів та транспортування. Методика враховує нелінійні, періодичні силові чинники та неоднорідні крайові умови.

Постановка задачі і методика розв'язування

Математичними моделями динамічних процесів у двовимірних гнучких елементах систем приводу та транспортування у змінних Ейлера [2] є диференціальне рівняння із частинними похідними