

УДК 004.942:662.43

Ю.М. Сидоренко, Я.О. Мариненко

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РІВНЯННЯ СТАНУ ПРОДУКТІВ ДЕТОНАЦІЇ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИБУХУ САМОРОБНИХ ВИБУХОВИХ ПРИСТРОЇВ

To new methods of forensic analysis of home-made explosive devices may include a method of computer simulation of The computer simulation method belongs to new methods of forensic analysis of home-made explosive devices. The library of most computer programs well-known around the world, for example, ANSYS/AUTODYN, LS-DYNA, comprises such items as state equations describing the behavior of the detonation products (DP) mainly explosives (HE) of foreign origin. In this case, the amount of explosives, whose numeric parameter constants are known, is limited. In addition, it is unknown what will be the constants values of these equations for home-made explosives. This paper describes L.P. Orlenko mathematical method of the isentrope approximation by JWL isentrope equation. We propose the criterion of finding a minimum as the approximation criterion normalized by the amount of pressure DP area values between the curves of these equations. We test the adequacy of the proposed approximation method by comparing the experimental and theoretical data rate of expansion of the outer surface of the copper tube "cylinder-test" derived by computer GEFEST and LS-DYNA. The calculations show that the error does not exceed 10 %.

Вступ

З кожним роком у світі неухильно збільшується кількість вибухів, проведених з використанням саморобних вибухових пристроїв (СВП). Крім того, кожний новий теракт проводиться із застосуванням все більш складних, з технічної точки зору, СВП, що ускладнює процес проведення судового експертного дослідження та розкриття таких злочинів [1, 2] і вимагає розроблення нових методів їх криміналістичного аналізу. До них можна віднести методи комп'ютерного моделювання процесу вибуху різноманітних СВП. З їх допомогою, наприклад, можна відповісти на питання про значення таких параметрів:

- осколкового поля, яке формується внаслідок руйнування металевих елементів конструкції СВП;
- повітряної ударної хвилі, сформованої внаслідок процесу детонації конденсованого заряду вибухової речовини (ВР) тощо.

Наявність такої інформації дасть можливість, з одного боку, правильно встановити рівень небезпеки уражаючих факторів вибуху СВП [3], а з іншого, зменшити кількість дорогих натурних експериментальних досліджень. Крім того, комп'ютерне моделювання може стати єдиним методом проведення вибухотехнічної експертизи, коли здійснення натурального експериментального дослідження є дуже складним або в принципі неможливим. Наприклад, комп'ютерне моделювання стало одним з основних методів проведення комплексної судової вибухо- та пожежно-технічної експертизи

наслідків вибуху в багатоповерховому будинку в м. Євпаторія [4, 5].

Проте використання такого методу теж має певні труднощі. Це пов'язано з проблемою вибору та застосування рівняння стану продуктів детонації (ПД) конденсованого заряду ВР, що дає змогу адекватно математично описати процес їх розширення. Саме ПД, що розширюються під дією високого внутрішнього тиску, стають причиною руйнування металевих елементів конструкції СВП. Внаслідок цього формується небезпечне для людини осколкове поле й ударна повітряна хвиля.

До бібліотеки більшості комп'ютерних програм зі світовим ім'ям, зокрема, ANSYS/AUTODYN, LS-DYNA [6-9], занесені такі рівняння стану ВР (EOS – Equation of State):

- Джонса–Уілкінса–Лі (JWL – Jones–Wilkins–Lee):

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

де p, V – тиск і відносний питомий об'єм ПД; \bar{E} – внутрішня енергія ПД на одиницю об'єму, Дж/м³; A, B, R_1, R_2, ω – емпіричні константи;

- Джонса–Уілкінса–Лі–Бекера (JWLБ – Jones–Wilkins–Lee–Baker):

$$p = \sum_{i=1}^5 A_i \left(1 - \frac{\lambda}{R_i V} \right) e^{-R_i V} + \frac{\lambda E}{V} + C \left(1 - \frac{\lambda}{\omega} \right) V^{-(\omega+1)},$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^5 A_i (A_{\lambda i} V + B_{\lambda i}) e^{-R_{\lambda i} V} + \omega,$$

де A_i , $A_{\lambda i}$, $B_{\lambda i}$, R_i , $R_{\lambda i}$, C , ω – емпіричні константи.

До незручностей їх використання при проведенні математичного моделювання процесу вибуху СВП можна віднести те, що дані рівняння описують поведінку ПД обмеженої кількості вибухових речовин лише закордонного виробництва. Для опису поведінки ПД ВР вітчизняного виробництва, наприклад, амоніту 6ЖВ, що використовується для зварювання матеріалів вибухом [10, 11], з одного боку, проводяться складні експериментальні дослідження з метою встановлення числових значень параметричних констант даних рівнянь. З іншого, проводиться пошук ВР закордонного виробництва, яка є аналогом ВР вітчизняного виробництва. Крім того, які будуть числові значення параметричних констант цих рівнянь для ВР нелегального саморобного кустарного виробництва не відомо.

Постановка задачі

Метою досліджень є знаходження способу, за допомогою якого можна проводити моделювання процесу вибуху саморобних вибухових пристроїв, споряджених як промисловими вибуховими речовинами, так і речовинами саморобного кустарного виробництва з використанням всевітньо відомих програмних продуктів, зокрема, LS-DYNA та ANSYS/AUTODYN, без внесення змін у внутрішній код цих програм.

Методика досліджень

У зв'язку з тим, що в багатьох випадках процес розширення ПД можна вважати ізоентропічним [12], для розв'язання цієї проблеми можна замість рівняння стану ПД використовувати рівняння процесу (ізоентропу), наприклад, у формі ступеневого двочлена, який запропонував Л.П. Орленко [12, 13]:

$$p_s = B_0 \cdot \rho^k + C_0 \cdot \rho^{\Gamma+1}, \quad (2)$$

де B_0 , C_0 , k – параметричні константи рівняння; Γ – коефіцієнт Грюнайзена. Для продуктів детонації конденсованих ВР значення коефіцієнта Γ коливається в межах від 0,25–0,35 для малих значень густини $\rho = 1000$ – 1600 кг/м³ до 0,7–1 для $\rho \geq 2000$ кг/м³ [12].

Параметри B_0 , C_0 , k можна визначити через параметри детонаційної хвилі в точці Чепмена–Жуге таким чином [12, 13]:

$$B_0 = \frac{P_H - \Gamma \cdot \rho_H \cdot E_H}{\rho_H^k} \left(\frac{k-1}{k-1-\Gamma} \right), \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{P_H - B_0 \cdot \rho_H^k}{\rho_H^{\Gamma+1}}, \quad (4)$$

$$k = 1 + \frac{2-\Gamma}{1 - \frac{\Gamma}{6} \left(1 + \frac{32Q}{D^2} \right)}, \quad (5)$$

де Q – теплота вибухового перетворення заряду ВР в ПД, Дж/кг; D – швидкість руху детонаційної хвилі по заряду ВР, м/с; P_H , ρ_H , E_H – тиск (Па), густина (кг/м³) та енергія (Дж/кг) ПД на фронті детонаційної хвилі.

Параметри на фронті детонаційної хвилі можна знайти за допомогою таких залежностей:

$$P_H = \frac{\rho_0 \cdot D^2}{4}; \quad \rho_H = \frac{4}{3} \rho_0; \quad (6)$$

$$E_H = \frac{P_H}{2} \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H} \right) + Q,$$

де ρ_0 – початкова густина вибухової речовини.

Таким чином, для того щоб скористатися рівнянням ізоентропи в формі Л.П. Орленко для математичного опису поведінки ПД конденсованої ВР необхідно знати числові значення лише трьох її параметрів, а саме: ρ_0 , D і Q . Це дає можливість проводити математичні дослідження значно більшої кількості конденсованих ВР, ніж для раніше згаданих рівнянь стану ПД, в т.ч. як для ВР вітчизняного промислового виробництва, так і для ВР нелегального саморобного кустарного виробництва.

Але тепер виникає проблема безпосереднього застосування рівняння ізоентропи в формі Л.П. Орленко в конкретній комп'ютерній програмі.

Це рівняння вже використовується в програмі “ГЕФЕСТ” [14, 15]. Але вона була написана для проведення математичного моделювання процесу вибухової взаємодії тільки двох середовищ, а саме, металевому корпусу осколко-небезпечних виробів і газоподібних продуктів детонації заряду ВР. Процес їх взаємодії описується у двовимірній (циліндричній) континуальній (тобто без врахування процесів руйнування корпусу виробу) постановці. Крім того, точка ініціації детонації заряду ВР знаходиться виключно на осі симетрії виробу. Такі

обмеження значно звужують можливості використання цього програмного продукту.

З іншого боку, незважаючи на те, що такі комп'ютерні програми, як ANSYS/AUTODYN, LS-DYNA, дають змогу проводити моделювання процесу вибуху СВП в більш складній тривимірній постановці, в т.ч. із врахуванням процесів руйнування металевих деталей СВП, розробники цих програмних продуктів не заклали в них ні рівняння стану, ні ізоентропу ПД у формі Л.П. Орленко.

Щоб скористатися вказаними вище перевагами рівняння ізоентропи ПД у формі Л.П. Орленко в цих та інших програмах, можна запропонувати спосіб, за допомогою якого методом математичного перебору знаходиться відповідна група числових значень параметричних коефіцієнтів, наприклад, рівняння ізоентропи ПД у формі JWЛ [12]:

$$p_s = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + CV^{-(\omega+1)}, \quad (7)$$

де $A, B, C, R_1, R_2, \omega$ – емпіричні константи, які найкращим чином апроксимували б криву рівняння ізоентропи ПД у формі, запропонованій Л.П. Орленко.

Іншими словами, робиться спроба замінити рівняння стану ПД у формі JWЛ (7) рівнянням стану ПД у формі Л.П. Орленко (2) без внесення змін у код програм ANSYS/AUTODYN, LS-DYNA тощо.

Як критерій апроксимації можна запропонувати критерій пошуку мінімального значення нормованої на величину тиску ПД площі S^* між вказаними рівняннями (2) та (7):

$$S^* = \min \left(\sum_{i=1}^n \frac{S_i^{JWL} - S_i^{Орленко}}{P_i^{Орленко}} \right),$$

де $S_i^{JWL}, S_i^{Орленко}$ – площа i -ї криволінійної трапеції під кривою рівняння ізоентропи ПД у формі JWЛ та Л.П. Орленко відповідно; $P_i^{Орленко}$ – значення тиску ПД, який вираховується за допомогою рівняння стану ПД у формі Л.П. Орленко, яке відповідає площі i -ї криволінійної трапеції під цією кривою.

Додатковою умовою пошуку вказаної групи значень коефіцієнтів рівняння JWЛ (7) є те, що розраховане за його допомогою значення тиску на фронті детонаційної хвилі P_H має відрізнятись від аналогічного експериментального значення не більше ніж на 1 %, що в середньому не перевищує для різних ВР 0,1 ГПа.

Оцінка адекватності запропонованого методу розв'язання поставленої задачі

З метою встановлення величини похибки від заміни рівняння (7) рівнянням (2) були проведені математичні числові дослідження процесу розширення мідної трубки під дією внутрішнього вибухового навантаження. Ця методика використовується для визначення металльної здатності вибухових речовин шляхом встановлення величини швидкості розширення мідної трубки. Вперше ця методика описана у праці [16], її названо "Los Alamos Precision Cylinder Test", з часом назва скоротилася до відомої на сьогодні – "Циліндр-тест". Вітчизняним аналогом такого дослідження є "Методика "Т-20" (рис. 1, табл. 1) [12].

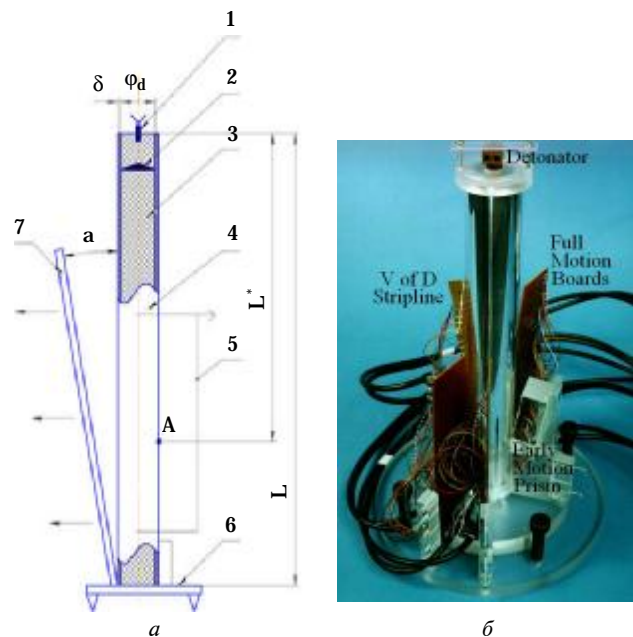


Рис. 1. Методика визначення металльної здатності ВР – "Циліндр-тест": а – схема, б – експериментальна установка [16]: 1 – детонатор (Detonator); 2 – плоскохвильовий генератор; 3 – заряд ВР; 4 – мідний корпус (трубка); 5 – датчик швидкості руху детонаційної хвилі (V of D Stripline); 6 – підставка, 7 – плоскопаралельна прозора пластинка з оргскла (Early Motion Prizm)

Таблиця 1. Розміри мідної трубки "Циліндр-тесту" та методики Т-20

Тест	Довжина, L, мм	Внутрішній діаметр, d ₀ , мм	Товщина стінки, δ ₀ , мм
Методика Т-20	180–200	20	2
Циліндр-тест	300	25,4	2,6

Експериментально доведено, що при розширенні мідної трубки з товщиною стінки $\delta_0 = 0,1 d_0$ до величини $d = 3 d_0$ її розриву не відбувається. При цьому продукти детонації заряду ВР розширюються ізотропічно [12], тому під час проведення експериментальних досліджень встановлювалось значення швидкості руху точки А зовнішньої бокової поверхні мідної трубки (рис. 1), що знаходиться на відстані $L^* = 177,8$ мм (7") від місця ініціації детонації заряду ВВ у той момент, коли вона перемішувалась відносно свого початкового положення на 5 та 19 мм. Продукти детонації при цьому в середньому розширюються орієнтовно в сім разів. Ці величини відповідно позначаються так:

- v_5 – на відстані $R - R_0 = 5$ мм ($R / R_0 = 1,33$);
- v_{19} – на відстані $R - R_0 = 19$ мм ($R / R_0 = 2,24$).

Наприклад, у [17] за допомогою цієї методики було проведено оцінку впливу старіння ВР – РВХ 9404 – на її металеву здатність.

Крім того, експериментальні дані про швидкість циліндричної мідної трубки, отримані за методикою “Циліндр-тест”, не лише характеризують потужність ВР, але й слугують основою для знаходження коефіцієнтів рівнянь ізентропи продуктів вибуху, що розширюються, зокрема, рівняння у формі JWL. Приклад використання цієї методики для встановлення зазначених вище коефіцієнтів рівняння JWL для ВР, що містять октоген (НМХ), наведено у [18].

Для проведення порівняльного моделювання процесу розширення мідної трубки відповідно до методики “Циліндр-тесту” використовувалась програма “ГЕФЕСТ” [14, 15].

Аналогічні комп’ютерні дослідження проводилися в США в наукових лабораторіях в Лос-Аламосі “Los Alamos Scientific Laboratory” і

Ліверморі “Lawrence Livermore Laboratory” [19].

Числовий аналіз у програмі “ГЕФЕСТ” проводився в двовимірній осесиметричній континуальній ейлеревій постановці.

Для опису поведінки матеріалу трубки використовувалось рівняння, що описує об’ємне стискання металу в формі Тета:

$$p = A \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^n - 1 \right].$$

Для міді густиною $\gamma_0 = 8940$ кг/м³, $A = 30,2$ ГПа, $n = 4,8$ [13]. При цьому дія цього рівняння розповсюджувалася на область розтягувальних зусиль [20].

З метою проведення чисельного моделювання адекватного реальному процесу висота заряду ВР з боку точки ініціації його детонації була збільшена на 2" (50 мм). Збільшення висоти заряду ВР дало змогу промоделювати роботу плоскохвильового генератора 2 (див. рис. 1), призначеного для перетворення форми детонаційної хвилі зі сферичної на плоску.

Дослідження проводились для п’яти вибухових сумішей, енергетичні характеристики яких наведено в табл. 2 [12, 21]. Крім того, до табл. 2 занесені числові значення розрахованих за допомогою рівнянь (3)–(6) параметричних констант ізентропи ПД у формі Л.П. Орленко.

Значення експериментальних [12, 21] та розрахункових параметричних констант рівняння (2), а також величина нормованої на величину тиску ПД площі S^* між кривими, що відповідають рівнянням (3) та (2) стану, наведено в табл. 3.

З представлених в табл. 3 даних видно, що практично всі відповідні експериментальні та розрахункові значення параметричних коефіцієнтів рівняння ізентропи в формі JWL відрізняються одне від одного на понад 10 %. Максимальна розбіжність між цими параметрами становить понад 600 % для РВХ-9010. Водночас

Таблиця 2. Характеристики ВР та значення параметричних констант ізентропи ПД у формі Л.П. Орленко

№ п/п	ВР	Характеристики ВР				Параметри рівняння ізентропи у формі Л.П. Орленко			
		ρ_0 , кг/м ³	D , м/с	p_H , ГПа	Q , кДж/кг	B_0	C_0	k	Γ
2	LX-04-1	1865	8470	34	5246	1,303	18659	3,061	0,42
3	Cyclotol	1754	8250	32	5082	1,489	27489	3,055	0,35
4	Octol	1821	8480	34,2	5208	1,506	20765	3,05	0,38
5	TNT	1630	6930	21	4242	0,828	50392	3,101	0,3
6	PBX-9010	1787	8390	34	5292	1,431	29447	3,058	0,35

Таблиця 3. Експериментальні та розрахункові параметри ізоентропи ПД у формі JWL

Вибухова речовина	Параметр JWL							S*
	Тип	A, ГПа	B, ГПа	C, ГПа	R ₁	R ₂	ω	
LX-04-1	експериментальне	836,4	12,98	1,471	4,62	1,250	0,42	82
	розрахункове	739,5	18,09	2,149	4,61	1,349	0,67	
	різниця, %	11,6	39,4	46,1	0,2	7,9	59,5	
Cyclotol	експериментальне	603,4	9,920	1,075	4,30	1,10	0,35	88
	розрахункове	715,0	27,00	2,500	4,89	1,70	0,699	
	різниця, %	18,5	172,2	132,6	13,7	54,5	99,7	
Octol	експериментальне	748,6	13,38	1,167	4,50	1,20	0,38	81
	розрахункове	619,0	15,60	1,899	4,35	1,299	0,65	
	різниця, %	17,3	16,6	62,7	3,3	8,3	71,1	
TNT	експериментальне	371,2	3,230	1,045	4,15	0,95	0,30	61
	розрахункове	321,0	6,679	1,079	4,08	1,149	0,38	
	різниця, %	13,5	106,8	3,3	1,7	20,9	26,7	
PBX-9010	експериментальне	581,4	6,801	0,234	4,10	1,00	0,35	81
	розрахункове	507,0	13,00	1,800	4,09	1,25	0,60	
	різниця, %	12,8	91,1	669,2	0,2	25,0	71,4	

значення параметра S^* для чотирьох з п'яти розглянутих вибухових речовин перебуває в діапазоні 80–90, а для TNT становить близько 60.

У зв'язку з тим, що, як було зазначено вище, при розширенні мідної трубки до величини $d = 3 \cdot d_0$ продукти детонації заряду ВР розширюються ізоентропічно, то замість рівняння стану ПД у формі JWL (1) в код програми "ГЕФЕСТ" було закладено рівняння ізоентропи в формі JWL (7).

Дослідження проводилися як з експериментальними значеннями параметричних констант ізоентропи JWL, так і з розрахунковими (див. табл. 3).

Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибухового розширення мідної трубки, спорядженої тринітротолуолом за методикою "Циліндр-тесту", проведеного з використанням програми "ГЕФЕСТ", наведено на рис. 2.

Після проведення розрахунків було встановлено значення радіальних швидкостей зовнішньої поверхні мідної трубки точки А (рис. 1) – v_5 та v_{19} . Результати математичних досліджень для порівняння з відповідними експериментальними даними подано в табл. 4.

За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що код програми "ГЕФЕСТ" з достатнім рівнем точності відтворює процес розширення мідної трубки. Середня величина похибки відтворення величини швидкості розширення зовнішньої поверхні цієї трубки з використанням експериментальних

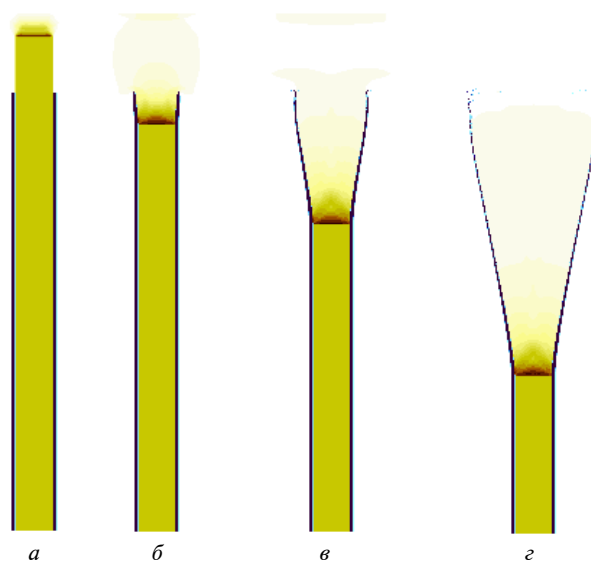


Рис. 2. Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибухового розширення мідної трубки "Циліндр-тесту" (програма "ГЕФЕСТ"): а – 1,26 мкс; б – 10 мкс; в – 20 мкс; з – 35 мкс

значень параметричних констант рівняння JWL становить 2–2,5 %.

Водночас комп'ютерне моделювання показало, що запропонований метод знаходження числових значень параметричних констант рівняння ізоентропи в формі JWL шляхом апроксимації ізоентропи у формі Л.П. Орленко також має доволі високий рівень точності. Максимальна похибка для такого моделювання становить 5 %.

Таблиця 4. Значення швидкості розширення зовнішньої поверхні мідної трубки (програма "ГЕФЕСТ")

ВР	Параметр	Експериментальні дані	Розрахункові дані			
			Параметричні константи ізоентропи в формі JWЛ			
			Експериментальні	Похибка, %	Розрахункові	Похибка, %
LX-04-1	v_5 , м/с	1490	1498,86	0,59	1570,18	5,11
	v_{19} , м/с	1710	1703,35	0,39	1767,93	3,28
Cyclotol	v_5 , м/с	1460	1444,73	1,05	1495,2	2,35
	v_{19} , м/с	1700	1668,34	1,86	1634,5	3,85
Octol	v_5 , м/с	1530	1519,67	0,68	1558,95	1,86
	v_{19} , м/с	1750	1713,41	2,09	1759,19	0,52
TNT	v_5 , м/с	1180	1167,26	1,08	1204,06	2,00
	v_{19} , м/с	1400	1368,36	2,26	1420,43	1,44
PBX-9010	v_5 , м/с	1450	1419,29	2,12	1402,99	3,24
	v_{19} , м/с	1710	1566,26	8,41	1755,2	2,58

Крім того, було проведено аналогічне моделювання процесу розширення мідної трубки з використанням всевітньо відомої програми LS-DYNA.

Моделювання в цій програмі проводилося також у континуальній постановці. Але, на відміну від програми "ГЕФЕСТ", використовувався тривимірний змішаний лагранжево-ейлеровий підхід щодо опису поведінки середовищ, що деформуються. Лагранжевим підходом, який базується на використанні жорстко пов'язаної із середовищем скінченно-елементної сітки, описувалася поведінка мідної трубки. Ейлеровим підходом, який ґрунтується на використанні жорсткої та незв'язаної із середовищем скінченно-елементної сітки, описувалася поведінка продуктів детонації та повітря, яке їх оточувало.

Для опису поведінки матеріалу трубки – міді – використовувалась математична модель ідеального пружно-пластичного середовища з такими параметрами: модуль Юнга $E = 1,13 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,32$, границя текучості $\sigma_T = 150$ МПа.

У зв'язку з тим, що для опису поведінки ПД у програмі LS-DYNA не передбачено використання рівняння ізоентропи в формі JWЛ (7), а в код програми її розробник заклав рівняння стану ПД у формі JWЛ (1), то для знаходження відповідної величини \bar{E} (внутрішня енергія ПД на одиницю об'єму, Дж/м³) можна скористатися формулою

$$\bar{E}_H = E_H \cdot \rho_0.$$

Крім того, знайдені раніше за допомогою запропонованої методики значення констант A , B , R_1 , R_2 , ω (див. табл. 3) напряму без жодних змін можна використовувати в рівнянні стану ПД (1).

Для опису поведінки третього середовища – повітря, використовувалось рівняння стану у вигляді лінійного поліному (LINEAR_POLYNOMIAL) [8].

Враховуючи те, що конструкція трубки "Циліндр-тесту" має осьову симетрію, для економії часу на розрахунок і зменшення розрахункового навантаження на ПЕОМ проводилося моделювання процесу розширення лише 1/4 геометрії трубки з накладеними на неї відповідними граничними умовами.

Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибухового розширення мідної трубки за методикою "Циліндр-тесту", проведеного з використанням програми LS-DYNA, наведено на рис. 3.

Відповідні розрахункові залежності радіального переміщення та радіальної швидкості руху зовнішньої поверхні мідної трубки (рис. 1, точка А) подано на рис. 4 і 5.

Аналізуючи наведену на рис. 4 і 5 інформацію, можна зробити висновок, що дані про значення швидкості розширення корпусу мідної трубки "Циліндр-тесту", отримані за допомогою програми LS-DYNA, підтверджують відомий експериментальний результат, що для більшості ВР близько 75 % кінетичної енергії мідна трубка отримує в момент її розширення до $R \approx 1,33 R_0$. Близько 90 % кінетичної енергії вона отримує на відстані $R \approx 2 R_0$ [12].

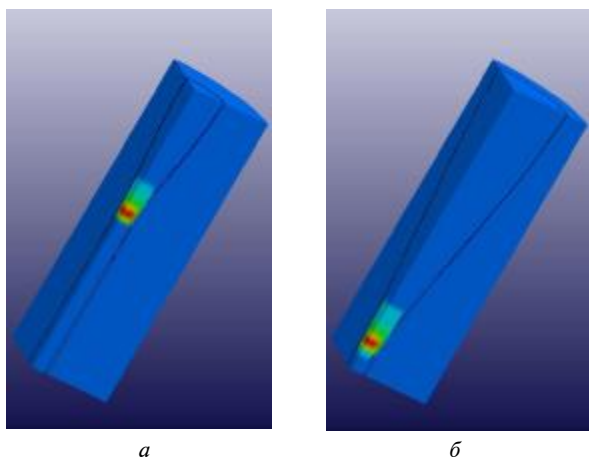


Рис. 3. Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибухового розширення мідної трубки "Циліндр-тесту" (LS-DYNA): а – 20 мкс; б – 40 мкс

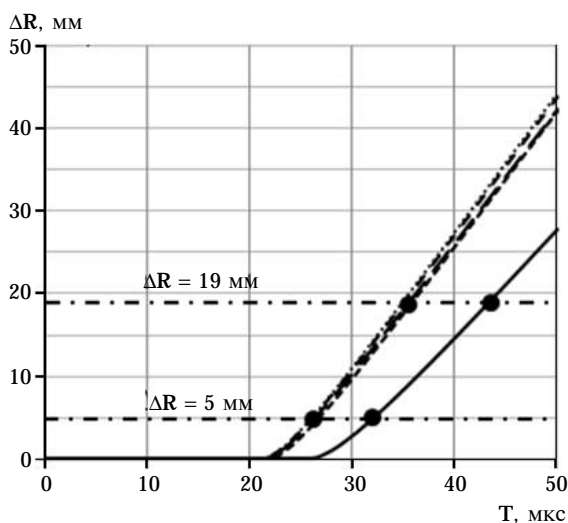


Рис. 4. Радіальне переміщення зовнішньої поверхні мідної трубки "Циліндр-тесту" (LS-DYNA)

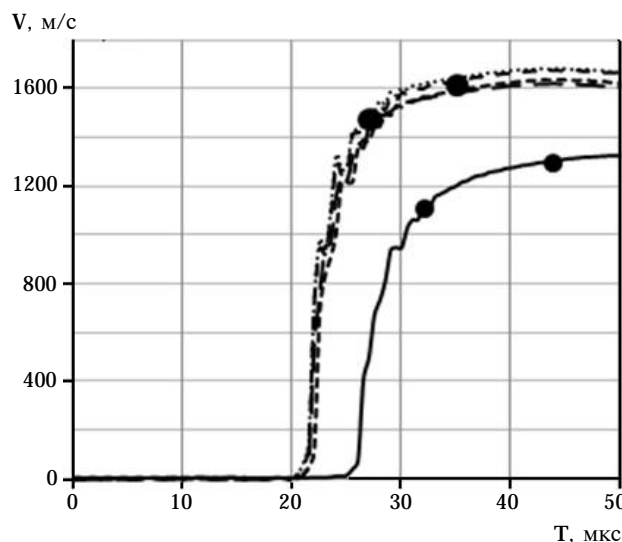


Рис. 5. Радіальна компонента швидкості руху зовнішньої поверхні мідної трубки "Циліндр-тесту" (LS-DYNA): — TNT; - - - - PBX-9010; Octol; - · - · - LX-041; - - - - Cyclotol

Також до табл. 5 занесені експериментальні та розрахункові значення швидкості розширення трубки "Циліндр-тесту", що відповідають закладеному в програму LS-DYNA рівнянню стану JWL з експериментальними та розрахунковими значеннями параметричних констант.

Результати комп'ютерного моделювання, наведені у табл. 5, свідчать, що програма LS-DYNA, як і програма "ГЕФЕСТ", з достатнім рівнем точності описує процес розширення мідної трубки як за умови використання експериментальних значень коефіцієнтів рівняння стану ПД у формі JWL, так і розрахованих за до-

Таблиця 5. Значення швидкості розширення зовнішньої поверхні мідної трубки "Циліндр-тесту" (програма LS-DYNA)

ВР	Параметр	Експериментальні дані	Розрахункові дані			
			Параметричні константи рівняння стану ПД в формі JWL			
			Експериментальні	Похибка, %	Розрахункові	Похибка, %
LX-04-1	v_5 , м/с	1490	1431,05	3,96	1499,10	0,61
	v_{19} , м/с	1710	1632,42	4,54	1709,18	0,05
Cyclotol	v_5 , м/с	1460	1386,28	5,05	1471,84	0,81
	v_{19} , м/с	1700	1605,21	5,58	1675,06	1,47
Octol	v_5 , м/с	1530	1462,77	4,39	1500,20	1,95
	v_{19} , м/с	1750	1650,62	5,68	1719,71	1,73
TNT	v_5 , м/с	1180	1107,78	6,12	1198,08	1,53
	v_{19} , м/с	1400	1304,30	6,84	1375,54	1,75
PBX-9010	v_5 , м/с	1450	1358,20	6,33	1446,65	0,23
	v_{19} , м/с	1710	1591,20	6,95	1661,69	2,83

помогою запропонованої методики. Величина максимальної похибки швидкості розширення зовнішньої поверхні трубки становить для v_5 – 6,33 %, а для v_{19} – 6,95 %.

Водночас комп'ютерне моделювання з використанням значень коефіцієнтів рівняння стану ПД у формі JWL, знайдених за допомогою запропонованого методу, має більш високий рівень точності. Максимальна похибка для такого моделювання не перевищує 3 %.

Якщо порівняти відповідні результати моделювання, проведені з використанням двох програм (див. табл. 4 і 5) та експериментальними значеннями параметричних констант рівняння ізоентропи JWL, то видно, що похибка числового аналізу, який був здійснений за допомогою програми LS-DYNA в середньому на 3–4 % більша за похибку програми “ГЕФЕСТ”. Це можна пояснити різною точністю 2 та 3D алгоритмів програм, а саме, значною різницею в кількості скінченних елементів на 2 та 3D задачі.

Висновки

Комп'ютерні програми “ГЕФЕСТ” та LS-DYNA з достатнім ступенем точності здатні описувати процес радіального розширення мідної трубки “Циліндр-тесту”, що відбувається під дією внутрішнього вибухового навантаження. Розбіжність експериментальних даних та результатів комп'ютерного моделювання не перевищує 10 %.

Запропонований метод апроксимації рівняння ізоентропи в формі Л.П. Орленко рів-

нянням ізоентропи в формі JWL дає можливість проводити моделювання процесу вибуху саморобних вибухових пристроїв, споряджених як промисловими вибуховими речовинами, так і речовинами саморобного кустарного виробництва, з використанням всесвітньо відомих програмних продуктів, зокрема ANSYS/AUTODYN та LS-DYNA, без внесення змін у внутрішній код цих програм.

Моделювання процесу вибуху мідної трубки “Циліндр-тесту” у тривимірній континуальній постановці, що проводилось з використанням програми LS-DYNA, показало, що на сьогодні розроблення та застосування нових комп'ютерних методів криміналістичного аналізу процесу вибуху саморобних вибухових пристроїв, що виконується в рамках судового експертного дослідження, можливе лише за умови використання високопотужної комп'ютерної техніки – спеціальних розрахункових кластерів.

Для використання запропонованого методу апроксимації ізоентропи в формі Л.П. Орленко рівнянням ізоентропи в формі JWL під час моделювання процесу розширення мідної трубки “Циліндр-тесту”, спорядженої вибуховою сумішшю, до складу якої входять речовини, які самостійно не вибухають, наприклад, алюміній, потрібні додаткові дослідження. Це пов'язано з тим, що наявність у ВР такої складової істотно відрізняє фізику процесу вибухового метання мідної трубки “циліндр-тесту” порівняно з “чистими” вибуховими сумішами.

1. *Новожилов Г.В., Вдовин Н.В., Михайлин А.И. и др.* Противодействие террористическим взрывам на воздушном транспорте. – М.: Изд. РАРАН, 2005. – Вып. 4 (45). Приложение. – 20 с.
2. *Пащенко В.И., Гудков В.В.* Использование специальных знаний при расследовании преступлений, совершенных с применением взрывных устройств: учебно-практ. пособие. – К.: ГНИЭКЦ МВД Украины, 2003. – 116 с.
3. *Курин Г.И.* Криминалистические исследования по реконструкции самодельных осколочных взрывных устройств по следам их воздействия на окружающую обстановку: Автореф. дисс. канд. юрид. наук. – Волгоград, 1999. – 24 с.
4. *Комиссионная комплексная взрыво-пожарно-техническая экспертиза по взрыву в жилом доме № 67 по ул. Некрасова в г. Евпатории Автономной республи-* ки Крым от 16.02.2009 года № 4/19-8/1. – Симферополь: ДНДЕКЦ МВС України. – 68 с.
5. *Пащенко В.И., Сидоренко Ю.М.* Компьютерное моделирование процесса взрывного метания металлической плиты // Вісн. НТУУ “КПІ”. Сер. Машинобудування. – 2011. – № 61. – С. 113–120.
6. ANSYS – Simulation Driven Product Development [Online]. Available: <http://www.ansys.com/>
7. LS-DYNA: динамика, нелинейности, crash-, drop-тесты, пробивание, композиты, пластическая обработка металлов [Online]. Available: <http://www.lsdyna.ru/>
8. *Муїземнек А.Ю., Богач А.А.* Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: учеб. пособие. – Пенза: Информ.-изд. центр ПГУ, 2005. – 106 с.

9. LS-DYNA 971. Keyword user's manual. Livermore software technology corporation (LSTC), vol. 1, 2206 p., 2007.
10. Шленский П.С., Сидоренко Ю.М. Численное моделирование разлета продуктов детонации и распространения воздушных ударных волн при взрыве плоского заряда конечных размеров // Вісн. НТУУ "КПІ". Сер. Машинобудування. – 2011. – № 62. – С. 223–232.
11. Yu. Sidorenko and P.S. Shlensky, "Stress-Deformed State of Elements of Tube Explosive Chamber", in Int. Conf. "Shock Waves in Condensed Matter", Kiev, Ukraine, 16-21 September 2012, pp. 413–418.
12. Андреев С.Г., Бабкин Ю.А., Баум Ф.А. и др. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – В 2 т. Т. 1. – 832 с.
13. Колпаков В.И., Ладов С.В., Рубцов А.А. Математическое моделирование функционирования кумулятивных зарядов: Метод. указания. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 36 с.
14. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н. и др. Численные методы в задачах физики взрыва и удара: Учебник для вузов / Под ред. В.В. Селиванова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 3. – 516 с.
15. Сидоренко Ю.М. Методика двумерного компьютерного моделирования процессов функционирования осколочно-фугасных боеприпасов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2005. – № 1. – С. 18–21.
16. A.W. Campbell and R. Engelke, The LASL Cylinder Test, JOWOG, 9 p., 1974.
17. L.G. Hill et al., "PBX 9404 Detonation Copper Cylinder Tests: A Comparison of New and Aged Material", Proc. of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, pp. 129-132, 1195, 28 June–3 July 2009 Nashville (Tennessee), USA. Available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3295044>
18. P.W. Merchant et al., "A WBL-Consistent JWL Equation of State for the HMX-Based Explosive EDC37 from Cylinder Tests", 12th Int. Detonation Symposium, August 11–16th, 2002, San Diego, California, USA
19. W. Fickett and L.M. Scherr, "Numerical Calculation of the Cylinder Test", Los Alamos Sci Laboratory of the University of California, USA, Report LA-5906 (UC-32 and UC-45), 1975, 32 p.
20. 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.
21. В.М. Dobratz and P.C. Crawford, "LLNL Explosive Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants", Livermore, California, 1985, 542 p.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
15 жовтня 2012 року