КРИМІНАЛІСТИЧНА ТЕХНІКА ТА МЕТОДИКА

УДК 004.942:623.565:623.451.2

Ю.М. Сидоренко,
кандидат технічних наук, доцент

ВПЛИВ ЗАМІНИ ТОВСТОСТІННОГО ОСКОЛКОВОГО ДИСКУ ОСКОЛКО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ВИБУХОВИХ ПРИСТРОЇВ НАБОРОМ ДИСКІВ МЕНШОЇ ТОВЩИНИ НА ПРОСТОРОВИЙ РОЗПОДІЛ ЇХ МАСИ ТА ШВИДКОСТІ

У роботі представлено результати математичних досліджень, метою яких було встановлення впливу заміни одного товстостінного диску природного дроблення набором з двох, трьох та чотирьох дисків однакової товщини на розподіл їх осколкової маси та її швидкості руху в кутових зонах розльоту, що формується в результаті процесу вибуху.

Ключові слова: *саморобний вибуховий пристрій, моделювання, осколки, зона ураження, експертиза, вибух, осколкове поле.*

В работе представлены результаты математических исследований, целью которых было определение влияния замены одного толстостенного диска естественного дробления набором из двух, трех и четырех дисков одинаковой толщины на распределение их осколочной массы и скорости движения в угловых зонах разлета, которое формируется в результате процесса взрыва.

Ключевые слова: *самодельное взрывное устройство, моделирование, осколки, зона поражения, экспертиза, взрыв, осколочное поле.*

The results of mathematical researches for the definition of the influence of the replacement of one thick-walled disk of natural crushing by a set from two, three and four disks of an identical thickness on the distribution of their fragmental weight and speed of the movement in angular zones of scattering which is formed as a result of an explosion process are presented.

Keywords: *improvised explosive device, modelling, splinters, defeat zone, examination, explosion, fragmentation field.*

Майже кожного дня у світі відбувається терористичний акт з використанням вибухового пристрою (ВП). Одним з найбільш небезпечних для здоров'я людини є осколкове поле, що формується або в результаті руйнування корпусу ВП, або ви-

бухового метання спеціально закладених в його конструкцію готових уражаючих елементів (гайки, шайби, цвяхи та ін.)

Під час проведення судової вибухотехнічної експертизи експерт-криміналіст повинен дати відповідь на велику кількість запитань, зокрема [1]:

– спосіб виготовлення ВП та його елементів (саморобний або промисловий);
– до якого виду належить ВП (артилерійська міна, граната та ін.);
– рівень професійної підготовки осіб, що виготовили та привели в дію ВП;
– параметри уражаючих факторів вибуху, в тому числі осколкового.

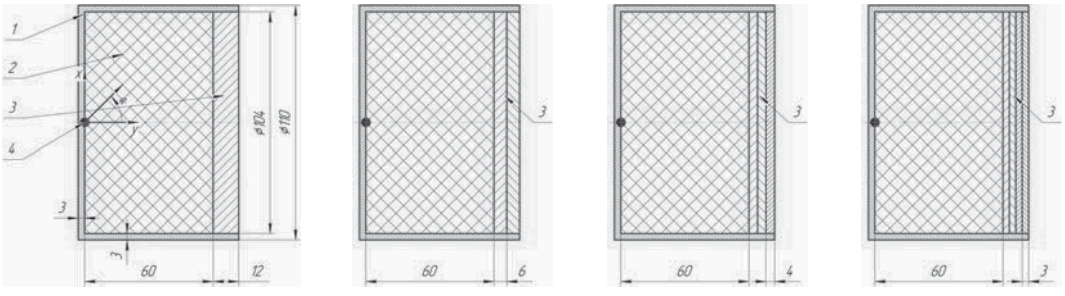
Для отримання відповідей на ці питання використовуються різноманітні математичні апарати та експериментальні методи досліджень. Оскільки вартість проведення таких експериментів досить висока, пов'язані вони з підвищеним рівнем небезпеки для експерта, а також не завжди є технічна можливість їх проведення, тому все частіше застосовуються методи комп'ютерного моделювання.

Використання таких методів дозволяє експерту-криміналісту проводити дослідження з метою встановлення рівня небезпеки як військових [2], так і саморобних вибухових пристроїв (СВП). Крім того, після проведення такого аналізу та складання відповідної бази даних для штатних військових боєприпасів, експерту стає легше проводити роботу з реконструкції невідомих вибухових пристроїв за відомими наслідками їх вибуху.

Наприклад, під час дослідження особливостей процесу вибухового метання осколкоутворюючих дисків товщиною 10 мм кожний [3], було встановлено, що при збільшенні їх кількості до трьох у діапазоні меридіонального кута розльоту 0...10° розподіл їх сумарної маси є практично рівномірним і становить в середньому 125...130 г на одну 2° кутову зону. Якщо такий результат буде зафіксований на місті пригоди, то це може вказувати на один із способів виготовлення конструкції СВП.

У цій роботі представлені результати математичних досліджень, метою яких було встановлення впливу заміни одного товстостінного диску природного дроблення набором з двох, трьох та чотирьох дисків однакової товщини на розподіл їх осколкової маси та її швидкості руху в кутових зонах розльоту, що формується в результаті процесу їх вибухового метання.

Розрахункові схеми конструкцій метального блоку (моделі СВП), що досліджувалися, представлені на рис. 1.



а) б) в) г)

Рис. 1. Розрахункові схеми конструкцій метального блока (моделі СВП) з осколковими дисками природного дроблення: а) одним, б) двома, в) трьома, г) чотирма.
1 – корпус, 2 – заряд вибухової речовини, 3 – осколковий диск (диски),
4 – місце ініціації детонації заряду вибухової речовини.

Усі представлені на рис. 1 конструкції мають циліндричний корпус 1 товщиною стінки 3 мм із закритим дном. Діаметр його зовнішньої поверхні становить 110 мм. У середині корпусу 1 розміщується заряд вибухової речовини 2 (ВР) вибухова суміш Н-6 (RDX-40 % (гексоген), TNT-30 % (тринітротолуол), Al-20 %, Wax-10 % (пластифікатор)) густиною ρ=1760 кг/м^3, швидкістю детонації D=7470 м/с, тиском на фронті детонаційної хвилі P_{CJ} = 29 ГПа.

У місці контакту торцевої поверхні заряду ВР та внутрішньої поверхні дна корпусу на їх вісі симетрії знаходиться точка ініціації детонації 4. У контакті з протилежним торцем заряду ВР знаходиться або один диск 3 товщиною 12 мм (рис. 1а), або два диски товщиною 6 мм кожний (рис. 1б), три диски товщиною 4 мм (рис. 1г) або чотири (рис. 1в) диски природного дроблення товщиною 3 мм кожний. Величина повітряного зазору між дисками становила 0,1 мм.

Для розв'язання поставленої задачі використовувався метод математичного скінченно-елементного моделювання за допомогою комп'ютерної програми ANSYS/LS-DYNA [4–8].

У програмі реалізована більшість на сьогодні відомих підходів до опису поведінки суцільного середовища під дією імпульсного навантаження [9, 10].

З огляду на те, що під час розв'язання поставленої проблеми потрібно буде математично описувати поведінку як газоподібного середовища (продукти детонації (ПД) та повітря), так і твердого матеріалу – металеві корпус та диски, то доцільно комп'ютерне моделювання проводити з використанням змішаного лагранжево-ейлерового підходу.

Розширення корпусу метального блоку та процес деформування осколкового диску (дисків) під час його метання продуктами детонації описувалось у рамках континуальної моделі, тобто математична модель не врахувала будь-які процеси руйнування. Правомірність застосування такого підходу на етапі встановлення значень кінематичних параметрів осколкового поля показано в роботах [11–12].

У математичній моделі задачі розширення продуктів детонації ПД заряду ВР описувались за допомогою рівняння стану у формі Джонса-Уілкінса-Лі (JWL):

$$p = A\cdot\left(1-\frac{\omega}{R_1\cdot V}\right)\cdot e^{-R_1\cdot V} + B\cdot\left(1-\frac{\omega}{R_2\cdot V}\right)\cdot e^{-R_2\cdot V} + \frac{\omega\cdot E_0}{V},$$

де p, E_0, V – відповідно тиск, внутрішня енергія та відносний об'єм ПД.

Значення коефіцієнтів рівняння обирались відповідно до [13, 14].

Стан повітря з початковим значенням густини ρ_0=1,26 кг/м^3 описувався за допомогою рівняння стану у формі лінійного поліному:

$$p = C_0 + C_1\cdot\nu + C_2\cdot\nu^2 + C_3\cdot\nu^3 + \left(C_4 + C_5\cdot\nu + C_6\cdot\nu^2\right)\cdot E_0,\ \nu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

де p, E_0, ρ, ρ_0 – відповідно тиск, внутрішня енергія і поточне та початкове значення густини повітря. Коефіцієнти цього рівняння обирались згідно з рекомендаціями [9].

Для матеріалу корпусу метального блока та осколкового диску (дисків) була обрана сталь 20, поведінка якої описувалось за допомогою реологічної

пружно-пластичної моделі з кінематичним зміцненням PLASTIC-KINEMATIC, що має такі параметри: ρ=7850 кг/м^3, E=210 ГПа, μ=0,33, $\sigma_т$=288 МПа, E_t=1 ГПа.

Була побудована тривимірна скінченно-елементна модель задачі, яка містила $^1/_4$ частину метального блока з накладеними на її вузли відповідними граничними умовами. Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибуху метального блока, що має у своїй конструкції два і чотири диски товщиною 6 мм та 3 мм відповідно зображені на рис. 2.

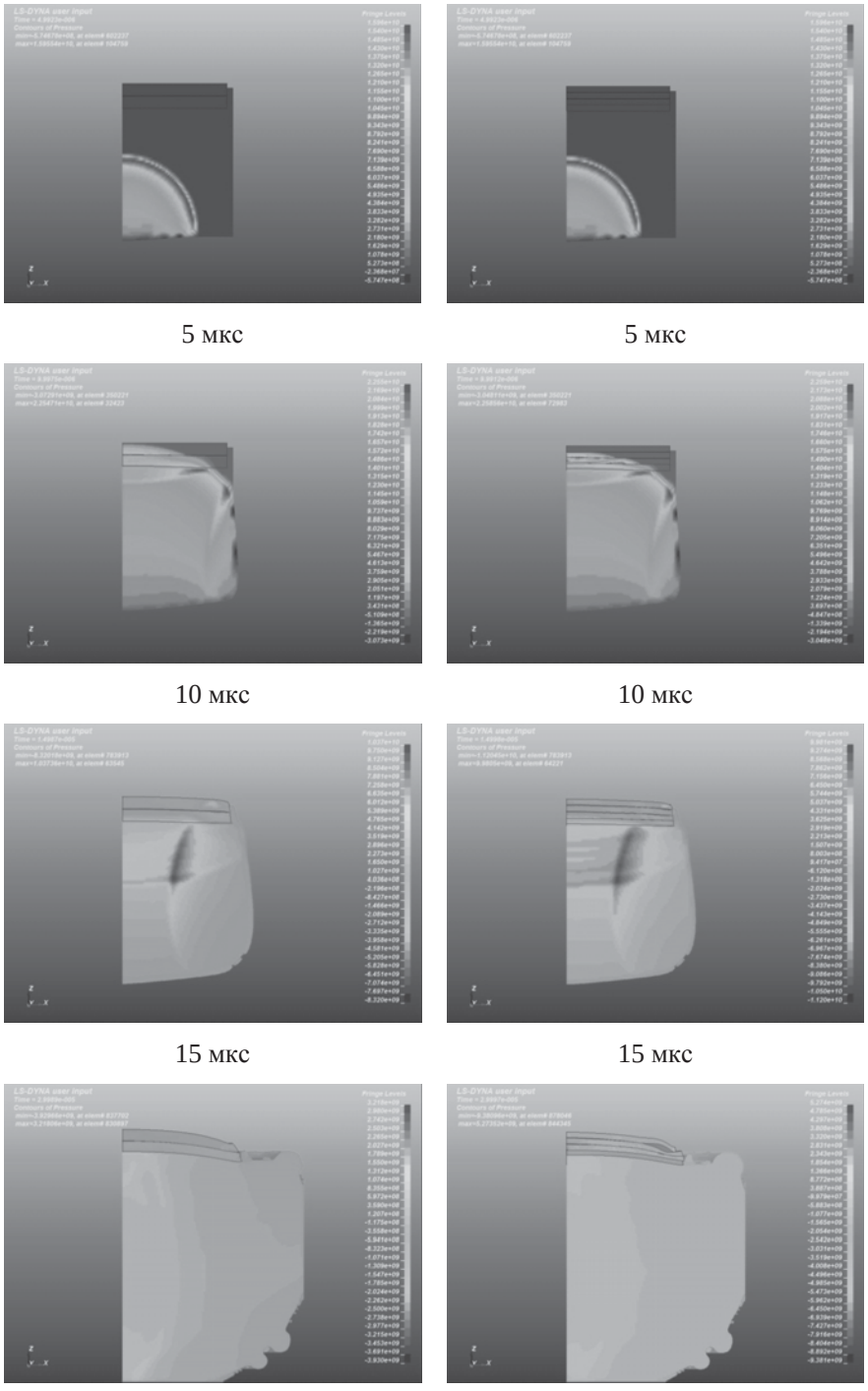


Рис. 2. Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибухового метання двох (а) осколкових дисків товщиною 6мм та чотирьох (б) товщиною 3 мм

На рис. 2 можна спостерігати основні стадії процесу вибухового метання осколкових дисків. На 5 мкс з моменту детонації заряду ВР детонаційна хвиля (ДХ) проходить приблизно половину його висоти. При проходженні ДХ вздовж внутрішньої поверхні дна корпусу метального блоку в його товщини формується система ударних хвиль стискання та розрідження. Під час проходження заряду ВР ДХ відбивається від внутрішньої поверхні корпусу і першого (внутрішнього) осколкового диску. В результаті цього відбиття у стінці корпусу формується аналогічна система ударних хвиль, як й у його донній частині з додатковим формування двох ударних хвиль стискання в ПД. Одна з них рухається в радіальному напрямку до вісі симетрії конструкції, інша – в осьовому до точки ініціації детонації 4 заряду ВР (рис. 2, 10 мкс). Крім того, в результаті відбиття ДФ від внутрішньої поверхні осколкового диску в ньому формується ударна хвиля стискання, яка на 10 мкс проходить усю товщину двох дисків товщиною 6 мм (рис. 2а), і формується тільки в четвертому в результаті його зіткнення з третім (середнім) диском.

У подальшому, розвиток описаних хвильових процесів призводить до передачі дискам певного значення швидкості руху з одночасним їх деформуванням.

Для знаходження розподілу осколкової маси дисків, що метаються вибухом, за меридіональним кутом розльоту використовувалась методика, що описана в роботі [15], в якій замість маркерів спеціально розміщених у радіальному напрямку по середині товщині дисків використовувалась інформація про зміну значень кута польоту відповідних вузлів лагранжевої скінченно-елементної сітки дисків. Розподіл сумарної осколкової маси дисків, що входять до складу метального блоку за 2° меридіональними кутовими зонами, представлений на рис. 3. Відлік кутових зон починається від променя, який виходить з центру ваги блоку, проходить вздовж його вісі симетрії та вказує на напрямок руху дисків.

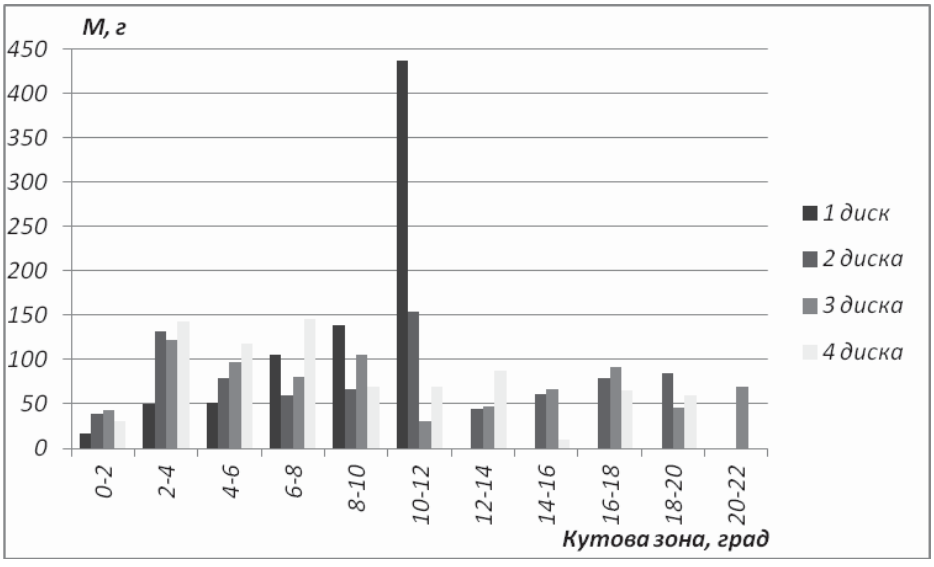


Рис. 3. Розподіл сумарної маси дисків за меридіональним кутом розльоту

З рис. 3 видно, що найменше значення кута розльоту має схема конструкції, що містить лише один 12 мм осколковий диск та становить 12°. Тут слід зазначити, що у зв'язку з тим, що всі розглянуті конструкції метального блоку мають осьову симетрію, то представлений на рис. 3 розподіл описує рух осколкової маси лише

в одній його півсфері розльоту. Для встановлення значення меридіонального кута розльоту всієї конструкції необхідно отримані розрахункові значення помножати на 2. Тобто повна осколкова маса товстостінного диску буде зосереджена в середині конусу розльоту зі значенням кута при вершини – 12х2=24°.

Але розподіл його маси в середині цього кута є дуже нерівномірним. Більша частина маси диска (55 % від 800 г) знаходиться лише в одній крайній кутовій зоні 10–12°. Заміна його на два, три та чотири осколкових диски меншої товщини призвело до зростання кута розльоту до 22°, що в перерахунку на повний конус розльоту становить 44. Таке збільшення значення кута супроводжувалось відповідним перерозподілом маси дисків за напрямком розльоту. З даних, представлених на рис. 3, можна зробити висновок, що дві схеми конструкції метального блоку в яких осьове осколкове поле утворюється за рахунок вибухового метання та руйнування трьох 4 мм (рис. 1в) та чотирьох 3 мм (рис. 1г) осколкових дисків мають приблизно однаковий розподіл їх маси за меридіональним кутом розльоту. З метою кількісного порівняння отриманих даних розподілу маси всіх конструкцій була проведена їх математична обробка по всім кутовим зонам розльоту цієї конструкції блоку та в проміжку 0–12°:

– середнє значення сумарної маси дисків;

– максимальне та середнє відхилення сумарної маси дисків від середнього значення.

Таблиця 1

Середнє значення сумарної маси дисків та її максимальне і середнє відхилення від середнього значення

Кутові зони	Параметр		Кількість та товщина осколкових дисків			
			1х12mm	2х6mm	3х4mm	4х3mm
Всі	середнє значення		133,30	79,98	72,71	79,98
	відхилення	максимальне	303	73,95	48,83	65,97
		середнє	103,17	26,10	24,27	35,11
0–12°	середнє значення		133,30	88,48	79,76	96,21
	відхилення	максимальне	303	65,45	41,58	49,74
		середнє	103,17	36,42	28,57	39,72

За результатами розрахунків (табл. 1) можна зробити висновок, що конструкція метального блоку в якій замість одного товстостінного осколкового диску встановлюється 3 диски товщиною 4 мм кожний має найменші значення практично всіх параметрів. Це вказує на те, що ця конструкція створює більш рівномірне заповнення осколковою масою не тільки вузького кутового діапазону 0–12°, який характерний схемі з одним товстостінним диском, а й всіх своїх кутових зон розльоту від 0 до 22. Крім того, слід констатувати, що зростання маси в кутових зонах, що знаходяться в діапазоні 0–12° при збереженні максимального кута розльоту на рівні 12° (в перерахунку на конус розльоту – 24°) не відбулося. Збільшення маси в цьому секторі відбувається за рахунок

майже двократного збільшення загального кута розльоту і становить в кутових зонах: 0–2° – 2,6 рази, 2–4° – 2,4 рази , 4–6° – 1,9 рази. При чому в кутових зонах 6–8° та 8–10° відбулось невелике зменшення маси в середньому на 25 %.

Представлений на рис. 3 масовий розподіл є інтегральною інформацією. Для встановлення причини формування даних інтегральних значень можна скористатися інформацією про внесок кожного осколкового диску в кожну кутову зону.

Для цього з метою полегшення обробки та аналізу такого розподілу була введена нумерація дисків. Диску, який мав безпосередній контакт з ВР, призначався № 1. В залежності від кількості дисків, які знаходились у середині метального блоку замість одного товстостінного, до номеру диска додавався відповідний індекс кількості дисків. Наприклад, для схеми блоку, що складається з трьох дисків, представленої на рис. 1в, диск, що має контакт з ВР, буде позначатися “диск 1/3”, середній – “диск 2/3” і крайній наріжний – “диск 3/3”.

Відповідні результати про внесок кожного осколкового диску в загальне значення осколкової маси в кутовій зоні розльоту наведені в табл. 2. Ця величина визначалась як доля (%) маси диску в кутовій зона від сумарної маси дисків у метальному блоці, що дорівнювала 800 г.

Таблиця 2

Внесок (%) осколкових дисків в загальне значення осколкової маси в кутовій зоні розльоту

Кутова зона, град.	Товщина та номер осколкового диску												
	12мм	6мм			4мм				3мм				
	Всього	диск 1/2	диск 2/2	Всього	диск 1/3	диск 2/3	диск 3/3	Всього	диск 1/4	диск 2/4	диск 3/4	диск 4/4	Всього
0–2	2,1	0,5	4,4	4,9	0,2	1,6	3,6	5,3	0,3	0,1	0,3	3,2	3,9
2–4	6,2	1,4	15,1	16,5	0,7	4,1	10,5	15,2	1,0	3,8	4,8	8,3	17,9
4–6	6,5	2,2	7,7	9,9	1,1	7,8	3,3	12,2	1,5	4,9	4,7	3,7	14,8
6–8	13,2	2,7	4,7	7,4	1,5	2,6	6,0	10,0	2,2	3,0	3,4	9,7	18,2
8–10	17,3	4,6	3,8	8,4	1,7	1,5	10,0	13,2	3,7	3,0	2,0		8,7
10–12	54,7	5,1	14,2	19,2	2,3	1,6		3,9	6,7	1,1	0,9		8,6
12–14		5,6		5,6	3,0	2,9		5,8	9,8	0,5	0,7		11,0
14–16		7,6		7,6	3,8	4,6		8,4		0,4	0,8		1,3
16–18		9,9		9,9	4,7	6,8		11,5		0,7	7,5		8,1
18–20		10,5		10,5	5,7			5,7		7,5			7,5
20–22					8,7			8,7					

З табл. 2 видно, що основний внесок в підсумкове значення маси в перших 6 кутових зонах (0–12°) роблять крайні наріжні диски (2/2, 3/3, 4/4). При чому значення їх кута розльоту не тільки не зростає при збільшенні кількості дисків у метальному блоці, а прослідковується тенденція до його зменшення з 12 до 8° у конструктивній схемі блока з чотирма дисками товщиною 3 мм кожний. Схожа поведінка значення кута розльоту крайніх дисків спостерігалась при дослідженнях процесу вибуху аналогічного метального блоку в якому замість заміни одного товстостінного диска набором дисків меншої товщини зростала їх кількість [3].

Для оцінки рівня небезпеки дії осколкового поля СВП, крім розподілу осколкової маси за меридіональним кутом розльоту, потрібна інформація про

розподіл її швидкості руху. Відповідні гістограми для різних схем метального блоку, що розглядалися, представлені на рис. 4.

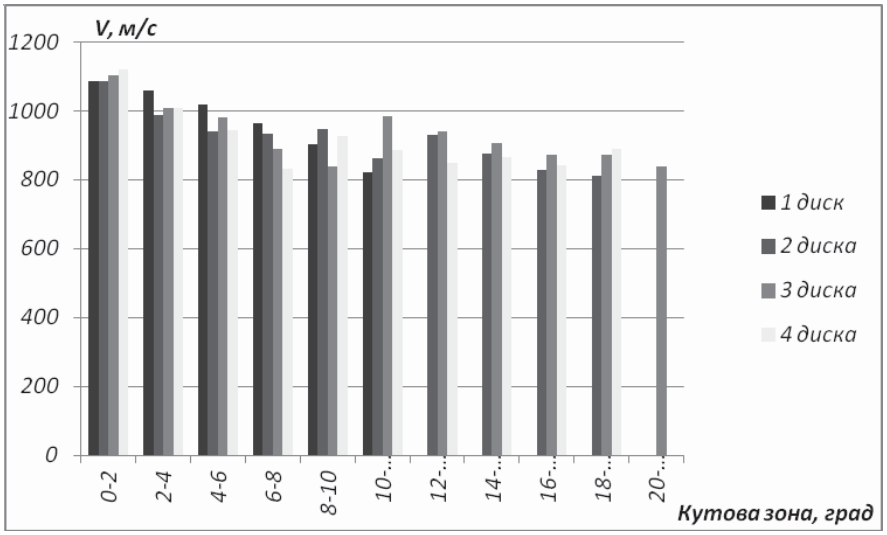


Рис. 4. Розподіл швидкості руху сумарної маси дисків за меридіональним кутом розльоту

З рис. 4 видно, що розподіл швидкості руху сумарної маси дисків по кутових зонах розльоту практично однаковий, якщо не враховувати її розподіл на різну кількість зон. Така поведінка є очікуваною. Це пов'язано з тим, що під час заміни одного товстостінного диска набором дисків меншої товщини їх сумарна маса залишалась незмінною.

Крім того, представлені на рис. 3 та рис. 4 розподіли маси та її швидкості руху відкривають новий напрям керування ними шляхом надання диску відповідної геометричної форми. У зв'язку з тим, що в центральних кутових зонах 0–2°, 2–4° знаходиться відносно мала доля загальної маси дисків, що розлітається, а швидкість руху її в цих зонах найвища, то збільшивши товщину дисків в центрі і зменшивши її на краях, можна очікувати формування вузького високошвидкісного рівномірно заповненого осколковою масою осьового осколкового поля.

Висновки

1. Найменше значення кута розльоту має схема конструкції метального блоку, що містить лише один 12 мм осколковий диск та становить 12°, але розподіл його маси в середині цього кута є дуже нерівномірним.

2. Конструкція метального блоку в якій замість одного товстостінного осколкового диску товщиною 12 мм встановлюється 3 диски товщиною 4 мм кожний на тлі збільшення загального кута розльоту осколкові маси до 22° має практично рівномірний її розподіл в середині цього кута.

3. Основний внесок в підсумкове значення маси осколкових дисків природного дроблення, що рухається в перших 6 кутових зонах (0–12°), роблять крайні наріжні диски метального блоку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Прохоров-Лукін Г.В.* Методика комплексного дослідження вибухових пристроїв, вибухових речовин і слідів вибуху / Прохоров-Лукін Г.В., Пащенко В.І., Биков В.І. та ін. – К. : МЮ України, МВС України, 2007. – 218 с.

2. *Пащенко В.І.* Доцільність використання методів комп'ютерного моделювання процесу вибуху осколково-фугасних боєприпасів при проведенні судової вибухотехнічної експертизи / Пащенко В.І., Сидоренко Ю.М. // Сучасна спеціальна техніка. – 2012. – № 3. – С. 102–112.

3. *Сидоренко Ю.М.* Особливості процесу вибухового метання осколкоутворюючих дисків, що входять до складу осколково-пучкового снаряду / Ю.М. Сидоренко // Збірник наукових праць Академії ВМС імені П.С. Нахімова. – 2012. – Вип. 1(9). – С. 86–99.

4. LS-DYNA 971. Keyword user's manual. Livermore software technology corporation (LSTC), 2007. – Vol. 1. – 2206 p.

5. *John O. Hallquist.* LS-DYNA. Theory manual. Livermore Software Technology Corporation, March 2006. – 680 p.

6. www.lstc.com.

7. http : // www.ls-dyna.ru/.

8. www.ansys.com.

9. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA : учеб. пособ. / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.

10. *Рудаков К.М.* Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій : навч. посіб. / К.М. Рудаков. – К. : НТУУ "КПІ", 2007. – 379 с. : іл.

11. *Одинцов В.А.* Моделирование процесса взрыва стандартного осколочного цилиндра с различной степенью детализации / Одинцов В.А., Сидоренко Ю.М. // Оборонная техника. – 2001. – № 1–2. – С. 17–20.

12. *Сидоренко Ю.М.* К вопросу о влиянии разрушения корпуса осколочно-фугасного снаряда на процесс формирования осколочного поля / Ю.М. Сидоренко // Артиллерийское стрелковое вооружение. – 2009. – № 2. – С. 24–30.

13. Физика взрыва : в 2 т. / С.Г. Андреев, Ю.А. Бабкин, Ф.А. Баум и др. ; под ред. Орленко Л.П. – Изд. 3-е, перераб. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – Т. 1. – 832 с.

14. LLNL Explosive Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants / B.M. Dobratz, P.C. Crawford. Livermore. – California, 1985. – 541 p.

15. *Сидоренко Ю.М.* Особенности определения параметров зоны поражения осколочно-пучкового боеприпаса / Ю.М. Сидоренко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2007. – № 4. – С. 38–45.

Отримано 23.11.2012