

## Дослідження процесу вибухового метання двох осколкових дисків змінної товщини

В.В. Фепа<sup>1</sup> • Ю.М. Сидоренко<sup>1</sup> • В.В. Яковенко<sup>2</sup>

1- КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна;

2- Національна академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, Україна

Received: 3 October 2017 / Accepted: 15 November 2017

**Анотація.** В роботі описані результати досліджень процесу вибухового метання набору осколкових дисків природного дроблення зарядом вибухової речовини. Даний набір складався з двох дисків різної товщини але фіксованої сумарної маси. Дослідження проводилися методом комп'ютерного моделювання ударно-вибухових процесів у континуальній постановці за допомогою програми ANSYS/LS-DYNA. Визначено вплив порядку встановлення дисків різної товщини на значення кута розльоту осколкової маси та освової швидкості її руху.

**Ключові слова:** Вибухо-технічна експертиза, чисельне моделювання, вибух, саморобний вибуховий пристрій, осколкове поле

### Вступ

Практично кожен день в світі відбувається терористичний акт з використанням вибухового пристрою (ВП). Одним з найбільш небезпечних факторів, що впливають на здоров'я людини, є осколкове поле. Дане поле формується або в результаті руйнування корпусу ВП, або в результаті 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 питань, зокрема [1]:

- спосіб виготовлення ВП та його елементів (саморобний або промисловий);
- до якого виду належить ВП (арт. міна, граната та ін.);
- рівень професійної підготовки осіб, що виготовляли та приводили в дію ВП;
- параметри уражаючих факторів вибуху, в тому числі осколкового та інші.

На сьогодні, як правило, для отримання відповідей на такі питання використовуються різноманітні експериментальні методи досліджень. Оскільки вартість проведення таких експериментів досить висока та пов'язані вони з підвищеним рівнем безпеки для експерта, а іноді не завжди є технічна можливість в їх проведенні, то все частіше застосовуються математичні методи, зокрема комп'ютерного моделювання [2].

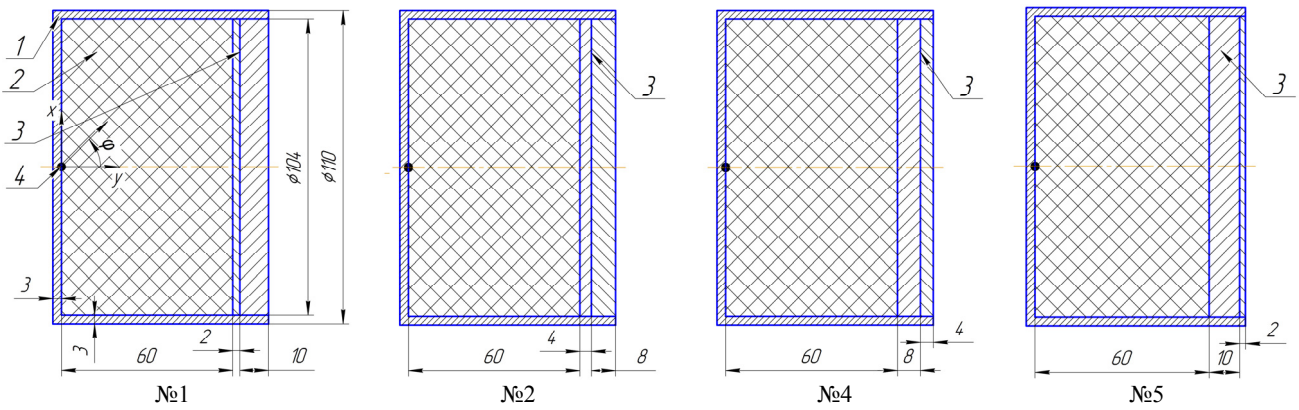
Використання таких методів дозволяє експерту-криміналісту встановлювати рівень безпеки як військових, так і саморобних вибухових пристроїв (СВП). Склавши відповідну базу даних експерту стає легше проводити роботу з реконструкції невідомих вибухових пристроїв за відомими наслідками їхнього вибуху.

### Постановка задачі

В даній роботі представлені результати математичних досліджень встановлення небезпечної зони осколкового ураження (величини швидкості руху та кута розльоту осколкової маси) ВП, що містить у своїй конструкції два осколкових диска змінної товщини. Розрахункові схеми конструкцій металевих блоку, що досліджувалися, зображені на рис. 1.

### Основний матеріал дослідження

Всі представлені на рис. 1 конструкції мають циліндричний корпус 1 товщиною стінки 3 мм із закритим дном. Діаметр його зовнішньої поверхні становить 110 мм. В 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  $\rho=1760$  кг/м<sup>3</sup>, швидкістю детонації  $D=7470$  м/с, тиском на фронті детонаційної хвилі  $P_{CJ}=29$  ГПа.



**Рис. 1. Розрахункові схеми конструкцій металевго блока з осколковими дисками природнього дроблення:**  
**№1, 2-10 мм, №2, 4-8 мм, №4, 8-4 мм, №5, 10-2 мм**  
**1 – корпус, 2 – заряд вибухової речовини, 3 – осколкові диски,**  
**4 – місце ініціації детонації заряду вибухової речовини**

В місці контакту торцевої поверхні заряду ВР та внутрішньої поверхні дна корпусу на їх осі симетрії знаходиться точка ініціації детонації 4. В контакт з протилежним торцем заряду ВР знаходиться осколковий диск природнього дроблення.

Схема №1 з умовною назвою "2-10мм" означає, що в контакт із зарядом ВР знаходиться диск товщиною 2 мм (внутрішній диск). За ним встановлений диск товщиною 10 мм (зовнішній диск). Аналогічний принцип позначень використовується і для інших розрахункових схем. Схема №2 – "4-8мм". Внутрішній диск товщиною 4 мм, зовнішній – 8мм і т.д. Схема №3 – "6-6мм", на рис. 1 не показана. Процес формування кута розльоту та швидкості руху осколкової маси даної схеми досліджено в роботах [3, 4].

Для розв'язання поставленої задачі використовувався метод математичного скінченно-елементного моделювання та комп'ютерна програма "ANSYS/LS-DYNA". Враховуючи те, що під час розв'язання поставленої проблеми потрібно математично описувати поведінку як газоподібного середовища (продукти детонації (ПД) та повітря), так і твердого матеріалу – металеві корпус та диски, то комп'ютерне моделювання проводилося з використанням змішаного лагранжево-ейлерового підходу [5-7].

Розширення корпусу металевго блока та процес деформування осколкових дисків під час їхнього метання продуктами детонації описувалося в 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 [8, 9].

В математичній моделі задачі розширення продуктів детонації заряду ВР описувалося 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 даного рівняння бралися в роботах [10, 11].

Поведінка повітря з початковим значенням густини  $\rho_0 = 1,26 \text{ кг/м}^3$  описувалося за допомогою рівняння стану у формі лінійного поліному:

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

де  $p$ ,  $E_0$ ,  $\rho$ ,  $\rho_0$  – відповідно тиск, внутрішня енергія і поточне та початкове значення густини повітря. Коефіцієнти даного рівняння обиралися згідно рекомендацій [6].

Корпус металевго блока та осколкових дисків виготовлявся зі сталі 20. Їхня поведінка під дією імпульсного навантаження описувалася рівняннями пластичної течії Прандтля-Рейсса за допомогою реологічної пружно-пластичної моделі з кінематичним зміцненням "PLASTIC-KINEMATIC". Для цього використовувалися такі параметри:  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ ,  $E = 210 \text{ ГПа}$ ,  $\mu = 0,33$ ,  $\sigma_i = 288 \text{ МПа}$ ,  $E_i = 1 \text{ ГПа}$ .

Наявність у металевго блока осової геометричної симетрії дозволяє дещо спростити його математичну 3D модель. В розрахунок закладається лише 1/4 частина блока з накладеними на неї відповідними граничними умовами. Побудова скінченно-елементної моделі задачі проводилася з використанням 8-вузловий скінченного елемента SOLID164, що має форму гексаедра.

На рис. 2 показано кадри комп'ютерного моделювання процесу вибуху металевго блока виготовленого за схемою №2.

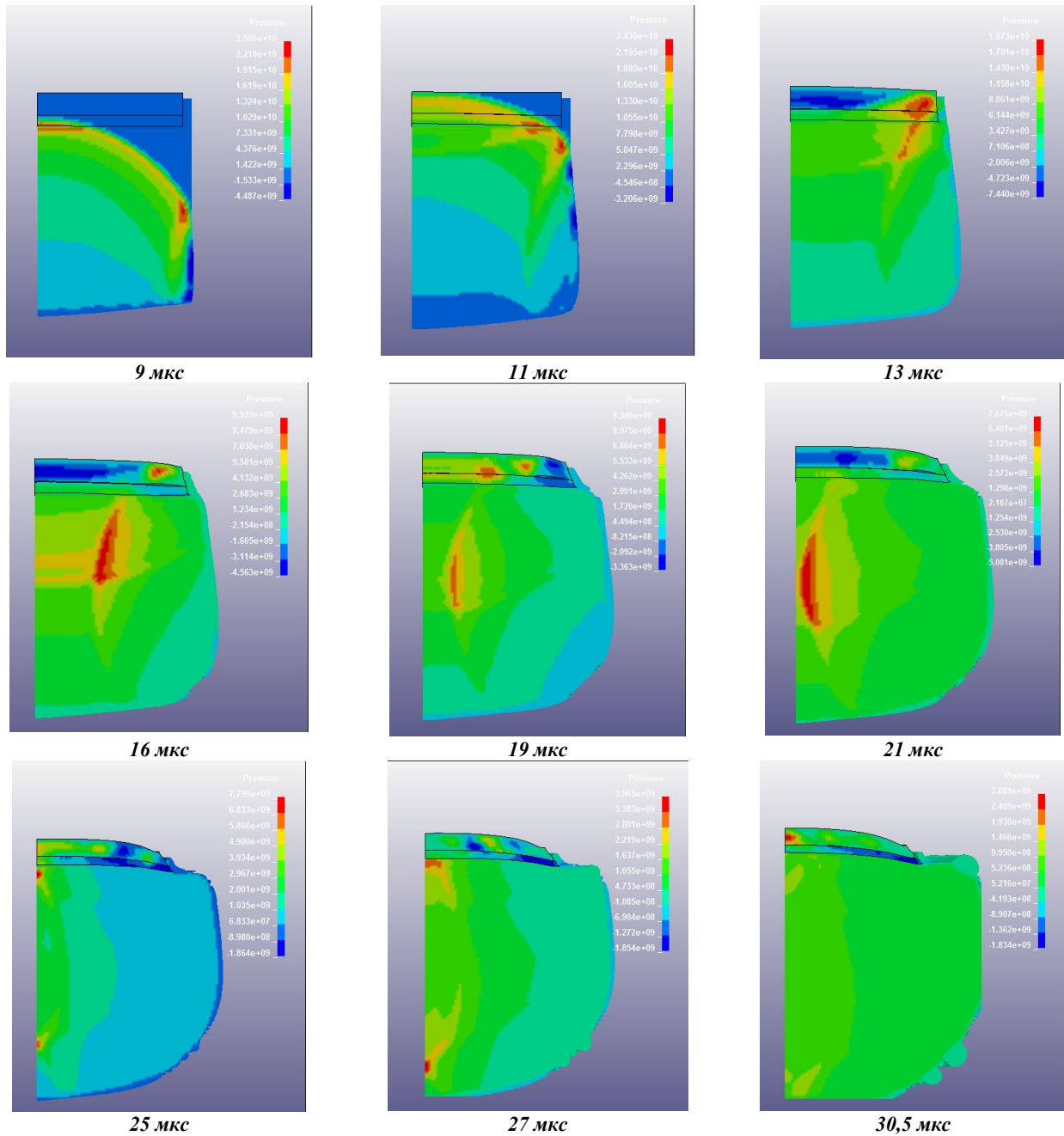


Рис. 2. Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибухового метання двох сталевих осколкових дисків за схемою №2

На рис. 2 можна спостерігати основні стадії процесу вибухового метання осколкових дисків, а також характерні для кожної схеми хвильові процеси як в продуктах детонації, так і в металевих корпусі блока і диска.

На 9 мкс з моменту детонації заряду ВР починається процес відбиття детонаційного фронту (ДФ) від внутрішньої поверхні першого осколкового диску. В результаті даного відбиття ДФ в ПД формується ударна хвиля стиску, яка починає рухатись в протилежному ДФ напрямку, а в диску формується ударна хвиля стиску, яка надає йому певне переміщення. Такий результат можна спостерігати на графіках зміни значень радіальної та осової компонент швидкості руху різних частин дисків, представлених на рис. 3, 4. Для полегшення сприйняття розрахункової інформації в роботі використовувалася наступна нумерація. Диски, які знаходяться в безпосередньому контакті з вибуховою речовиною, мають перший номер та позначатимуться як диск 1/2(№1), де (№1) – номер схеми металого блока. Наступний зовнішній диск позначається як диск 2/2(№1). Аналогічний принцип застосовувався для дисків схем №2, №4 і №5.

Крім того, під поведінкою різних частин дисків розуміється поведінка вузлів скінченно-елементної сітки дисків розташованих по середині їхньої товщини з кроком 5 мм від осі симетрії – "0мм" до практично торцевої поверхні дисків – "50 мм".

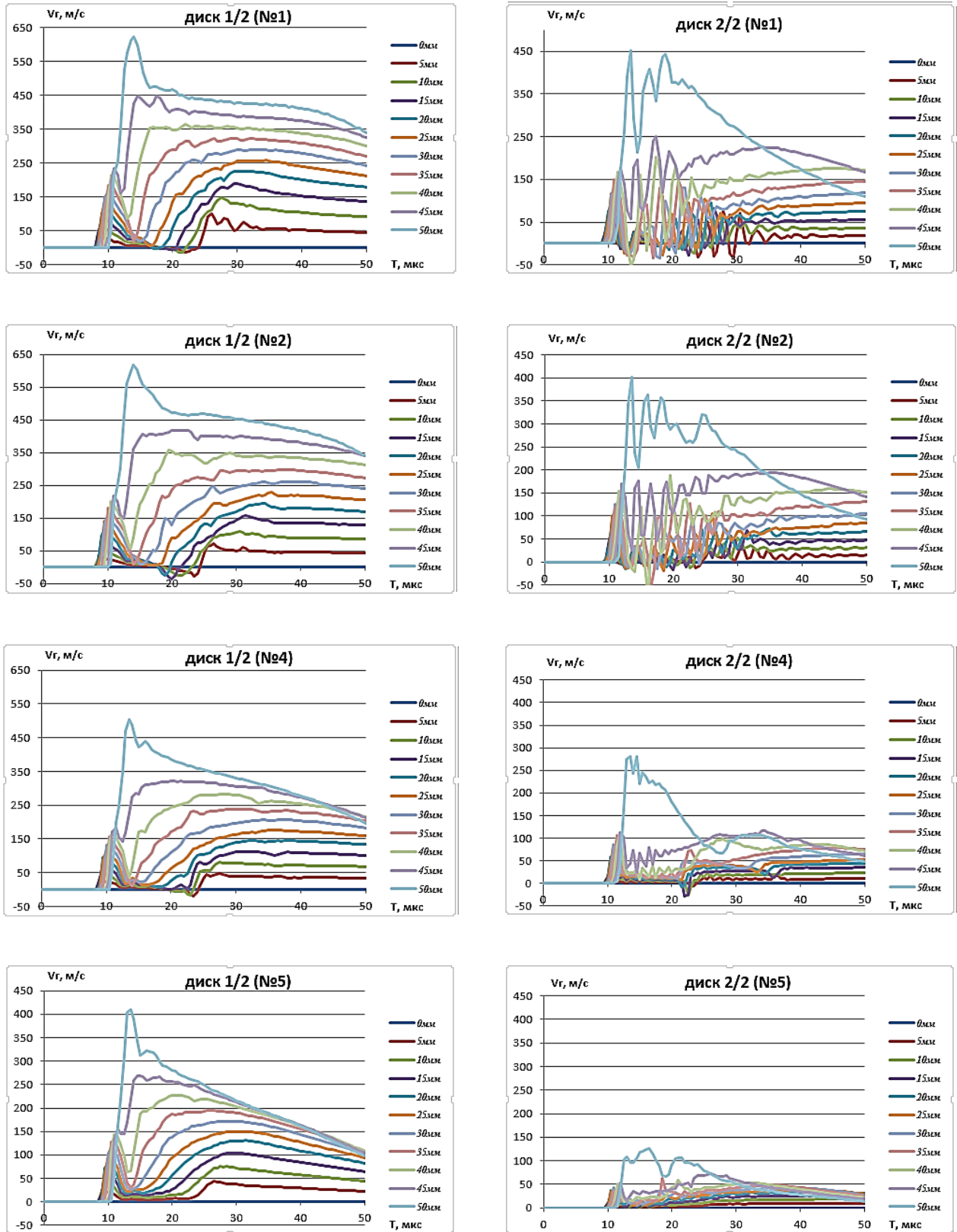


Рис. 3. Графіки зміни значень радіальної ( $V_r$ ) компоненти швидкості руху різних частин осколкових дисків в процесі вибухового навантаження

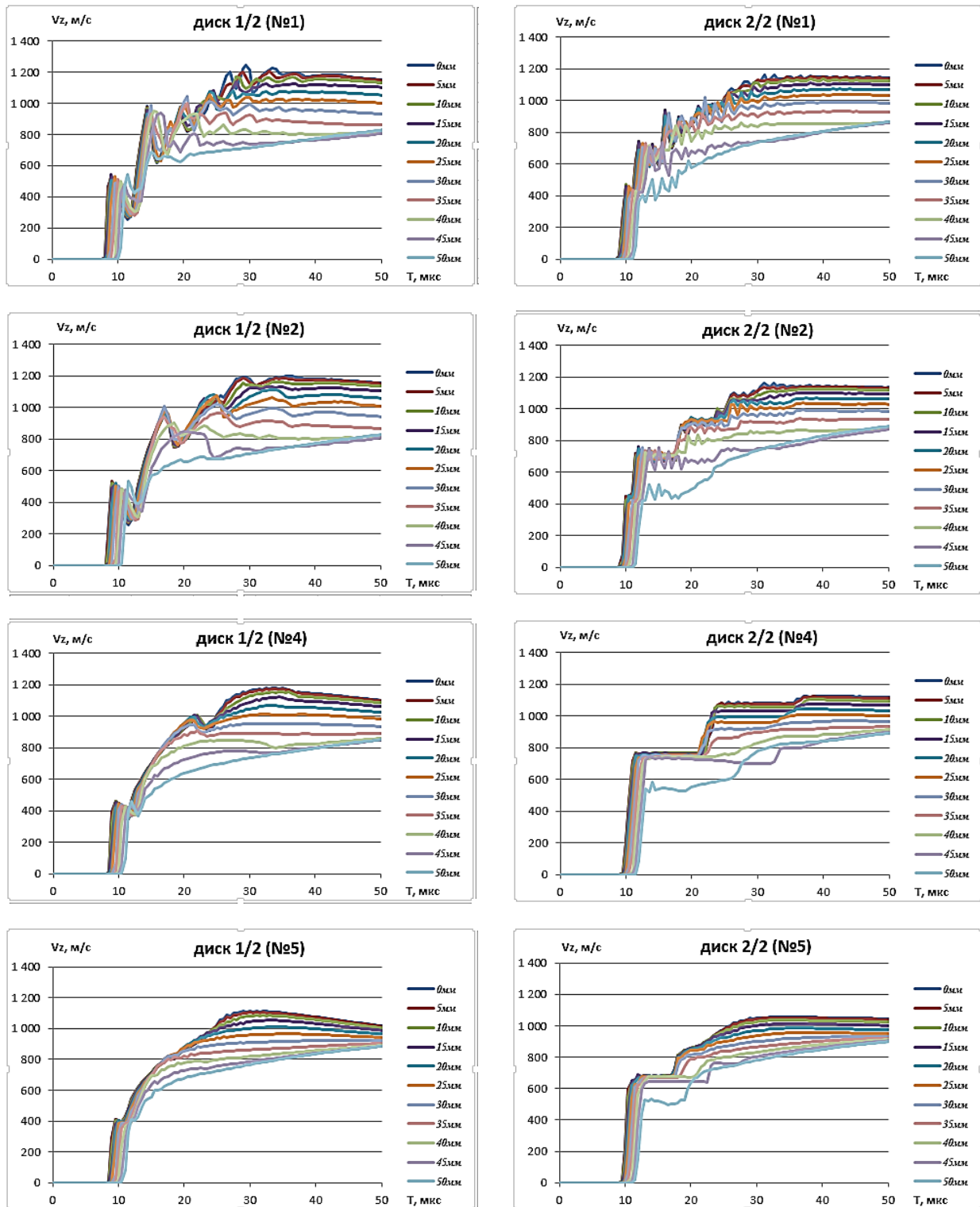


Рис. 4. Графіки зміни значень осьової ( $V_z$ ) компоненти швидкості руху різних частин осколкових дисків в процесі вибухового навантаження

На даних залежностях можна побачити перший різкий стрибок значень швидкостей  $V_r$  та  $V_z$  в районі 10 мкс практично у всіх ліній. Причому, перше зростання осьової компоненти швидкості у дисків, які контактують з зарядом складає 450-500 м/с, а радіальної – близько 150 м/с.

Необхідно також відмітити, що значення радіальної компоненти швидкості для дисків 2/2(№4) і 2/2(№5) значно менші ніж для інших схем (рис. 4). Це пов'язано з тим, що значна частина енергії ударної хвилі поглинається під час проходження через перший (внутрішній) більш товстий диск. Внаслідок цього до другого диска підходить ударна хвиля меншої інтенсивності. Крім цього, внаслідок малої товщини другого диска



перший різкий стрибок значень  $V_r$  та  $V_z$  швидко нейтралізується хвилями розрідження, що формуються внаслідок відбиття ударної хвилі від зовнішніх торців диска.

На 10,5 мкс завершується процес відбиття детонаційного фронту від внутрішньої поверхні першого (внутрішнього) диска, а ударна хвиля, що рухається по диску проходить його товщину і відбивається від його зовнішньої поверхні. В результаті цього в ньому формується хвиля розрідження. Дану хвилю можна спостерігати при моделюванні кожної схеми в момент часу 11,5...13 мкс. Відповідно до висновків теорії відбиття ударних хвиль від різноманітних перешкод, описаних в [10], фронт даної хвилі розрідження і частина середовища по якому вона вже пройшла повинні рухатися в протилежних напрямках. Така закономірність була відтворена і під час моделювання. На рис. 2 ( $t=13$  мкс) видно, що фронт хвилі розрідження вже наближається до поверхні першого диска, а на графіках рис. 3 та рис. 4 в даний момент часу з'являється другий різкий підйом значень швидкостей.

Цікаво, що для диска 2/2 схеми №4, другий стрибок осьової швидкості відбувається значно пізніше в порівнянні з іншими схемами. Це відбувається внаслідок утворення зазору між дисками після першого зіткнення на 15 мкс, Поступово цей зазор зникає до 21 мкс процесу. Саме тоді відбувається другий етап проросту значень осьової швидкості. Крім того, внаслідок зіткнення двох дисків відбувається різке падіння осьової компоненти швидкості диску, що налітає. Даний момент чітко прослідковується на рис. 4, для схеми 1/2(№4) в момент часу 21 мкс. Повторне зростання  $V_z$  зовнішніх дисків схеми №1 та №2 в момент 30 мкс пов'язано з їх повторним контактом з дисками 1/2(№1) та 1/2(№2), які в результаті даного контакту знову знижують свою швидкість руху, але в подальшому значення її практично не змінюється. Не впливає на цей процес і тиск з боку продуктів детонації.

Моделювання показало, що максимальна швидкість, яка може з'явитися у осколковому диску за рахунок внутрішнього тиску продуктів детонації, складає 1190 м/с. Причому, формування цієї величини завершується приблизно до 30 мкс процесу вибуху блока.

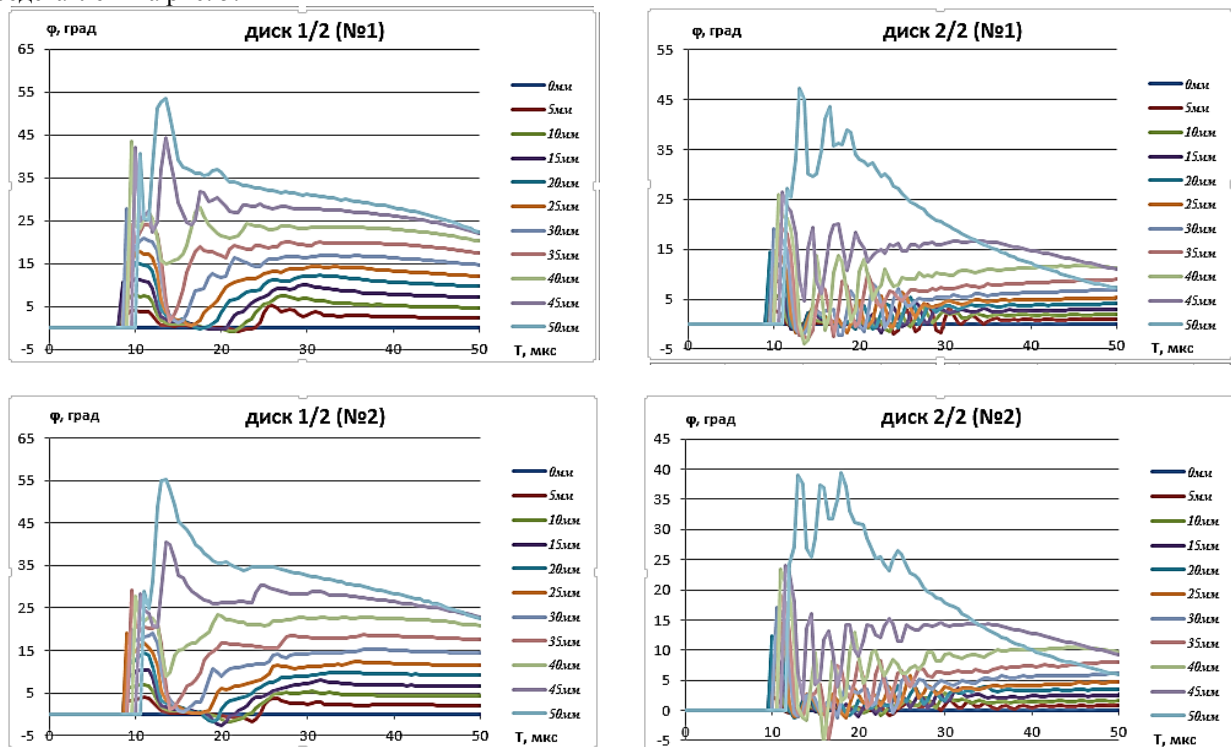
Таким чином можна стверджувати, що формування значення осьової компоненти швидкості дисків, що метаються в різних конструктивних схемах металюного блока закінчується на 30..35 мкс з моменту процесу детонації заряду ВР, або за 4 ударних хвилюобміну між дисками.

Але такий висновок не можна зробити щодо радіальної компоненти  $V_r$ . На рис. 3 видно, що не всі лінії набувають свого більш менш сталого значення на цей момент. Особливо це стосується графіків, що описують поведінку крайніх вузлів скінченно-елементної сітки дисків (45, 50 мм). Це пов'язано з великими радіальними деформаціями саме периферійних частин дисків.

Тоді актуальності набуває питання про встановлення величини кута розльоту конструкції  $\varphi$  [12]. Це пов'язано з тим, що значення кута  $\varphi$  є залежним від поведінки функції радіальної швидкості  $V_r$ :

$$\varphi = \arctg\left(\frac{V_r}{V_z}\right).$$

Відповідні графіки, що описують поведінку функції  $\varphi$  різних частин осколкових дисків з часом представлені на рис. 5:



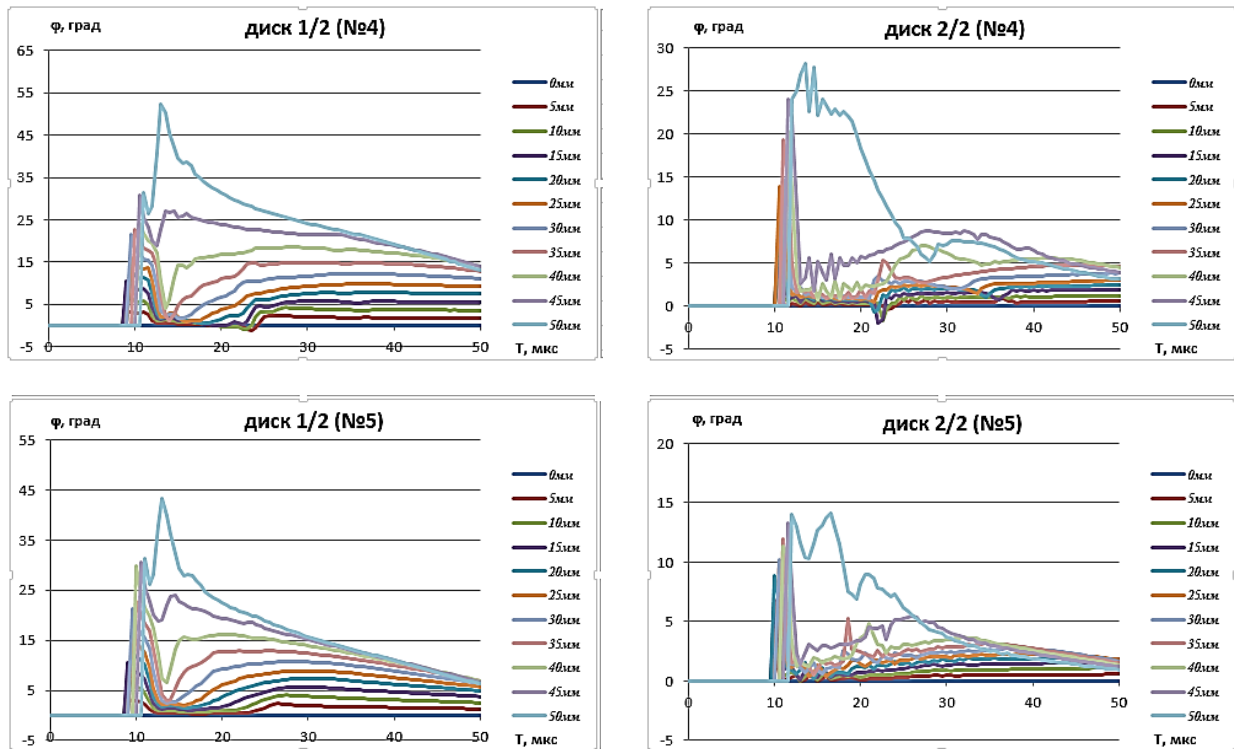


Рис. 5. Графіки зміни значень меридіонального кута польоту різних частин осколкових дисків в процесі вибухового навантаження

З рис. 5 можна зробити висновок, що якщо не враховувати поведінку крайнього маркера диска (50 мм), то для встановлення значення загального кута розльоту кожного осколкового диска окремо та всієї конструкції блока в цілому можна обмежитись інформацією про поведінку вузла скінченно-елементної сітки розташованого на відстані 45 мм від вісі симетрії металевго блока. На відрізку  $t=30...38$  мкс значення кута розльоту  $\varphi$  ліній з "0 мм" до "45 мм" практично стабілізується на певному рівні. Хоча внутрішні хвилюві процеси в дисках призводять до того, що на момент 50 мкс ці значення кута дещо зменшуються. В табл. 1 представлені значення повної швидкості та меридіонального кута розльоту різних частин осколкових дисків на момент стабілізації значення  $\varphi$ .

Таблиця 1

Значення повної швидкості та меридіонального кута розльоту різних частин осколкових дисків

Схема	№ диска	Параметр	R, мм									
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
№1	1/2	$V_r$ , м/с	0,0	57,7	114	182	226	256	287	319	348	383
		$V_z$ , м/с	1196	1160	1134	1114	1075	1027	974	893	808	750
		$\varphi$ , град	0,0	2,8	5,7	9,3	11,9	14,0	16,4	19,7	23,3	27,1
		$V$ , м/с	1196	1162	1140	1129	1098	1059	1015	949	880	842
	2/2	$V_r$ , м/с	0,0	19,0	36,0	53,0	71,0	87,0	112,0	133,0	166,0	211
		$V_z$ , м/с	1149	1136	1124	1094	1058	1023	979	923	852	758
		$\varphi$ , град	0,0	1,0	1,8	2,8	3,8	4,9	6,5	8,2	11,0	15,6
		$V$ , м/с	1149	1136	1124	1095	1060	1027	985	933	868	787
№2	1/2	$V_r$ , м/с	0,0	49,0	93,8	135,0	178,0	219,0	261,0	297,0	338,0	388
		$V_z$ , м/с	1181	1172	1149	1118	1072	1022	960	889	801	757
		$\varphi$ , град	0,0	2,4	4,7	6,9	9,4	12,1	15,2	18,5	22,9	27,1
	2/2	$V_r$ , м/с	0,0	10,0	26,2	40,5	60,0	73,8	97,5	120,0	152,0	186,3
		$V_z$ , м/с	1142	1136	1123	1100	1066	1033	990	934	863	784

Продовження табл. 1

		φ, град	0,0	0,5	1,3	2,1	3,2	4,1	5,6	7,3	10,0	13,4
		V, м/с	1142	1136	1123	1101	1068	1036	995	941	877	806
№4	1/2	V <sub>r</sub> , м/с	0,0	38,1	77,1	112,0	146,0	176,0	206,0	238,0	281,0	299
		V <sub>z</sub> , м/с	1140	1134	1119	1092	1052	1007	949	882	825	802
		φ, град	0,0	1,9	3,9	5,9	7,9	9,9	12,3	15,1	18,8	20,5
		V, м/с	1140	1135	1121	1097	1062	1022	971	913	871	856
	2/2	V <sub>r</sub> , м/с	0,0	9,4	21,1	34,6	41,0	46,7	58,9	73,5	84,3	91
		V <sub>z</sub> , м/с	1122	1117	1101	1075	1041	1006	965	923	884	807
		φ, град	0,0	0,5	1,1	1,8	2,3	2,7	3,5	4,6	5,5	6,4
		V, м/с	1122	1117	1101	1075	1041	1006	965	923	884	807
№5	1/2	V <sub>r</sub> , м/с	0,0	38,0	74,2	104,0	130,0	150,0	171,0	193,0	218,0	225
		V <sub>z</sub> , м/с	1107	1103	1086	1054	1008	963	914	869	830	802
		φ, град	0,0	2,0	3,9	5,6	7,3	8,9	10,6	12,5	14,7	15,7
		V, м/с	1107	1103	1089	1059	1017	975	930	890	858	833
	2/2	V <sub>r</sub> , м/с	0,0	7,5	15,4	24,0	30,0	32,7	40,5	43,4	49,0	58
		V <sub>z</sub> , м/с	1055	1051	1035	1008	980	945	909	873	841	818
		φ, град	0,0	0,4	0,9	1,4	1,8	2,0	2,6	2,8	3,3	4,1
		V, м/с	1055	1051	1035	1008	980	946	910	875	843	820

Відповідні залежності, що описують розподіл значень кута φ різних частин диска по середині їх товщини представлені на рис. 6:

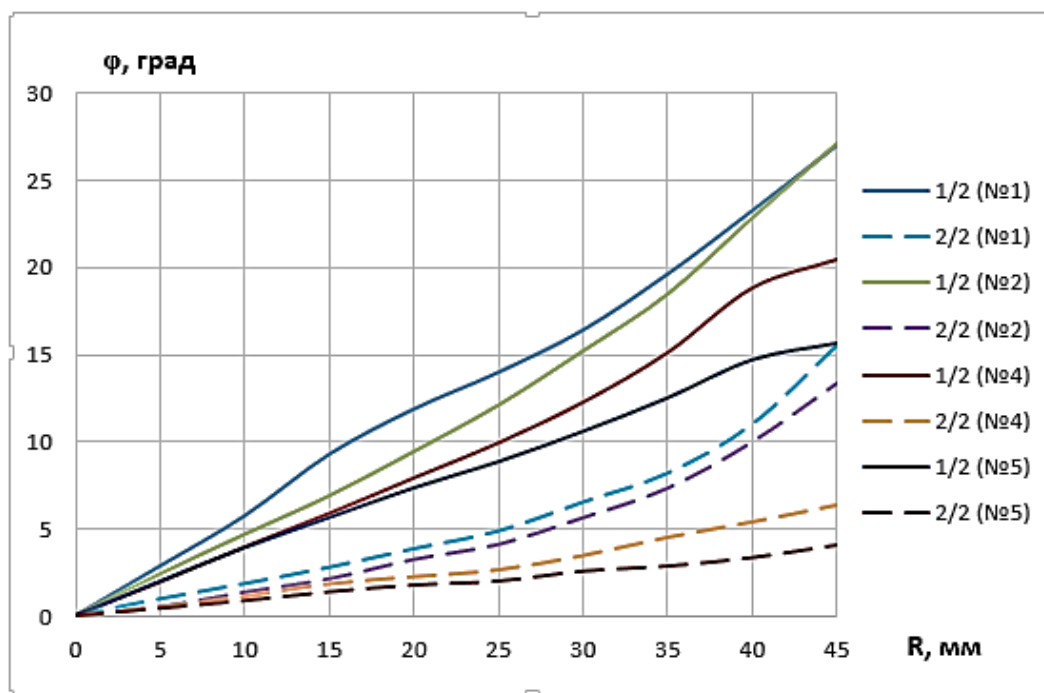


Рис. 9. Розподіл підсумкових значень меридіонального кута φ розльоту осколкового диска і його частин по середині їх товщини

На рис. 9 можна побачити, що зміна значень кута φ вздовж радіуса являється практично лінійною, хоча для різних схем блоку тангенс кута нахилу цих залежностей різний і коливається в діапазоні від 0,080 град/мм до 0,580 град/мм.

Необхідно також відмітити, що в зв'язку з тим, що всі розглянуті конструкції ВП мають осьову симетрію, то представлені на рис. 9 розподіли описують рух осколкової маси лише в одній півкулі розльоту. Для встановлення значення меридіонального кута розльоту всієї конструкції необхідно отримати розрахункові



значення помножити на 2, тобто повна осколкова маса диска 1/2(№1) буде зосереджена в середині конуса розльоту зі значенням кута при вершині –  $27,1 \times 2 = 54,2^\circ$ .

Також для повної оцінки рівня небезпеки, сформованого внаслідок вибуху ВП, осколкового поля крім величини кута розльоту осколків необхідна інформація про швидкість руху  $V$  осколків всередині даного кута. Відповідний розподіл величини  $V$  посередині товщини дисків в кінці процесу їх вибухового метання представлені на рис. 10.

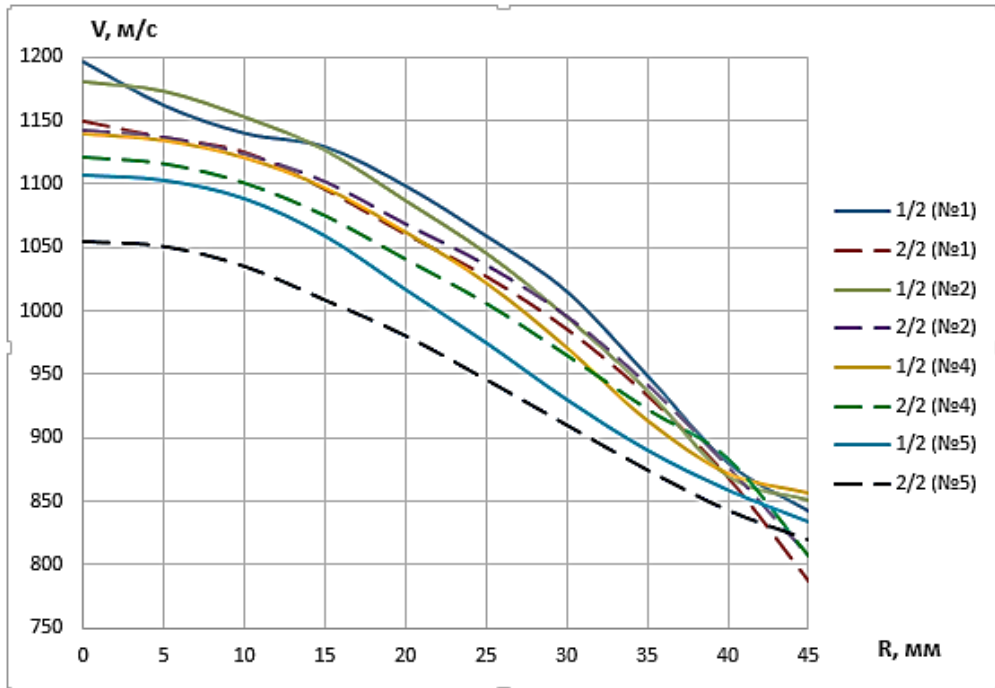


Рис. 10. Розподіл підсумкових значень швидкості польоту осколкових дисків по середині їх товщини

На рис. 10 видно, що розподіл швидкості руху  $V$  дисків практично однаковий. Такий результат є логічним, оскільки при розрізанні диска на дві частини різної товщини, їх сумарна маса залишалася незмінною.

Але необхідно відмітити перепад значень  $V$  між центральними і периферійними частинами дисків, який складає близько 300 м/с. Такий результат вказує на те, що глибина небезпечної зони (дальність польоту небезпечних осколків) в різних напрямках всередині кутової зони розльоту буде різною.

Підсумковий розподіл значень меридіонального кута розльоту маси осколкових дисків та їх швидкості руху для різних конструкційних схем ВП представлено на рис. 11.

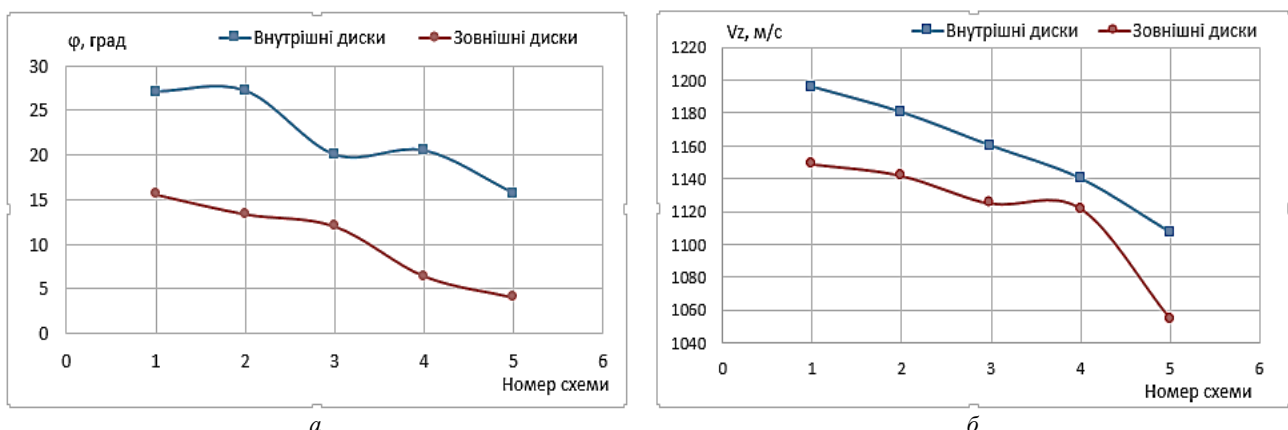


Рис. 11. Підсумковий розподіл значень меридіонального кута розльоту (а) маси осколкових дисків та її осевої швидкості руху (б)

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Найбільше значення кута розльоту осколкової маси має схема №1 і становить 27,1 град. Найменше значення – 15,7 град, належить схемі №5.

2. Найбільшу осьову швидкість руху осколків має схема №1, що становить 1196 м/с, найменшу – 1050 м/с схема №5.
3. При зміні порядку встановлення дисків 2 і 10 мм, тобто переході від схеми №1 до схеми №5, відбувається зменшення кута розльоту осколкової маси та її швидкості руху на 42% і 12% відповідно. При переході від схеми №2 до схеми №4, аналогічні параметри зменшуються на 24% і 4% відповідно.

## Исследование процесса взрывного метания двух осколочных дисков переменной толщины

В.В. Фепа, Ю.М. Сидоренко, В.В. Яковенко

*Аннотация.* В работе приведены результаты процесса взрывного метания набора осколочных дисков зарядом взрывчатого вещества. Данный набор состоит из двух дисков естественного дробления разной толщины фиксированной суммарной массы. Исследования проводились методом компьютерного моделирования ударно-волновых процессов в континуальной постановке с помощью программы ANSYS/LS-DYNA. Установлено влияние порядка установки дисков разной толщины на значение угла разлета осколочной массы и осевой скорости ее движения.

*Ключевые слова:* Взрыво-техническая экспертиза, численное моделирование, взрыв, самодельное взрывное устройство, осколочное поле

## Investigation of the explosive throwing of the two variable thicknesses fragmentary disks

V.V. Fepa, Yu.M. Sydorenko, V.V. Yakovenko

*Abstract.* The results of the process of explosive throwing of a set of fragmentary disks with the charge of an explosive are given in the work. This set consists of two disks of natural crushing of different thicknesses of a fixed total mass. The research was carried out using the computer simulation of shock-wave processes in the continuous formulation using the ANSYS/LS-DYNA program. The influence of the order of the installation of discs of different thickness on the value of the angle of fragmentation of the fractional mass and the axial velocity of its motion is established.

*Keywords:* Explosive-technical examination, numerical simulation, explosion, home-made explosive device, fragmentation field

### References

1. Прохоров-Лукін Г.В., Пашенко В.І., Биков В.І. та ін. Методика комплексного дослідження вибухових пристроїв, вибухових речовин і слідів вибуху. – К.: МЮ України, МВС України, 2007. – 218с.
2. Пашенко В.І., Сидоренко Ю.М. Про доцільність використання методів комп'ютерного моделювання процесу вибуху осколково-фугасних боеприпасів при проведенні судової вибухотехнічної експертизи // Сучасна спеціальна техніка. – 2012. – №3(30). – С.102-112.
3. Сидоренко Ю.М. Компьютерное моделирование процесса взрывного метания разрезанного осколочнообразующего диска // Озброєння та військова техніка. – 2014. – №1. – С.34-41.
4. Сидоренко Ю.М. Особливості процесу вибухового метання осколкоутворюючих дисків, що входять до складу осколково-пучкового снаряду // Збірник наукових праць Академії ВМС імені П.С. Нахімова. – 2012. – Вип.1(9). – С.86-99.
5. John O. Hallquist. LS-DYNA. Theory manual. Livermore Software Technology Corporation. March 2006. – 680p.
6. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: учебное пособие / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106с.
7. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 379 с.: іл.
8. Одинцов В.А., Сидоренко Ю.М. Моделирование процесса взрыва стандартного осколочного цилиндра с различной степенью детализации // Оборонная техника. – 2001. – № 1-2. – С.17-20.
9. 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.
10. Физика взрыва / С.Г. Андреев, Ю.А. Бабкин, Ф.А. Баум и др. / Под ред. Орленко Л.П. – Изд. 3-е, перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – в 2 т. Т.1. – 832 с.
11. LLNL Explosive Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants / В.М. Dobratz, P.C. Crawford. Livermore. – California, 1985. – 541 p.
12. Сидоренко Ю.М. Особенности определения параметров зоны поражения осколочно-пучкового боеприпаса // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2007. – №4. – С.38-45.

