

УДК 623.438

**С. П. БІСИК**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,

**О. В. ЧЕРНОЗУБЕНКО**

(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ),

**О. А. СЛИВІНСЬКИЙ**, кандидат технічних наук, доцент

(НТУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ),

**В. Р. СХАБИЦЬКИЙ**

(615 військове представництво Міністерства оборони України, м. Київ),

**В. Г. КОРБАЧ**, кандидат технічних наук, доцент  
(ДП «Державне Київське конструкторське бюро «Луч», м. Київ)

## Порівняння ефективності підходів до числового моделювання пробиття ударником гомогенної перешкоди

Приведені результати порівняння моделювання процесу пробиття ударниками з різною формою головної частини гомогенної перешкоди з використанням двовимірного лагранжевого підходу (2D) та методу Smooth Particle Hydrodynamics (3D). Отримані результати показують можливість застосування обох підходів для моделювання пробиття ударниками гомогенних перешкод з урахуванням типу пробиття. За даними досліджень, застосування методу Smooth Particle Hydrodynamics є більш прийнятним при дослідженні пробиття через значно меншу похибку відносно натурального експерименту та більш достовірний опис характеру різних типів пробиття.

Приведены результаты сравнения моделирования процесса пробития ударниками с разной формой головной части гомогенного препятствия с использованием двумерного лагранжевого подхода (2D) и метода Smooth Particle Hydrodynamics (3D). Полученные результаты показывают возможность применения обоих подходов для моделирования пробития ударниками гомогенных препятствий с учетом типа пробития. По данным исследований, применение метода Smooth Particle Hydrodynamics более приемлемо для исследования пробития из-за значительно меньшей погрешности относительно натурального эксперимента и более достоверного описания характера различных типов пробития.

Застосування методів математичного моделювання є ефективним інструментом при проведенні досліджень ефективності зразків озброєння та військової техніки, а також оцінки технічних рішень, що закладаються в основу їх функціонування [1–3]. Одним з найбільш ефективних інструментів аналізу є метод скінченних елементів, що має широкі можливості при вирішенні подібного роду задач. Дослідження процесу пробиття ударниками захисних конструкцій займає важливе місце в циклі робіт, що присвячені підвищенню захищеності бойових броньованих машин (ББМ) від засобів ураження. Застосування числового моделювання процесу пробиття ударниками захисних перешкод передбачає перевірку адекватності, збіжності і точності самої числової моделі. Існуюче різноманіття підходів до моделювання пробиття також накладає певну неоднозначність у виборі того чи іншого методу для досягнення необхідної точності вирішення задачі.

**Метою** статті є порівняння результатів числового моделювання пробиття ударником гомогенної перешкоди з використанням двовимірного лагранжевого підходу (2D) та методу Smooth Particle Hydrodynamics (3D).

Моделі матеріалів, що застосовані при проведенні дослідження, розрахункові схеми моделювання процесу пробиття, геометричні розміри ударника і перешкоди, їх фізико-механічні властивості наведені в роботах [4, 5]. При проведенні досліджень використано три форми головної частини ударника: циліндрична, півсферична та конічна. Вибір таких форм пояснюється можливістю дослідження різних механізмів пробиття перешкоди. Підхід до побудови скінченно-елементної моделі та методологія ідентифікації фізико-термомеханічних властивостей матеріалів ґрунтуються на даних робіт [6, 7].

При проведенні моделювання пробиття ударником гомогенної перешкоди використаний двовимірний лагранжевий підхід та метод Smooth Particle Hydrodynamics (3D). При застосуванні 2D підходу осердя і перешкода задані з використанням вісесиметричних зважених по площі елементів у системі координат Лагранжа. При застосуванні 3D підходу осердя задане з використанням об'ємних елементів з рівномірним розподілом напружень. Перешкода задана з використанням повноінтегрованих об'ємних S/R елементів (з вибірковою пониженням порядку інтегрування). У місці взаємодії ударника з перешкодою використані елементи SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) (рис. 1).

Порівняння точності визначення процесу, що досліджувався, проведено за значеннями швидкості ударника за перешкодою. За отриманими експериментальними значеннями швидкості ударника після пробиття перешкоди побудовані криві (рис. 2), що, по суті, характеризують балістичний ліміт цієї перешкоди для певного типу ударника.

За результатами проведеного числового моделювання з використанням 3D і 2D підходів отримані значення швидкості ударника за перешкодою (табл. 1).

Графічно зміна значення відносної похибки підходів у залежності від початкової швидкості ударника показана на рис. 3. Отримані значення похибки показують, що

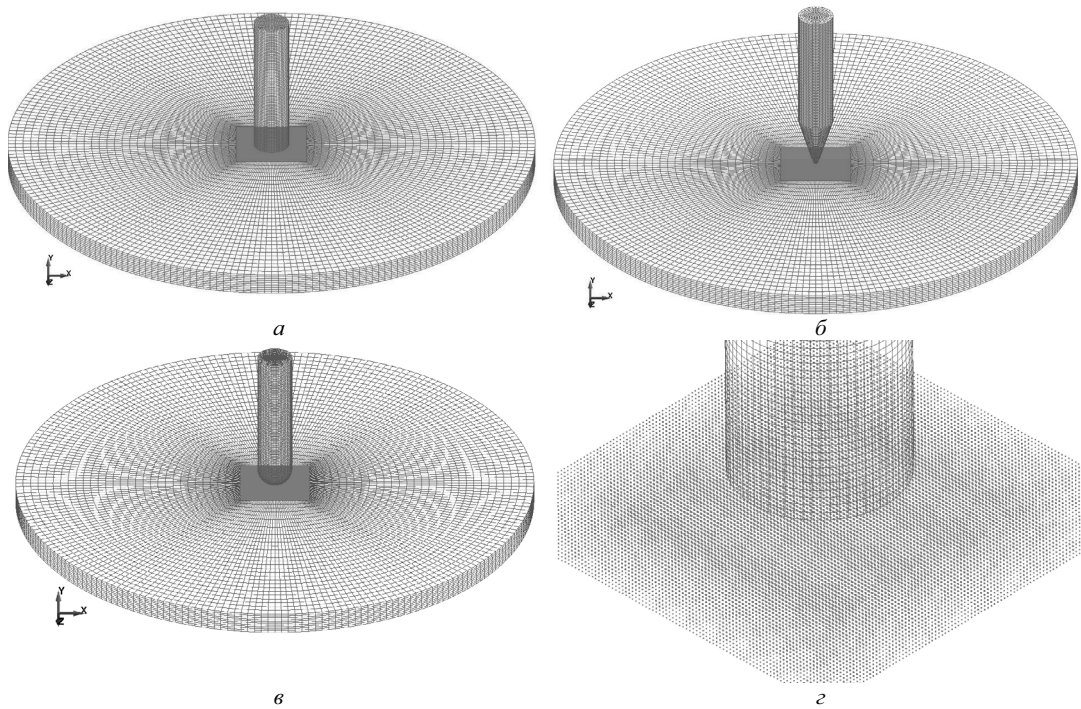


Рис. 1. Скінченно-елементні моделі ударників з різною формою головної частини і перешкоди в 3D постановці:

*a* – плоский, *б* – півсферичний, *в* – конічний, *г* – типовий набір елементів SPH

при наближенні до границі балістичного ліміту значення відносної похибки зростають для всіх ударників з різною формою головної частини. Однак при швидкостях ударника, що вища від балістичного ліміту в 1,2–1,5 разу значення відносної похибки не перевищують 5%.

Застосування 3D підходу з використанням елементів SPH до моделювання задачі пробиття для всіх ударників з різною формою головної частини має меншу відносну похибку порівняно із застосуванням 2D підходу. Пояснити це можливо специфікою подання скінченного середовища в 2D підході і, як наслідок, до неможливості врахування деяких процесів, що відбуваються при пробитті перешкоди (у нашому випадку, наприклад, утворення «пелюсткового» пробиття з чотирма симетричними пелюстками) (рис. 4). Для ударника з конічною головною частиною (куля типу Б-32) застосування 2D підходу

дає значну відносну похибку. Крім того, із зростанням швидкості ударника відносна похибка 3D підходу зменшується інтенсивніше в порівнянні з 2D підходом.

Візуалізація процесу пробиття перешкоди ударником при числовому вирішенні задачі та розкадровка високошвидкісної кінозйомки під час натурального експерименту порівняні на рис. 5. За якісною оцінкою, процес пробиття при числовому моделюванні адекватно описує натурний експеримент. Порівняння вимірної швидкості ударника та його пройденого шляху зображене на рис. 6.

Показані на рис. 7 результати процесу пробиття ударниками з різною формою головної частини із застосуванням 3D і 2D підходів показують характер пробиття для кожного з підходів та відображають недоліки застосування 2D підходу.

**Висновки.** За результатами проведених досліджень пробиття гомогенної перешкоди ударниками з різною формою головної частини із застосуванням 3D та 2D підходу оцінена похибка обох методів на основі поставленого лабораторного експерименту. Отримані значення похибки показують, що при наближенні до границі балістичного ліміту значення відносної похибки зростають для всіх ударників з різною формою головної частини. Однак при швидкостях ударника, що вища від балістичного ліміту в 1,2–1,5 разу значення відносної похибки не перевищують 5%.

Застосування 3D підходу із застосуванням методу SPH до моделювання задачі пробиття для всіх ударників з різною формою головної частини мають меншу відносну похибку порівняно із застосуванням 2D підходу. Пояснити це можливо специфікою подання скінченного середовища в 2D підході й, як наслідок,

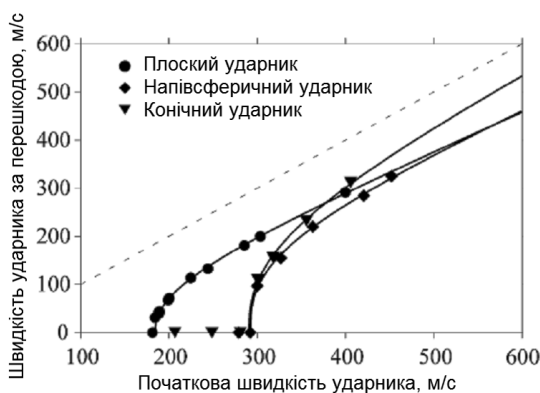


Рис. 2. Залежність швидкості ударника за перешкодою від його початкової швидкості для ударників з різними формами головної частини

Таблиця 1. Значення швидкості ударника перед перешкодою та за нею після пробиття

Тип ударника	Позначення експерименту	Початкова швидкість, м/с	Швидкість за перешкодою, м/с		Відносна похибка при застосуванні методу, %		
		експеримент	експеримент	2D	SPH	2D	SPH
Плоский	B1	303,5	199,7	206,4	194,8	3,4	2,5
	B2	244,2	132,6	127,3	120,4	4,0	9,2
	B3	285,4	181,1	187,4	174	3,5	3,9
	B4	200,4	71,4	78,7	70	10,2	2,0
	B8	181,5	0	0			
	B9	224,7	113,7	78,7	101,7	30,8	10,6
	B14	184,3	30,8	0	1,34	100,0	95,6
	B15	189,6	42	0	48,5	100,0	15,5
	B16	184,8	0	0	28,1		
	B20	399,6	291,3	298,5	296,3	2,5	1,7
Півсферичний	H1	300	97,2	0	200	100,0	105,8
	H2	278,9	0	0	167,7		
	H3	362,9	220,2	138,6	276,3	37,1	25,5
	H4	292,1	0	0	188,2		
	H5	326,7	154,8	0	233,4	100,0	50,8
	H6	452	325,1	310,6	374,6	4,5	15,2
	H7	420,6	284,3	251,1	341,7	11,7	20,2
Конічний	C1	248,7	0	0			
	C2	317,9	155,8	0	175,2	100,0	12,5
	C3	206,9	0	0			
	C4	355,6	232,3	0	235,3	100,0	1,3
	C5	280,9	0	0	102,6		
	C6	300,3	110,3	0	143,7	100,0	30,3
	C7	405,7	312	143,9	304,2	53,9	2,5

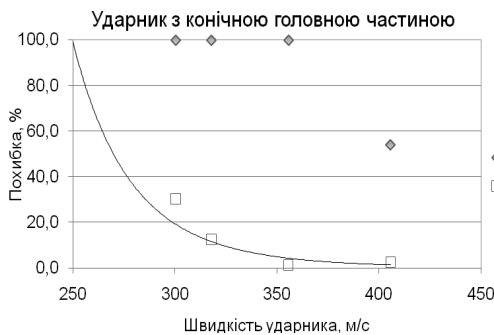
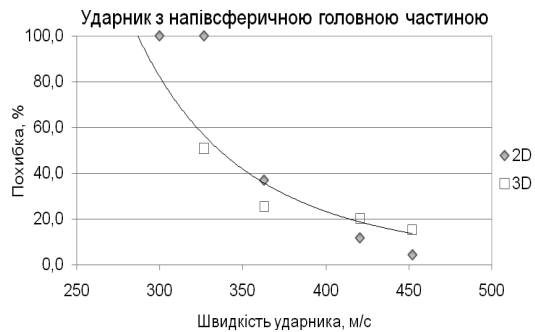
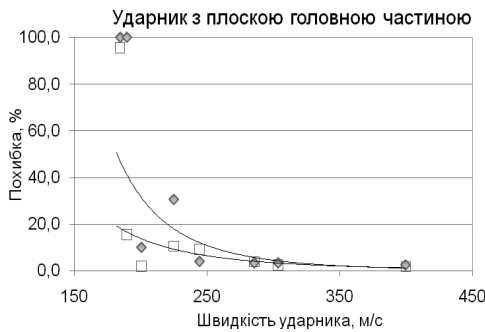


Рис. 3. Залежність відносної похибки методу в залежності від початкової швидкості ударника

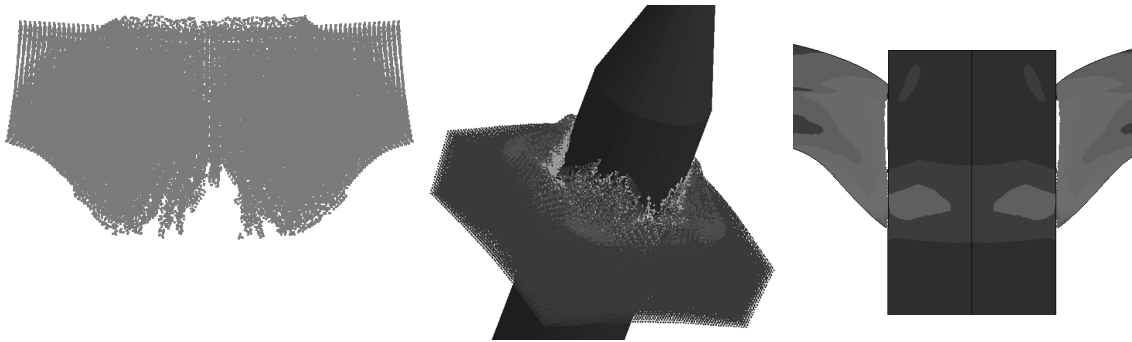


Рис. 4. Порівняння пробиття при використанні 2D і 3D підходів за типом «пелюсткового» пробиття

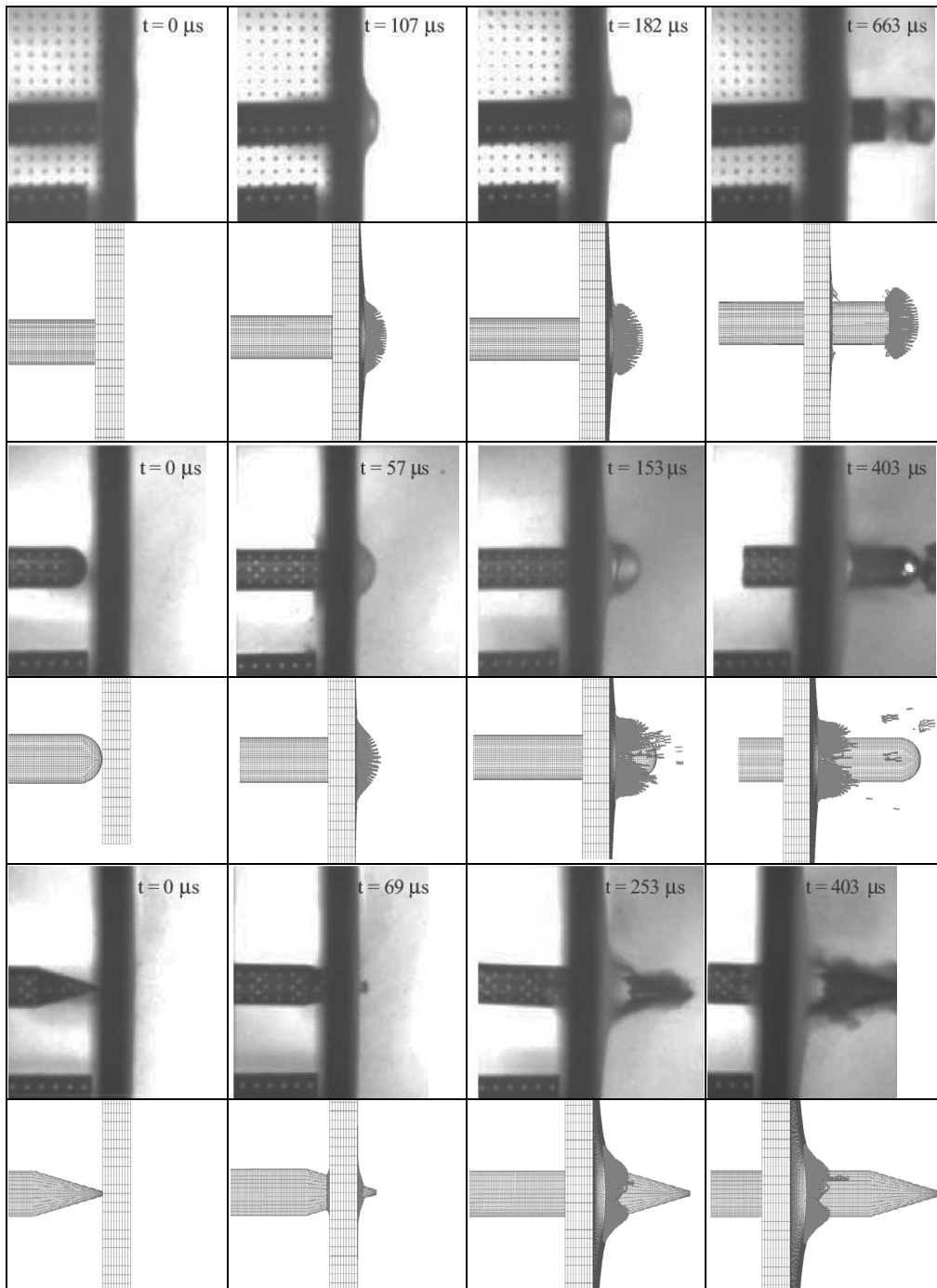


Рис. 5. Порівняння процесу пробиття ударником перешкоди при натурному експерименті (експерименти В15, Н1 та С6) та числовому моделюванні (3D підхід)

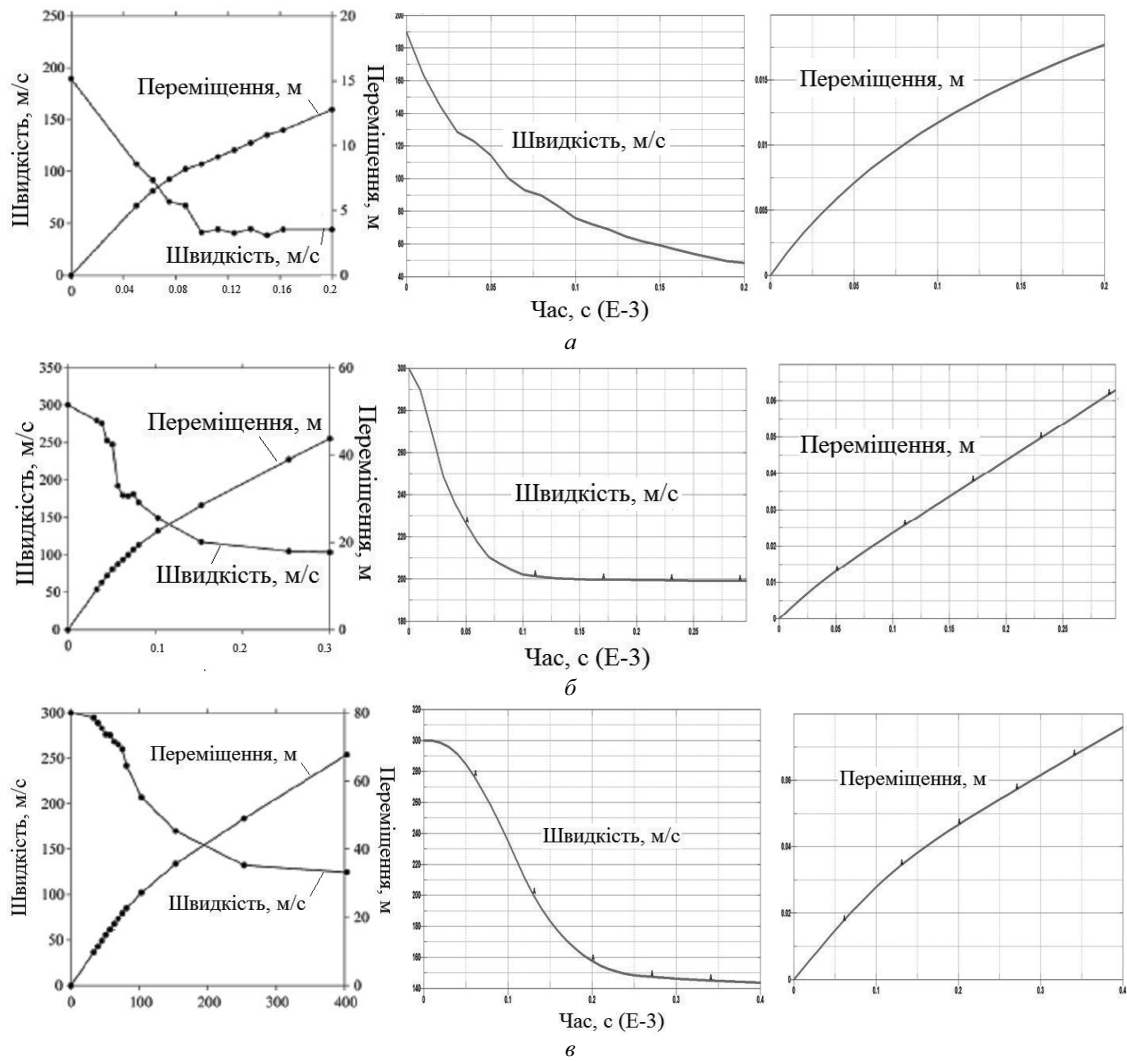


Рис. 6. Залежність швидкості та переміщення ударника при експериментальних дослідженнях (лівий графік) та числовому моделюванні (середній та правий графіки) (3D підхід):  
*a* – експеримент В15, *б* – експеримент Н1, *в* – експеримент С6

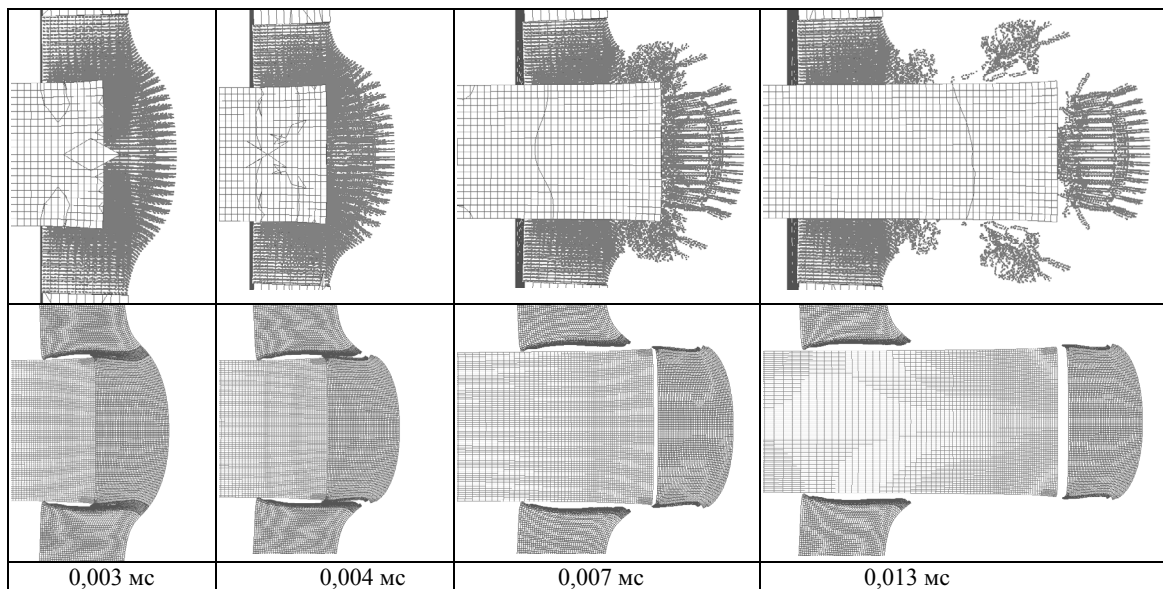


Рис. 7. Порівняння процесу пробиття, отриманого при застосуванні 3D і 2D підходів (експеримент В20)

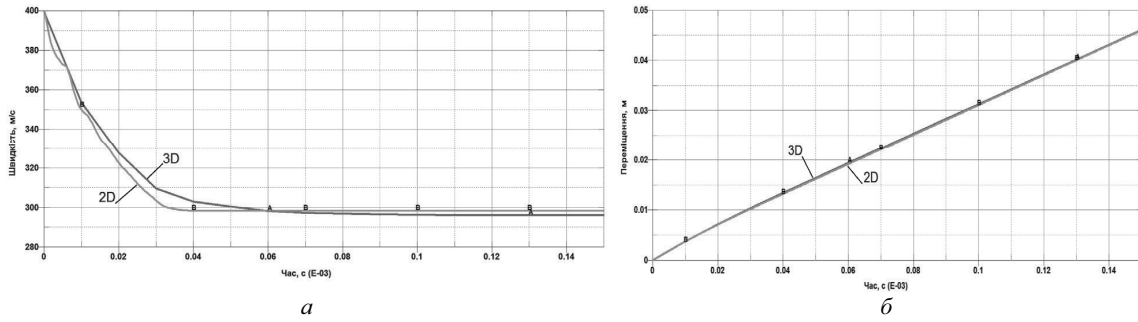


Рис. 8. Порівняння змін швидкості (а) та переміщення (б) ударника, отриманих при застосуванні 3D і 2D підходів (експеримент В20)

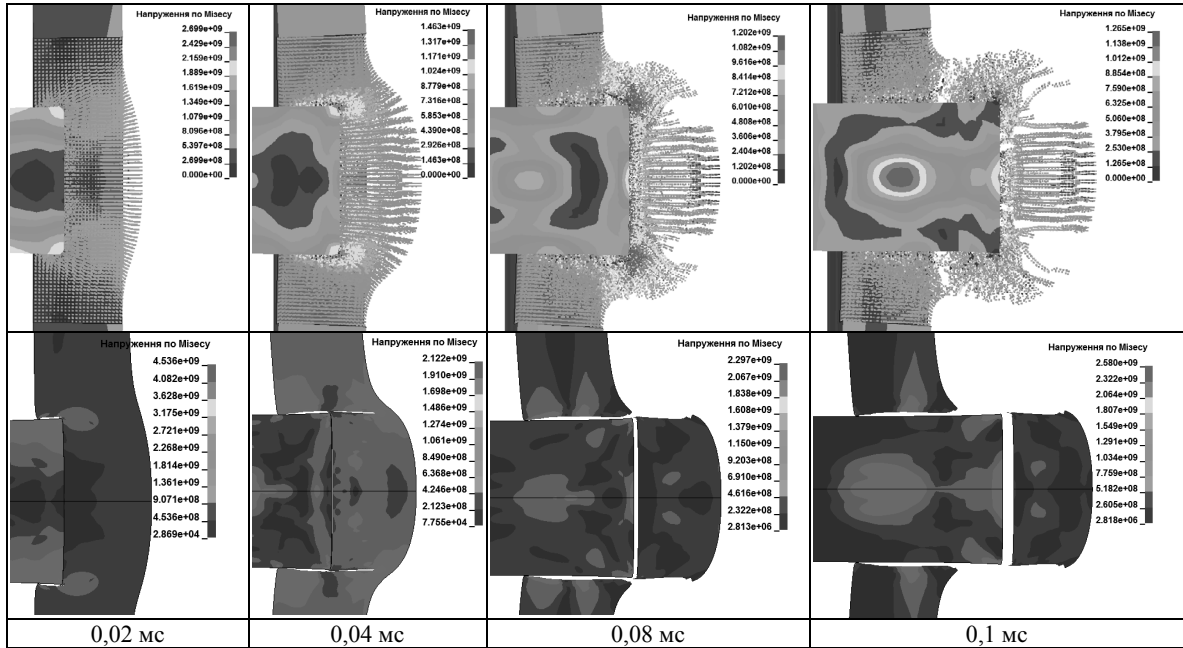


Рис. 9. Порівняння процесу пробиття, отриманого при застосуванні 3D і 2D підходів (експеримент В1)

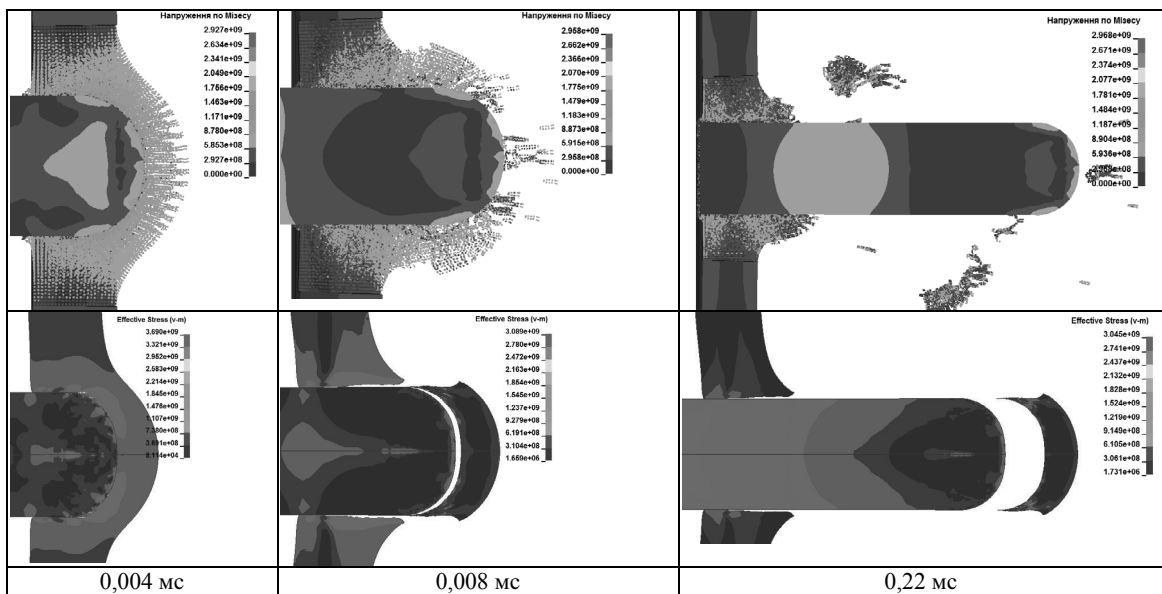
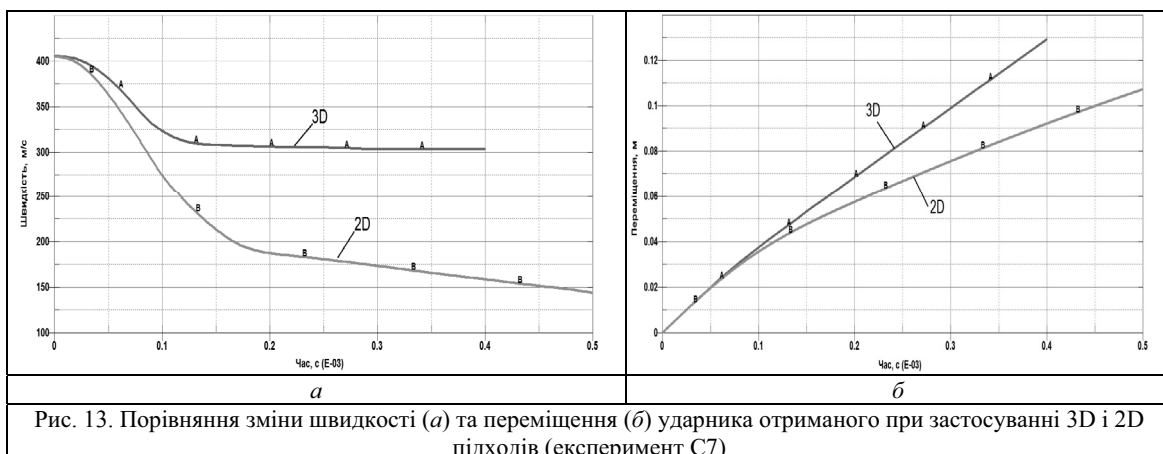
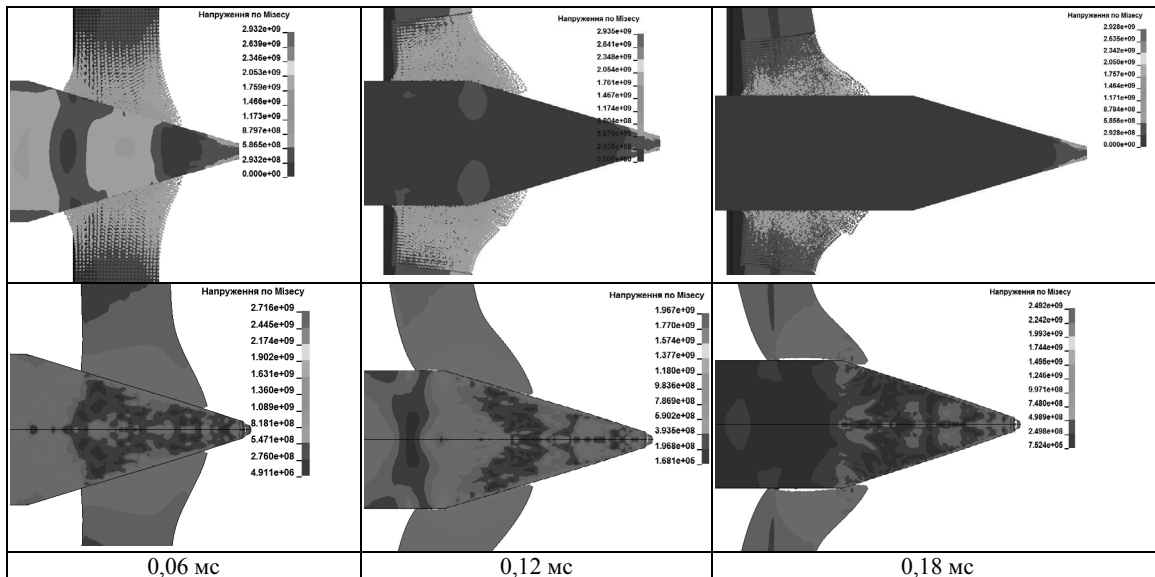
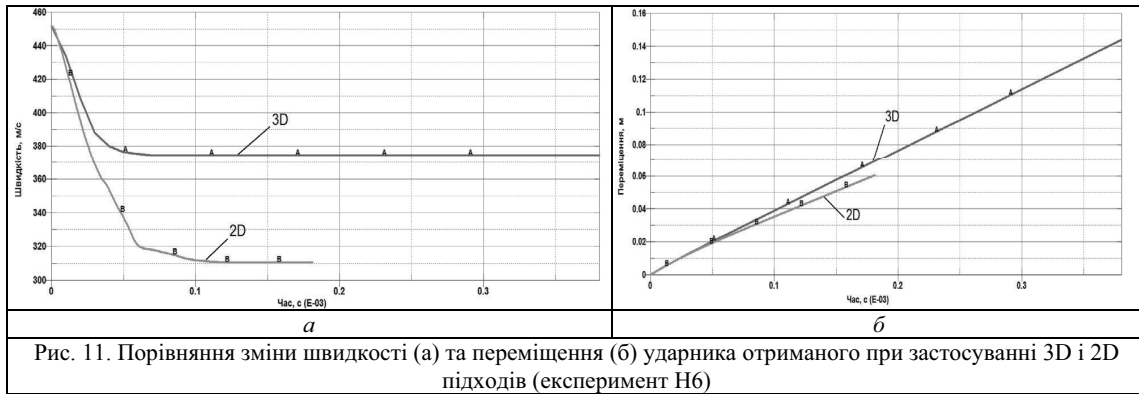


Рис. 10. Порівняння процесу пробиття отриманого при застосуванні 3D і 2D підходів (експеримент H6)



до неможливості врахування деяких процесів, що відбуваються при пробитті перешкоди (у нашому випадку це утворення «пелюсткового» пробиття з чотирма симетричними пелюстками). Для ударника з конічною головною частиною (куля типу Б-32) застосування 2D підходу дає значну відносну похибку. Крім того, зі зростанням швидкості ударника відносна похибка 3D підходу зменшується інтенсивніше в порівнянні з 2D підходом.

Розроблена числова модель може бути використана для оцінки захисних елементів у конструкції бойових броньованих машин та проведення їх параметричного синтезу за обраним критерієм ефективності. Застосування методу SPH (3D підхід) є більш прийнятним для дослідження захисних елементів бойових броньованих машин від бронебійних засобів ураження кінетичної дії. Подальшими є дослідження взаємодії ударника з перешкодою на швидкостях взаємодії до 1500 м/с та

створення скінченно-елементних моделей бронейних засобів ураження з відповідним набором фізико-механічних властивостей.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения : моногр. : в 10 т. Т. 9. Прикладные аспекты испытаний и теоретико-экспериментальных исследований вооружения и военной техники / [С. В. Лапицкий, И. Б. Чепков, С. П. Бисык и др.] ; под ред. С. В. Лапицкого. К. : ИД Дмитрия Бураго, 2015. 504 с.
2. Бісик С. П., Чепков І. Б., Васьківський М. І., Давидовський Л. С., Корбач В. Г., Висоцький О. М., Захаревич Д. М. Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2» // Озброєння та військова техніка : щокв. наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2016. № 1 (9). С. 26–31.
3. Чепков І. Б., Бісик С. П., Шереметов С. І., Корбач В. Г. Дослідження підриву мін в каналі ствола 120-мм міномета // Озброєння та військова техніка : щокв. наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2017. № 2 (14). С. 23–28.
4. Borvik T. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. P. I: Experimental study / T. Borvik, M. Langseth, O. S. Hopperstad, K. A. Malo // International Journal of Impact Engineering 27 (2002) 19-35.
5. Бісик С. П., Чернозубенко О. В., Схабицький В. Р., Сливінський О. А., Ханюков В. А. Числове моделювання пробиття гомогенної перешкоди ударниками з різною формою головної частини // Озброєння та військова техніка : щокв. наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2017. № 2 (14). С. 17–22.
6. Криворучко Д. В., Залога В. А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : моногр. / под общ. ред. В. А. Залоги. Сумы : Университетская книга, 2012. 496 с.
7. Криворучко Д. В., Залога В. О., Корбач В. Г. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів. Суми : Вид. СумДУ, 2010. 209 с.

**Рецензент С. В. Лапицький**, д-р техн. наук, проф.  
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)