

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),

**В. Р. СХАБИЦЬКИЙ**

(615 військове представництво МОУ, м. Київ),

**О. А. СЛИВІНСЬКИЙ**,

кандидат технічних наук, доцент

(КПІ ім. І. Сікорського, м. Київ),

**В. А. ХАНЮКОВ**

(військова частина А2192, смт Городок)

## Числове моделювання пробиття гомогенної перешкоди ударниками з різною формою головної частини

*Надані результати числового моделювання пробиття ударниками з різною формою головної частини гомогенної перешкоди. Визначено стійкість, збіжність та похибку рішення з використанням числової моделі порівняно з відомими експериментальними даними.*

*Представлены результаты численного моделирования пробития ударниками с разной формой головной части гомогенной мишени. Определены стойкость, сходимость и погрешность решения с использованием численной модели в сравнении с известными экспериментальными данными.*

Проведення антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей потребує проведення досліджень з підвищення захищеності бойових броньованих машин (ББМ) від ураження різними вогневими засобами. Встановлені експертним опитуванням загрози для ББМ (рис. 1), визначені відповідно до них основні вимоги до ББМ та важливість їх виконання в конструкції ББМ показують, що поряд з необхідністю забезпечення захищеності від протитанкових мін та саморобних пристроїв досить актуальним є підвищення балістичного захисту від куль стрілецької зброї [1–3].

На сьогодні методи дослідження складних високошвидкісних фізичних процесів (таких як удар, вибух та інші імпульсні навантаження) суттєво вдосконалилися в порівнянні з минулим століттям. Це пов'язано, насамперед, зі створенням нових елементів випробувальних установок, що дають можливість більш точно отримати експериментальні дані (наприклад, швидкості польоту ударників у момент зіткнення з перешкодою та після її пробиття, швидкості розльоту утворених внаслідок вибуху осколків, кумулятивних струменів та ін.). Проте такі експерименти вимагають використання складного обладнання та залучення значних коштів. Сучасний розвиток обчислювальної техніки в поєднанні з числовими методами дозволяє проводити дослідження швидкопротікаючих процесів, частково або повністю замінюючи проведення натурного експерименту. Крім того, застосування числового моделювання дозволяє значно скоротити фінансові витрати на проведення експериментальних досліджень. Поєднання натурних експериментів з числовим моделюванням дає змогу більш швидко та точно отримувати інформацію про поведінку об'єктів при складних навантаженнях.

Тому створення числових моделей процесів, що досліджуються, перевірка їх адекватності, стійкості, збіжності та оцінка точності рішення є актуальним науковим завданням при дослідженні шляхів забезпечення захищеності ББМ від ураження кулями стрілецької зброї [4].

**Метою** статті є розробка числової моделі пробиття гомогенної перешкоди ударником з різною формою головної частини, визначення стійкості, збіжності та похибки рішення порівняно з відомими експериментальними даними.

Апробація числової моделі проведена з використанням результатів натурного експерименту [5]. При цих дослідженнях 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 ґрунтується на даних робіт [6, 7].

При проведенні натурного експерименту як перешкода використовувалася жорстко закріплена кругла пластина діаметром 500 мм та товщиною 12 мм виготовлена зі сталі WELDOX460E з характеристиками, наведеними в табл. 1 [8].

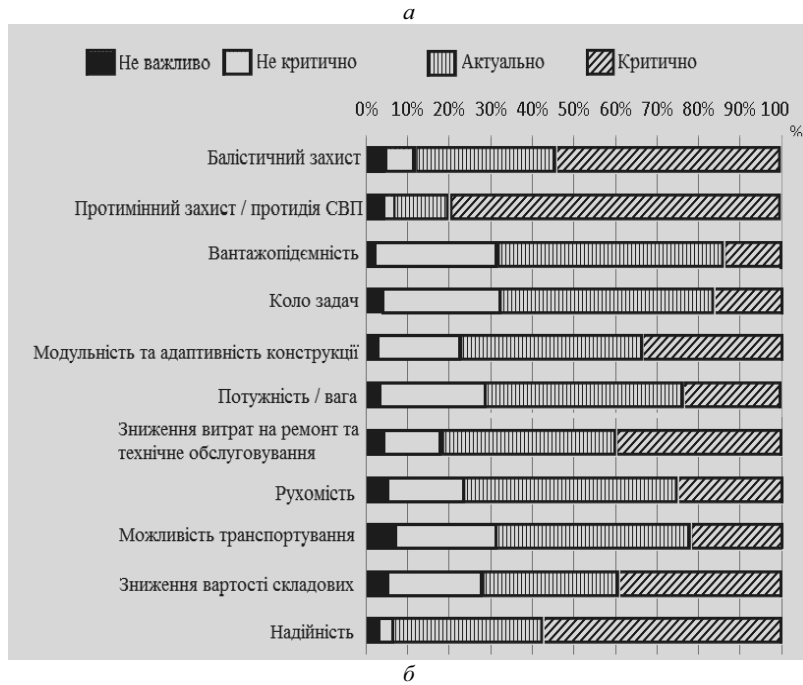
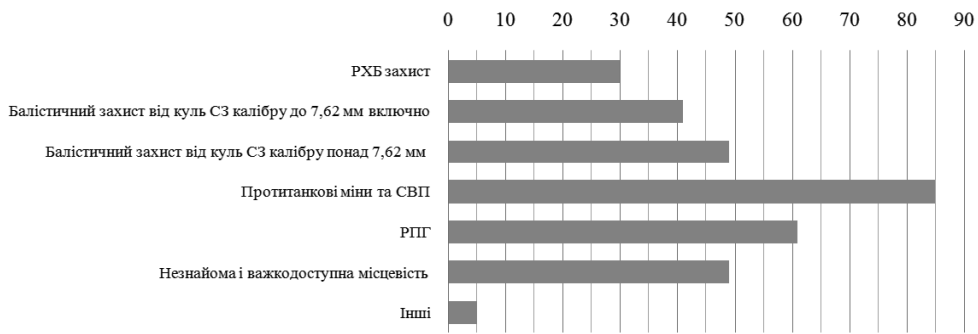


Рис. 1. Загрози для БТР, що визначені експертним опитуванням (а) та основні вимоги до БТР й актуальність їх виконання в конструкції БТР за думкою експертів до 2023 року (б)

Таблиця 1. Характеристики сталі WELDOX 460E (перешкода)

$E$ , ГПа	$\nu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$A$ , МПа	$B$ , МПа	
200	0,33	7850	490	807	
$c_p$ (J/kgK)	$\alpha$	$\bar{\alpha}$ (1/K)	$T_m$ (K)	$T_0$ (K)	
452	0,9	$1,1 \cdot 10^{-5}$	1800	293	
$n$	$\nu_0, \nu_0^*$ (1/s)	$C$	$D_c$	$p_d$	
0,73	$5 \cdot 10^{-4}$	0,0144	0,30	0	
$m$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
0,94	0,0705	1,732	-0,54	-0,015	0

Таблиця 2. Константи матеріалу для сталі ARNE TOOL STEEL (ударник)

$E$ , ГПа	$\nu$	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_0$ , МПа	$E_t$ , ГПа	$\epsilon_f$ , %
204	0,33	7850	1900	15	2,15

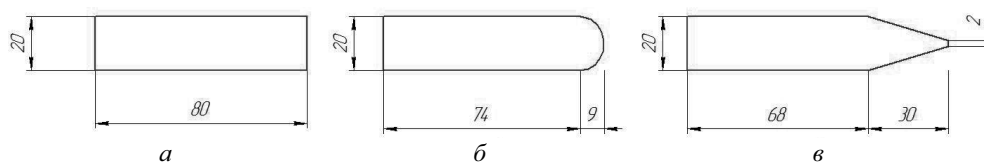


Рис. 2. Геометричні розміри ударників з різними типами головної частини: а – циліндрична; б – півсферична; в – конічна

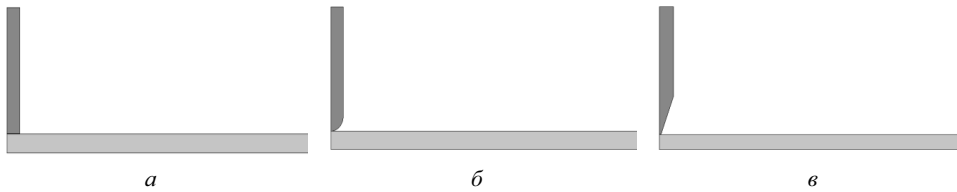


Рис. 3. Розрахункові схеми моделювання пробиття ударником перешкоди: а – для варіанта з циліндричною головною частиною; б – для варіанта з півсферичною головною частиною; в – для варіанта з конічною головною частиною

Ударники мали форму циліндрів діаметром 20 мм та масою 0,197 кг. Інші геометричні розміри ударників підбиралися з умови незмінності їх маси (рис. 1). Ударники виготовлені зі сталі ARNE TOOL STEEL з характеристиками наведеними в табл. 2 [8].

Скінченно-елементні моделі досліджуваних об'єктів (ударник та перешкода) були створені за допомогою програми «FEMAP with NX NASTRAN» [9]. Для скорочення часу обчислень було використано вісесиметричну постановку задачі. Розрахункові схеми показані на рис. 3.

Скінченно-елементна модель утворена чотиривузловими плоскими елементами. Для зменшення часу розрахунку розміри елементів були збільшені ближче до закріпленої частини пластини.

Для дослідження поведінки пластини при пробитті ударником з урахуванням залежності пластичності матеріалу від температурних змін використовувалися модель пластичності матеріалу Джонсона–Кука (Johnson–Cook) [10]:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^p) \left( 1 + c \ln \dot{\epsilon}^* \right) (1 - T^{*m}),$$

де  $A, B, C, n$  і  $m$  – константи матеріалу;  $\bar{\epsilon}^p$  – ефективна пластична деформація;  $\dot{\epsilon}^* = \bar{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0$  – швидкість ефективної пластичної деформації для  $\dot{\epsilon}_0 = 1s^{-1}$ ;  $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$  – гомологічна температура.

Деформація при руйнуванні задавалася залежністю

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] [1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*] [1 - T^*],$$

де  $\sigma^* = p / \sigma_{eff}$  – відношення тиску до ефективних напружень.

Руйнування відбувається за умови, якщо параметр руйнування  $D = \sum \bar{\epsilon}^p / \epsilon^f$  досягає значення 1.

Залежність тиску та об'єму пластини описувалась з використанням рівняння стану Мі–Грюнайзена (Mi–Gruneisen) [10]:

$$p = \left[ \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - a/2\mu^2]}{1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} \right] + (\gamma_0 + a\mu)E,$$

де  $C$  – кутовий коефіцієнт кривої  $v_s - v_p$ ;  $S_1, S_2, S_3$  – коефіцієнти нахилу кривої  $v_s - v_p$ ;  $\gamma_0$  – постійна Грюнайзена;  $a$  – корекція об'єму першого порядку  $\gamma_0$ ;

$$\mu = \frac{p}{\rho_0} - 1.$$

Оскільки основним об'єктом досліджень була саме пластини, то для скорочення часу обчислень ударник

було описано, використовуючи модель Купера–Саймондса (Cowper–Symonds) [10]:

$$\sigma_T = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{eff}^p); \quad E_p = E_{ig} E / (E - E_{ig});$$

$$\epsilon_{eff}^p = \int_0^t \left( \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_y^p \right)^{1/2} dt,$$

де  $p$  і  $C$  – параметри швидкості деформацій;  $\dot{\epsilon}$  – швидкість деформацій;  $\sigma_0$  і  $\sigma_T$  – статична та динамічна границі текучості;  $E$  – модуль пружності;  $E_{ig}$  – модуль зміцнення.

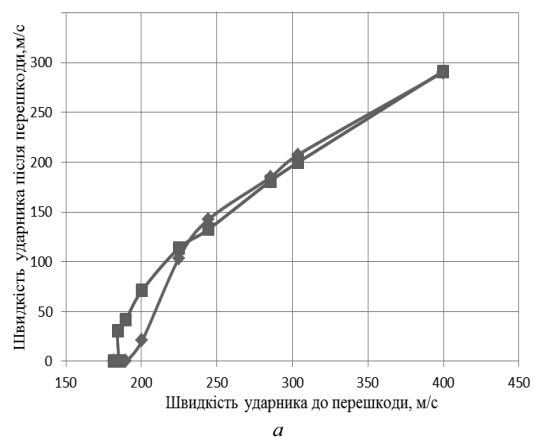
Швидкість пластичних деформацій визначається як різниця між швидкостями повних і пружних деформацій  $\dot{\epsilon}_y^p = \dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_y^e$ .

За результатами проведеного числового моделювання отримані значення швидкості ударників після пробиття ними перешкоди. Ці значення порівнянні зі значеннями, що отримані при натурному експерименті [5] (рис. 4). Крім того, порівняно значення швидкості пробки для циліндричної та півсферичної головної частин ударника (рис. 5). Отримані значення показують, що відносна похибка числового розрахунку в порівнянні з натурними експериментами не перевищує 10%. Отримана точність характерна для граничних режимів пробиття.

Якісне порівняння процесу пробиття ударником перешкоди при натурному експерименті та при числовому розрахунку показані на рис. 6.

Типовий процес пробиття ударником перешкоди зображений на рис. 7–9.

Типові залежності зміни швидкості ударника та пробки, що утворюється при пробитті, показані на рис. 10. Значення швидкості пробки взяті для центрального вузла скінченно-елементної моделі.



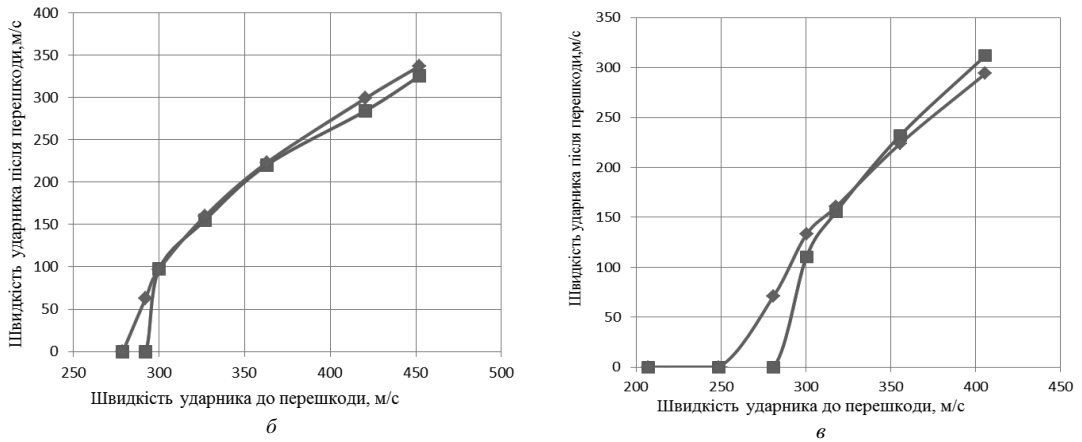


Рис. 4. Значення швидкості ударника після пробиття перешкоди:  
 ■ – натурний експеримент, ◆ – числовий розрахунок,  
*a* – циліндрична форма ударника, *b* – півсферична форма головної частини ударника, *в* – конічна форма головної частини ударника

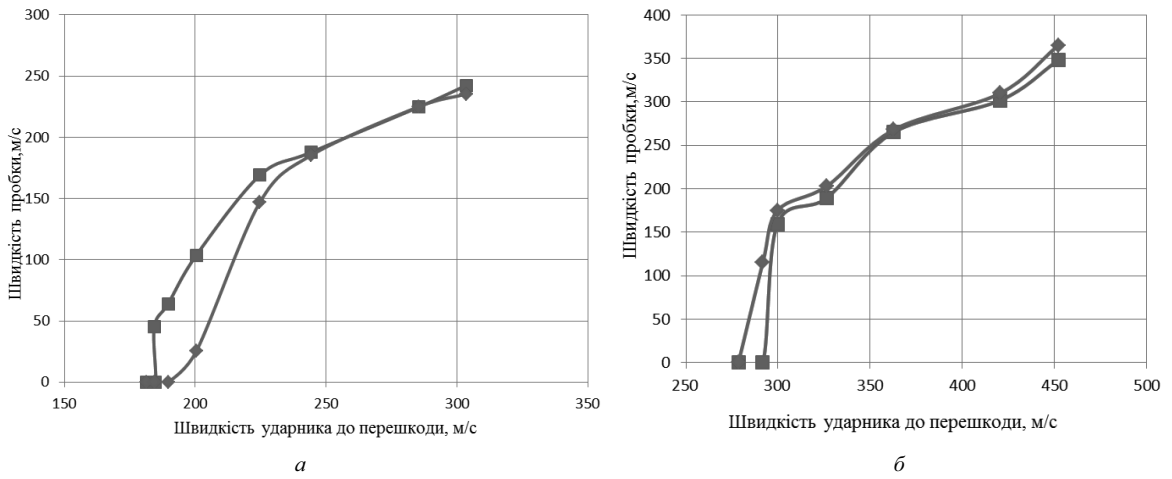


Рис. 5. Значення швидкості пробки після пробиття ударником перешкоди (позначення як на рис. 4)

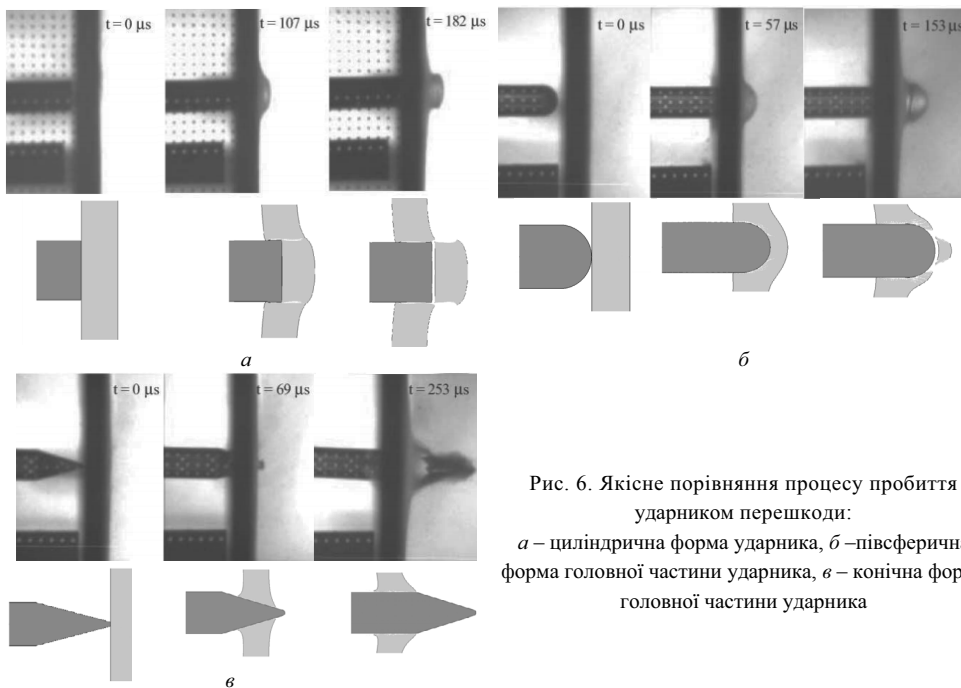


Рис. 6. Якісне порівняння процесу пробиття ударником перешкоди:  
*a* – циліндрична форма ударника, *b* – півсферична форма головної частини ударника, *в* – конічна форма головної частини ударника

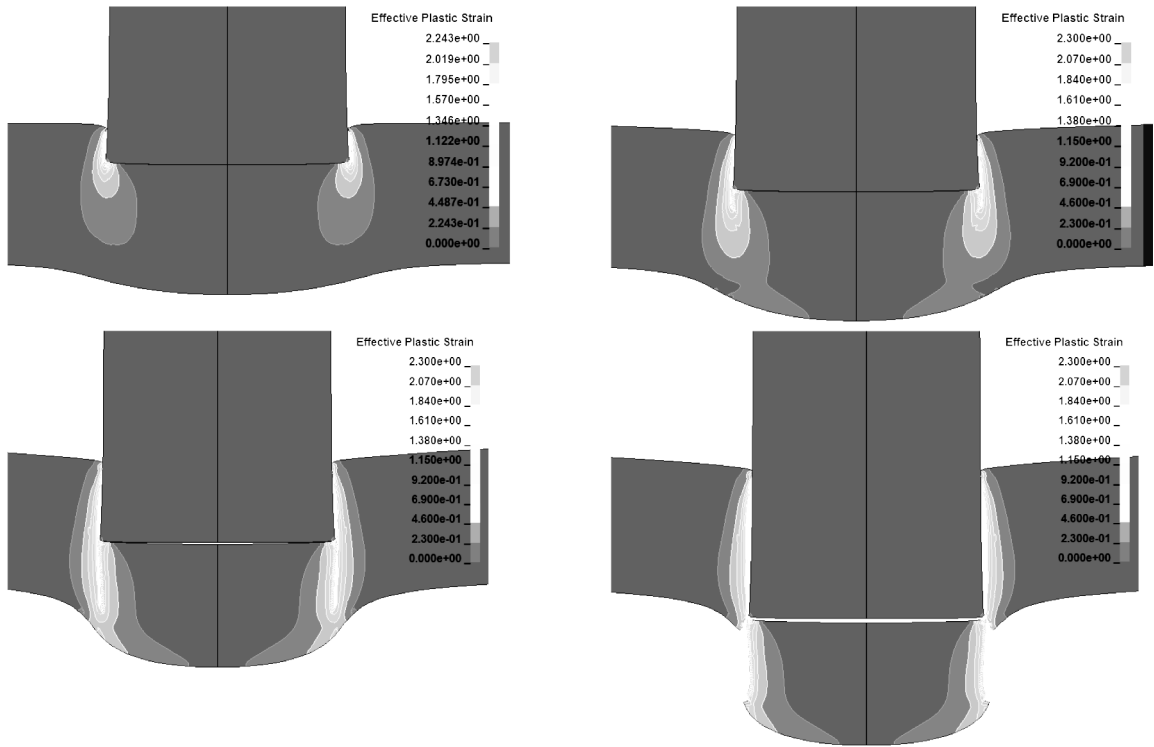


Рис. 7. Типовий процес пробиття циліндричним ударником перешкоди та поля пластичних деформацій

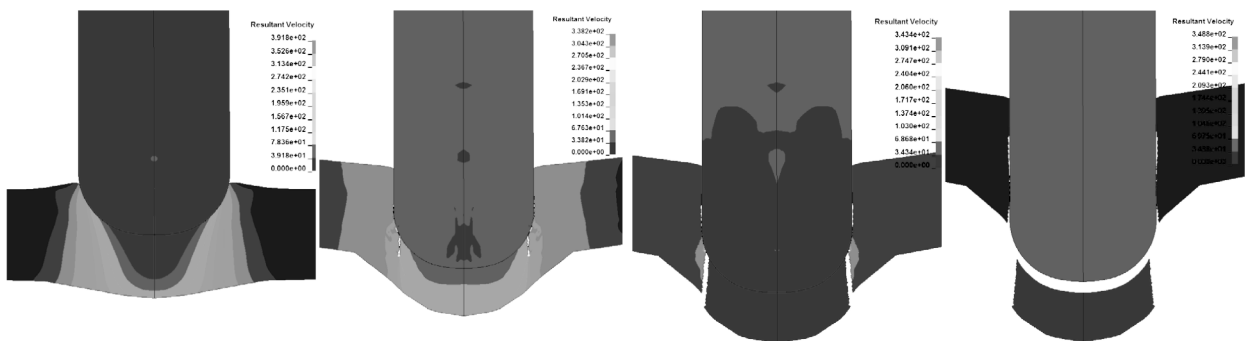


Рис. 8. Типовий процес пробиття півсферичним ударником перешкоди та поля результуючої швидкості

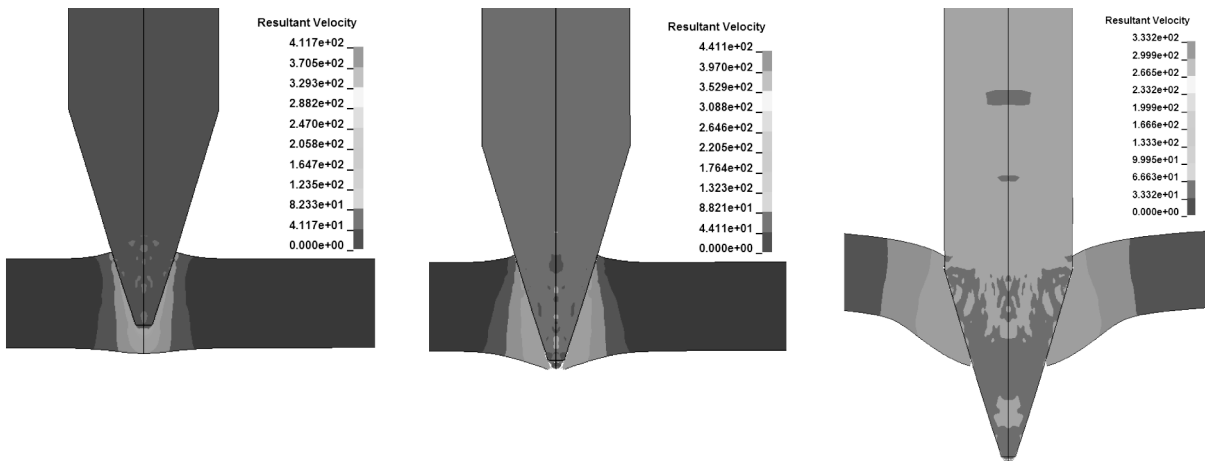


Рис. 9. Типовий процес пробиття конічним ударником перешкоди та поля результуючої швидкості

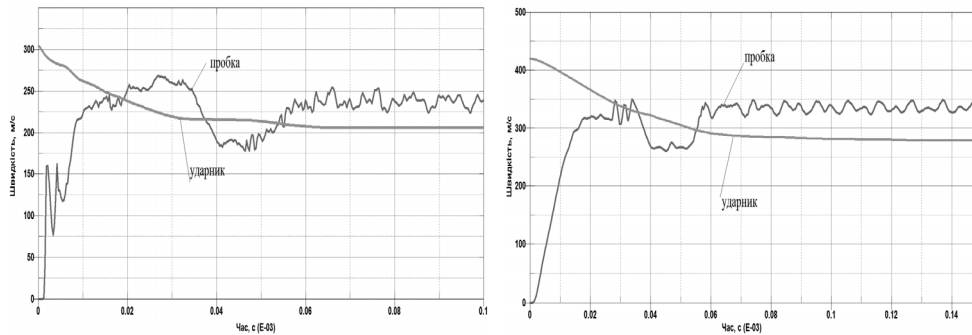


Рис. 10. Типові залежності зміни швидкості ударника та пробки:

а – циліндрична форма ударника, б – півсферична форма головної частини ударника

За результатами проведених досліджень можна зробити такі **висновки**:

розроблена числова модель для дослідження пробиття ударниками з різною формою головної частини гомогенних перешкод. Порівняння отриманих числових значень з даними експериментальних досліджень показують, що відносна похибка вирішення задачі пробиття ударником з різними геометричними формами головної частини гомогенної перешкоди знаходиться в діапазоні 2–10%;

за результатами оцінки збіжності чисельного рішення отримані значення розмірів скінченних елементів, що дозволяють отримувати адекватне рішення в діапазоні швидкості удару 180–450 м/с;

розроблена числова модель може бути використана для оцінки захисних елементів у конструкції бойових броньованих машин та проведення їх параметричного синтезу за обраним критерієм ефективності.

У подальшому доцільні дослідження взаємодії ударника з перешкодою на швидкостях взаємодії до 1500 м/с.

### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Summary of global armoured vehicle market report 2013. URL: <http://www.defenceiq.com/armoured-vehicles/articles/summary-of-global-armoured-vehicle-market-report-2>].
- Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2» / С. П. Бісик, І. Б. Чепков, М. І. Васьківський [та ін.] // Озброєння та військова техніка : щоквартальний наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2016. № 1 (9). С. 26–31.
- Майстренко А. Л., Куш В. І., Кулич В. Г., Нешпор О. В., Бісик С. П. Стримати кулю. Захист бойових броньованих машин від ураження кулями калібру 12,7 мм та 14,5 мм // Defense express. 2017. Вып. № 3–4. С. 58–60.
- Майстренко А. Л., Куш В. І., Кулич В. Г., Нешпор О. В., Бісик С. П. Підвищення захисту бойових броньованих машин від ураження 12,7 мм кулями Б-32 // Озброєння та військова техніка : щоквартальний наук.-техн. журн. / ЦНДІ ОВТ ЗСУ. 2017. № 1 (13). С. 18–23.
- Borvik T., Langseth M., Hopperstad O. S., Malo K. A. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. P. I. Experimental study // International Journal of Impact Engineering 27 (2002). 19–35.
- Криворучко Д. В., Залога В. А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : моногр. / под общ. ред. В. А. Залого. Сумы : Университетская книга, 2012. 496 с.
- Криворучко Д. В., Залога В. О., Корбач В. Г. Основи 3D-модельовання процесів механічної обробки методом скінченних елементів. Сумы : Вид-во СумДУ, 2010. 209 с.
- Borvik T., Hopperstad O. S., Berstad T., Langseth M. Perforation of 12mm thick steel plates by 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. P. II. Numerical simulations // International Journal of Impact Engineering 27 (2002). 37–64.
- Рудаков К. Н. FEMAP 10.2.0 Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. К. : КПИ, 2011. 317 с.
- Hollquist J. O. LS-DYNA Theory manual. March 2006.

**Рецензент М. І. Васьківський**, д-р техн. наук, проф. (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)