

ПРО ВПЛИВ КАРТОННОГО КОРПУСУ ЗАРЯДУ ВИБУХОВОЇ РЕЧОВИНИ НА СТУПІНЬ ДЕФОРМУВАННЯ КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ЗНЕШКОДЖЕННЯ САМОРОБНИХ ВИБУХОВИХ ПРИСТРОЇВ

Sydorenko Yu., Marynenko Ya.
The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (yura_michael@ukr.net)

THE INFLUENCES OF THE EXPLOSIVES BODY PAPER THICKNESS TO DEGREE OF DEFORMATION OF HOME-MADE BOMB DEFUSE CONTAINER

В роботі розглядається питання створення адекватної математичної моделі процесу деформування корпусу спеціального контейнеру під дією внутрішнього тиску, що утворюється в результаті вибуху у нього в середині саморобного вибухового пристрою (СВП), шляхом порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень. За допомогою розробленої моделі була проведена оцінка впливу товщини стінки картонного корпусу моделі СВП на ступінь деформування корпусу контейнера. Результати проведених досліджень будуть корисними для фахівців, що займаються створенням пристроїв вибухозахисту та експертам криміналістам для розробки методологічних основ реконструкції вибухових пристроїв та проведення ситуаційних досліджень, які виконуються в рамках судової вибухо-технічної експертизи.

Ключові слова: вибух, вибухо-технічна експертиза, математичне моделювання процесу вибуху, детонація, TNT, LS-DYNA, саморобний вибуховий пристрій, деформування при вибуху, руйнування при вибуху, JWL, PLASTIC-KINEMATIC.

Вступ

З кожним роком кількість терористичних актів неухильно зростає. Особливої небезпеки вони набувають в місцях великого скупчення людей, наприклад, у транспорті. Тому, за вимогами Міжнародної організації цивільної авіації ICAO (27-ме виправлення до шостого додатку Чикагської конвенції), на всіх літаках, розрахованих на перевезення більш ніж 30 пасажирів, в обов'язковому порядку повинні бути передбачені засоби локалізації виявлених на борту саморобних вибухових пристроїв (СВП) [1].

Процес проектування таких засобів доволі складний і вимагає проведення оцінки працездатності великої кількості варіантів конструкції [2, 3]. Таким чином, крім експериментальних досліджень в процесі проектування все більше використовуються методи комп'ютерного моделювання, які дозволяють знизити його собівартість. Але якість такого чисельного аналізу залежить від ступеня адекватності побудованої математичної моделі реальному фізичному процесу, що моделюється.

Постановка задачі

В даній статті розглядається питання створення адекватної математичної моделі процесу деформування корпусу контейнеру (рис. 1) під дією внутрішнього тиску, що утворюється в результаті вибуху у нього в середині СВП. Крім того, за допомогою даної моделі була проведена оцінка впливу товщини стінки картонного корпусу СВП на ступінь деформування корпусу контейнера.

Основним силовим елементом засобу знешкодження, що досліджувався, є виготовлений зі сталі циліндричний корпус 1, який повинен зменшити негативний вплив уражаючих факторів вибуху СВП за рахунок свого пластичного деформування.

Був розглянутий корпус контейнера товщиною $t=10$ мм, довжиною $L=700$ мм та внутрішнім діаметром $D=125$ мм зі симетричним розміщенням моделі СВП в середині нього, тобто, коли повздовжня вісь симетрії моделі СВП співпадає з повздовжньою віссю симетрії корпусу контейнера.

Для такої схеми взаємодії СВП та контейнера були проведені експериментальні дослідження [4] з метою оцінки його спроможності витримувати внутрішнє вибухове навантаження. Для цього була обрана вибухова речовина (ВР) – тринітротолуол (ТНТ) масою 400 г.

Заряд ВР виготовлявся шляхом засипання порошку ТНТ в спеціальну циліндричну картонну форму (висотою 170 мм і внутрішнім діаметром 62 мм) в результаті чого середня густина заряду ВР становила $\rho_0=800$ кг/м³.

Загальний вигляд моделі СВП зображений на рис. 2.

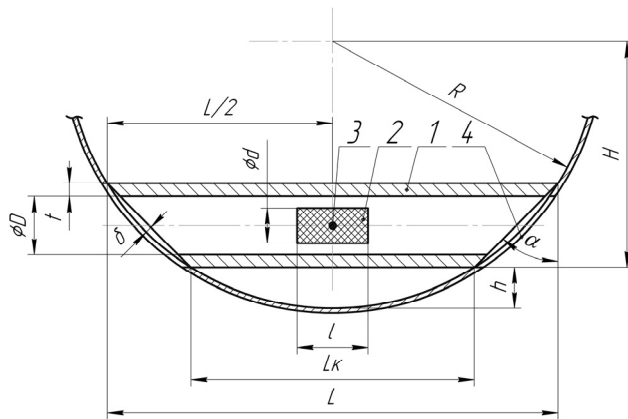


Рис. 1. Схема контейнера для знешкодження СВІ на борту літака:
1 – циліндричний корпус, 2 – заряд вибухової речовини (ВР),
3 – точка ініціації детонації заряду ВР, 4 – аеродинамічний обтічник літака

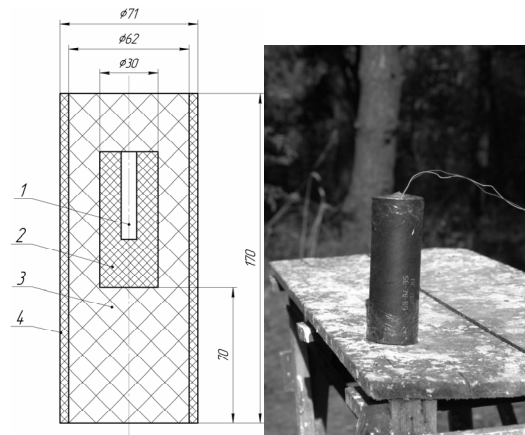


Рис. 2. Модель саморобного вибухового пристрою: 1 – детонатор; 2 – ініціувальний заряд вибухової речовини; 3 – заряд ТНТ; 4 – картонний корпус

За результатами проведених експериментальних досліджень було встановлено, що ступінь розширення зовнішньої поверхні корпусу контейнера в центральному поперечному перерізі в середньому становить 3,4...3,5 мм. Така інформація може бути використана під час побудови математичної моделі з метою оцінки її адекватності реальному фізичному процесу.

Методика математичного моделювання

Для побудови вказаної математичної моделі використовувалась комп'ютерна програма "ANSYS/LS-DYNA", яка є багатоцільовою та призначена для вирішення тривимірних динамічних задач механіки деформівного твердого тіла, механіки рідини і газу, теплопереносу та ін. [5-10]. В ній реалізована більшість з відомих на сьогоднішній день підходів до опису поведінки суцільного середовища під дією імпульсного навантаження [10, 11].

Найбільш часто для дослідження різноманітних вибухових процесів використовуються підходи – ейлеревий та лагранжевий. Ейлеревий підхід використовує нерухому скінченно-елементну сітку для опису поведінки середовищ, що рухаються, і, як правило, застосовується для досліджень течії рідини та газу. Лагранжевий підхід, навпаки, використовує рухому сітку, яка жорстко зв'язується зі середовищем та деформується разом з ним. Такий підхід застосовується для дослідження поведінки твердих тіл, в тому числі металів. У зв'язку з тим, що в нашій задачі присутні як газоподібні середовища (продукти детонації заряду ВР (ПД) та повітря), так і металеві (корпус контейнера), то доцільно в математичній моделі використовувати змішаний лагранжево-ейлеревий підхід.

Таким чином, ейлеревим підходом в нашій математичній моделі буде:

1. описана поведінка оточуючого заряду ВР повітря з початковим значенням густини $\rho_0=1,26 \text{ кг/м}^3$ за допомогою рівняння стану в формі лінійного поліному:

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

де p , E , ρ – відповідно тиск, енергія та поточне значення густини повітря. Значення коефіцієнтів даного рівняння обираються згідно рекомендацій [8-10].

2. описаний процес розширення продуктів детонації заряду ВР за допомогою рівняння стану в формі Джонса-Уілкінса-Лі (JWL) [12, 13]:

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

де p , E , V – відповідно тиск, енергія та відносний об'єм ПД;

Слід зазначити, що в літературі для ВР ТНТ густиною $\rho_0=800 \text{ кг/м}^3$ відсутні чисельні експериментальні значення коефіцієнтів даного рівняння (A , B , R_1 , R_2 , ω , E). Тому дана проблема вирішувалась в наступній послідовності:

- розраховувались коефіцієнти рівняння стану ПД в формі Орленко, що має вигляд степеневого двохчлену [12, 14]:

$$p = B \cdot \rho^k + C \cdot \rho^{\Gamma+1},$$

де B , C , k – коефіцієнти, що знаходяться через параметри процесу детонації заряду ВР в точці Чепмена-Жуге [16]. Значення коефіцієнта Грюнайзена приймалось рівним $\Gamma=0,25$. При чому ПД на фронті детонаційної хвилі, що рухалась зі швидкістю $D=4340\text{ м/с}$, мали тиск $P_{C,\text{f}}=3,66\text{ ГПа}$ і густину $\rho_{C,\text{f}}=1090\text{ кг/м}^3$ [15].

- методом математичного перебору значень коефіцієнтів рівняння JWЛ знаходилась така група даних величин, коли крива JWЛ найкращим чином апроксимувала криву Орленко. Оцінка результату апроксимації проводилась з використанням критерію, згідно з яким знаходилось мінімальне значення нормованої на величину тиску площі між вказаними залежностями.

Результатом проведеної роботи стали значення коефіцієнтів рівняння JWЛ:

$$A=190\text{ ГПа}; B=2,5\text{ ГПа}; R_1=5; R_2=1,7; \omega=0,22; E_0=2,94\text{ ГПа}.$$

В математичній моделі лагранжевим підходом з використанням пружно-пластичної реологічної моделі матеріалу з кінематичним зміцненням "PLASTIC-KINEMATIC" [9, 10] була описана поведінка:

1. металевого корпусу контейнера який був виготовлений з конструкційної легованої сталі 38ХНЗМФА, що має наступні механічні характеристики (пруток $\varnothing 100\dots 300\text{ мм}$ при температурі $T=20^\circ\text{C}$): густина $\rho=7900\text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E=210\text{ ГПа}$, модуль зсуву $G=83\cdot 10\text{ ГПа}$, границя текучості $\sigma_T=785\text{ МПа}$, границя міцності $\sigma_B=930\text{ МПа}$, тангенційний модуль $E_T=1\text{ ГПа}$ [16-19].
2. картонного корпусу моделі СВП. Для знаходження значень параметрів ідеальної пружно-пластичної моделі картону були проведені відповідні експериментальні дослідження. Для цього виготовлялись зразки (рис. 3б) з розмірами прямокутного поперечного перерізу (табл. 1).

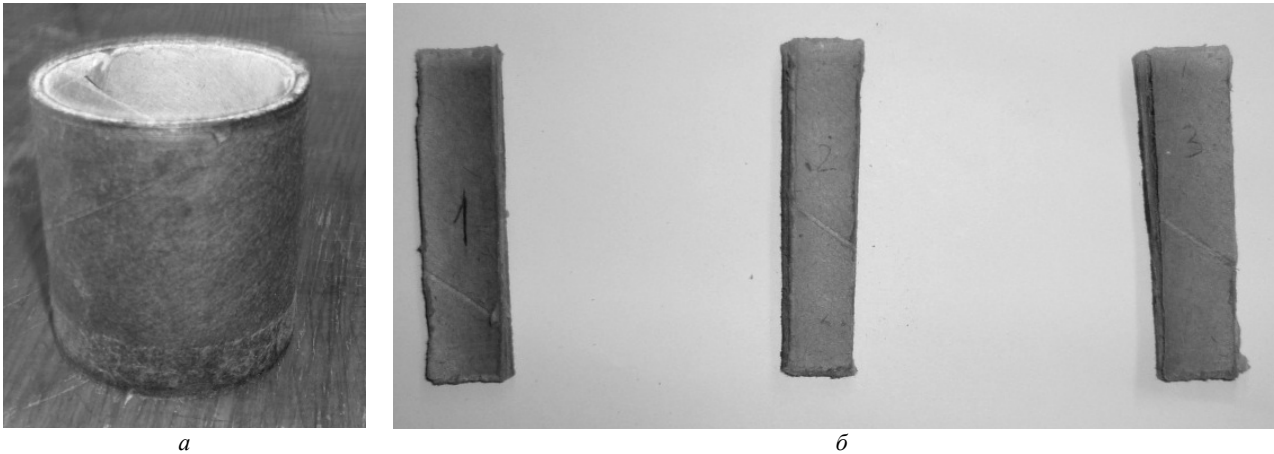


Рис. 3. Загальний вигляд:
а-картонного корпусу моделі СВП, б-зразків для механічних досліджень

Таблиця 1

Геометричні розміри зразків корпусу СВП

№ зразка	Довжина, мм	Ширина, мм	Товщина, мм
1	75,84	17,3	4,4
2	75,78	16,5	4,4
3	75,63	17,33	4,4

За допомогою терезів "Весы аналитические типа АДВ-200М" була встановлена маса зразка $m=47,8866\text{ г}$ та розраховано значення густини $\rho=685,76\text{ кг/м}^3$.

Для визначення механічних характеристик картонного корпусу СВП використовувалась універсальна випробувальна машина TIRAtest-2300. За результатами досліджень були встановлені значення: модуля Юнга $E=3,9\text{ ГПа}$, границі текучості $\sigma_T=4,45\text{ МПа}$, границі міцності $\sigma_B=18\text{ МПа}$. Значення коефіцієнту Пуассона приймалось рівним $\mu=0,293$.

Для відтворення при моделюванні процесу руйнування картонного корпусу в математичну модель був закладений деформаційний критерій міцності матеріалу. Лагранжеві елементи, що належать картонному корпусу моделі СВП, вибували з розрахунку, коли значення його пластичної деформації перевищували максимально допустиме значення $\varepsilon_p \leq [\varepsilon_p]=0,07$.

У зв'язку з тим, що конструкція контейнеру для знешкодження СВП та схема його взаємодії з моделюю СВП, що представлена на рис. 1, мають осову симетрію, то моделювання можна проводити в спрощеній двовимірній вісесиметричній постановці. Тому для побудови скінченно-елементної моделі задачі слід використовувати двовимірний вісесиметричний елемент PLANE 162.

Нажаль, в програмі ANSYS/LS-DYNA на сьогоднішній день не реалізований чисельний двовірний вісесиметричний алгоритм, що дозволяє проводити моделювання з використанням змішаного лагранжево-

ейлеревого підходу. Даний підхід реалізований лише у тривимірній постановці в якій для побудови відповідної скінченно-елементної моделі задачі потрібно використовувати скінченний елемент SOLID 164. З точки зору використання комп'ютерної техніки така тривимірна постановка є більш енерговитратною. Для її спрощення в математичну модель задачі можна закладати лише 1/8 частини геометрії контейнеру та моделі СВП з використанням відповідних граничних умов.

Результати математичного моделювання

Розроблена математична скінченно-елементна модель була використана для оцінки впливу товщини картонного корпусу 4 моделі СВП (рис.2) на ступінь деформування центрального поперечного перерізу контейнера для його знешкодження. Розглядалися варіанти конструкції СВП з товщиною картонної стінки 2, 4, 8 і 16 мм та варіант конструкції СВП у якій даний картонний корпус був відсутній.

Слід зазначити, що розрахунковий варіант за допомогою якого досліджувався вплив картонного корпусу моделі СВП з товщиною картонної стінки 4 мм можна використати для оцінки адекватності створеної математичної моделі.

Кадри комп'ютерного моделювання процесу внутрішнього вибухового навантаження корпусу контейнера для знешкодження саморобних вибухових пристроїв, яке було проведено з використанням розробленої та описаної раніше математичної моделі, зображені на рис. 4.

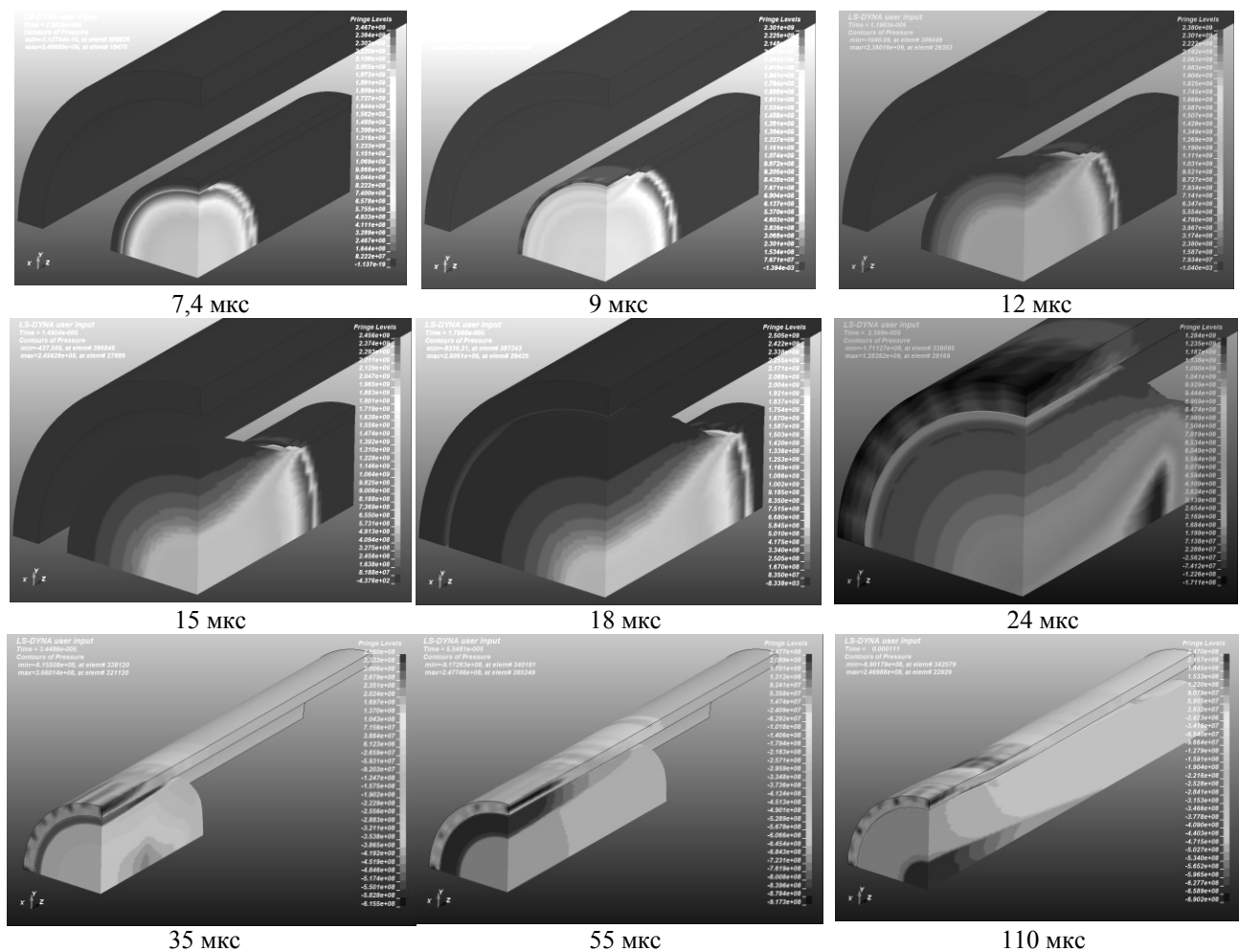


Рис. 4. Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибуху моделі СВП в середині контейнера для його знешкодження

Проаналізувавши представлені кадри комп'ютерного моделювання (рис. 4) можна стверджувати, що розроблена математична модель вірно відтворює основні фізичні процеси, а саме:

- через 7,4 мкс з моменту ініціації детонації заряду ВР детонаційний фронт (ДФ) виходить на його бокову поверхню, а через 21 мкс детонацією вже охоплений весь заряд ВР. Такий результат вказує на адекватність відтворення чисельною схемою значення швидкості руху ДФ, яка дорівнює 4340 м/с.
- в результаті виходу ДФ на бокову поверхню заряду ВР відбувається процес його відбиття від внутрішньої поверхні картонного корпусу моделі СВП. У зв'язку з тим, що значення густини картону

менше за значення густини заряду ВР в результаті відбиття ДФ формується дві ударних хвилі. Перша ударна хвиля стиску починає свій рух по товщині картонного корпусу, друга – ударна хвиля розрідження формується в ПД і починає свій рух в напрямку вісі симетрії заряду ВР (рис. 4: 12, 15, 18 мкс). Такий результат відповідає висновкам теорії відбиття ударних хвиль від різних перешкод [12, 20].

Крім того, на рис. 4 можна побачити етапи процесу руйнування картонного корпусу коли величина пластичної деформації в його середині в різний час та різних місцях досягає описаного раніше критичного значення. Повне руйнування картонного корпусу настає приблизно на 24 мкс з моменту ініціації процесу детонації.

Випадково, але саме на цей момент часу припадає початок відбиття фронту ПД від внутрішньої поверхні корпусу контейнера. Але перед тим, після звільнення від зовнішнього опору картонного корпусу моделі СВП продукти детонації формують в повітрі ударну хвилю стиску. Завдяки тому, що швидкість руху повітряної ударної хвилі перевищує швидкість руху масового фронту ПД вона першою підходить до внутрішньої поверхні корпусу контейнеру і на момент часу $t=15$ мкс відбивається від неї. В результаті такої взаємодії в корпусі контейнеру формується ударна хвиля стиску, яка проходить його товщину, відбивається від його зовнішньої бокової поверхні і формує хвилю розтягу яка починає свій рух в зворотному напрямку. Даний процес можна спостерігати на графіках зміни значення тиску на внутрішній поверхні центрального поперечного перерізу корпусу контейнера (рис. 5а).

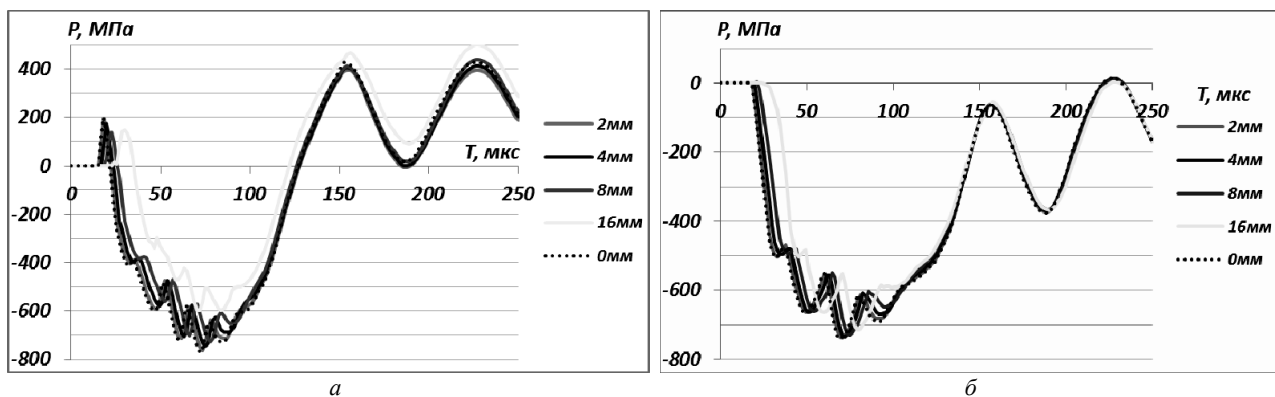


Рис. 5. Зміна значень тиску з часом в центральному поперечному перерізі контейнеру при різних значеннях товщини стінки картонного корпусу моделі СВП на: а) внутрішній поверхні, б) зовнішній поверхні

На рис. 5а видно, що на протязі 5 мкс (з 10 по 39 мкс в залежності від товщини стінки картонного корпусу СВП) на внутрішній поверхні корпусу контейнера формуються додатні значення середнього тиску, які не перевищують 200 МПа, тобто це місце контейнеру знаходиться в стані стискання. Причому, проаналізувавши поведінку всіх представлених на рис. 5а залежностей можна зробити висновок, що зі зростанням товщини картонного корпусу до 16 мм максимальне значення тиску в цей період не перевищує 137 МПа. В подальшому на внутрішній поверхні корпусу контейнеру формуються від'ємні значення тиску, що говорить про те, що матеріал контейнеру переходить в стан розтягу, який триває приблизно 100 мкс. Слід зазначити, що максимальне значення цього тиску не перевищує межі текучості і становить 770 МПа для варіанту конструкції моделі СВП з відкритим зарядом ВР, тобто без картонного корпусу, і 590 МПа для варіанту конструкції моделі СВП з картонним корпусом товщиною 16 мм. Надалі, завдяки внутрішньому тиску ПД і протидії зовнішніх "шарів" металу внутрішні області корпусу контейнера поступово переходять в стан стискання і зберігають його практично до 250 мкс. При чому поведінка всіх кривих, що відповідають різним варіантам конструкції моделі СВП практично ідентична.

На відміну від внутрішньої поверхні на зовнішній відсутній період коли на ній формуються стискаючі зусилля і на протязі всього процесу вибуху моделі СВП вона знаходиться в стані розтягу. Хоча максимальні значення середнього тиску теж не перевищують межі текучості.

Формування таких значень внутрішніх напружень як на зовнішній так і на внутрішній поверхнях корпусу контейнеру свідчать про те, що конструкція не втрачає своєї міцності під час свого деформування. Додатковим фактором, що підтверджує збереження цілісності корпусу контейнера є підсумкові значення величини пластичної деформації, що формується на зовнішній поверхні корпусу контейнера, яка не перевищує 0,165 (рис. 6). Для класу сталі з якої виготовлявся корпус контейнера максимально допустиме значення даної величини становить понад 0,25...0,35 [21, 22]. Крім того, факт збереження цілісності конструкції був зафіксований експериментально [4].

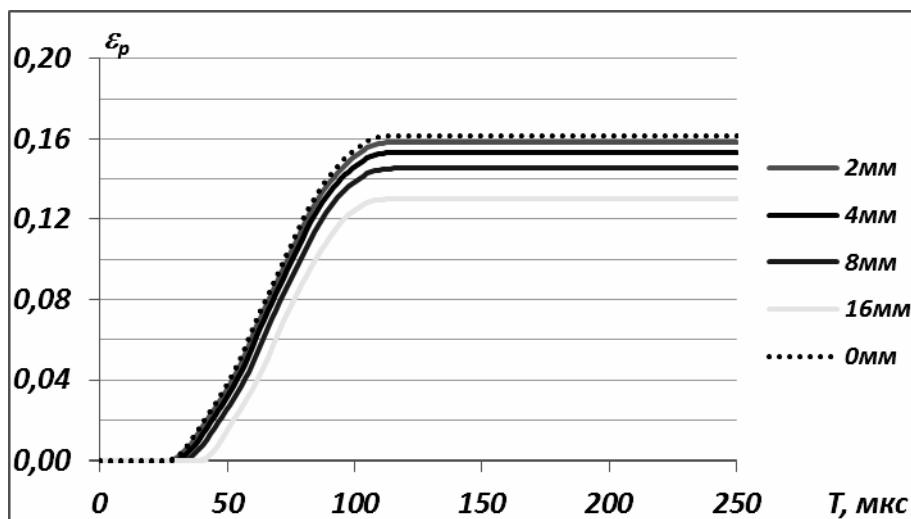


Рис. 6. Зміна значень пластичної деформації з часом на зовнішній поверхні в центральному поперечному перерізі контейнеру при різних значеннях товщини стінки картонного корпусу моделі СВП

З рис. 6 видно, що формування підсумкового значення пластичної деформації практично закінчується на 110 мкс незалежно від товщини картонного корпусу моделі СВП. Такий результат став наслідком того, що максимальні значення напружень розтягу на зовнішній поверхні контейнеру зберігались саме до цього моменту. В подальшому в конструкції виникають лише пружні деформації.

Відмінність між представленими кривими полягає в самих значеннях пластичної деформації. Зменшення величини пластичної деформації зі зростанням товщини картонного корпусу моделі СВП відбувається за лінійним законом з коефіцієнтом 0,002 пластичної деформації / мм (з 0,162 – для варіанта конструкції моделі СПВ з відкритим зарядом ВР до 0,13 – с товщиною картонного корпусу 16 мм).

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі, як вказувалось раніше, можна використовувати інформацію про ступінь розширення зовнішньої поверхні корпусу контейнера, що виникає при вибуху у нього в середині моделі СВП з товщиною стінки картонного корпусу 4 мм. Для цього була побудована відповідна залежність зміна значення радіусу зовнішньої поверхні корпусу з часом в його центральному поперечному перерізі (рис. 7). Крім того на даному малюнку зображені аналогічні криві, що відповідають за поведінку вказаної вище величини при різних значеннях товщини картонного корпусу моделі СВП.

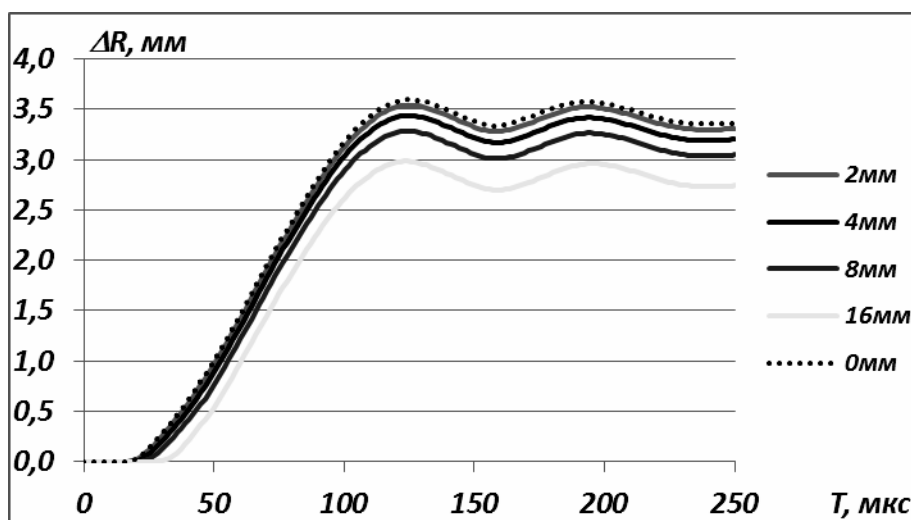


Рис. 7. Ступінь розширення зовнішньої поверхні контейнеру в центральному поперечному перерізі при різних значеннях товщини стінки картонного корпусу моделі СВП

З рис. 7 видно, що розроблена математична модель задачі з достатнім рівнем точності відтворює отримане експериментальне значення ступеня розширення зовнішньої поверхні ΔR . Для варіанту моделі СВП у якій товщина картонного корпусу становила 4 мм середнє значення ступеню розширення склало 3,3 мм, що на 0,1...0,2 мм менше ніж експериментальне (3,4...3,5 мм). Також графіки рис. 7 вказують на залежність

зменшення величини ΔR майже на 1 мм при збільшенні товщини картонного корпусу моделі СВП до 16 мм у порівнянні з відкритим зарядом ВР.

Отримане занижене значення ΔR можна пояснити недоліком математичної моделі, а саме, тим, що під час вибуху картонний корпус СВП не розділяється на окремі частини, а "розчиняється" в повітрі під час формування в ньому критичних значень пластичних деформацій. Можна припустити, що в іншій постановці кожна з частин корпусу СВП за рахунок удару своєю, хоч і не великою але високошвидкісною, масою по внутрішній поверхні контейнера передасть йому свою кінетичну енергію, що в результаті повинно дещо збільшити ступінь його деформування.

Висновки:

1. Розроблений метод оцінки напружено-деформованого стану силового елемента контейнеру для знешкодження саморобних вибухових пристроїв на основі створеної математичної моделі, що описує процес їх вибуху при симетричному розташуванні в середині контейнера, та адекватність якої була підтверджена експериментально.
2. При збільшенні товщини картонного корпусу моделі СВП до 16 мм відбувається зменшення величини пластичної деформації зовнішньої поверхні корпусу контейнера за лінійним законом з коефіцієнтом 0,002 пластичної деформації / мм та зменшенням ступеня розширення цієї поверхні в центральному поперечному перерізі майже на 1мм, що становить 20% у порівнянні зі схемою навантаження контейнера відкритим зарядом ВР.
3. Результати проведених досліджень можуть бути покладені в розробку методологічних основ для реконструкції вибухових пристроїв та імітації ситуаційних досліджень, що проводяться в рамках судової вибухо-технічної експертизи.

Анотація. В роботі розглядається питання створення адекватної математичної моделі процесу деформування корпусу спеціального контейнера під дією внутрішнього тиску, яке виникає в результаті вибуху у ньому всередині самодельного вибухового пристрою (СВУ), шляхом порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень. З допомогою розробленої моделі була проведена оцінка впливу товщини стінки картонного корпусу моделі СВУ на ступінь деформування корпусу контейнера. Результати проведених досліджень будуть корисними для фахівців, які займаються створенням пристроїв вибухозащити, а також експертів криміналістів для розробки методологічних основ реконструкції вибухових пристроїв та проведення ситуаційних судових вибухо-технічних досліджень.

Ключеві слова: вибух, вибухо-технічна експертиза, математичне моделювання процесу вибуху, детонація, TNT, LS-DYNA, самодельне вибухове пристрій, деформування при вибуху, руйнування при вибуху, JWL, PLASTIC-KINEMATIC.

Abstract. In accordance with regulations of International civil aviation organization, all aircrafts with transport 30 and more passengers must have special device to defuse home-made explosive bombs. Numerical methods of computer modeling are used for construct that device more and more. Quantity of these methods depends on adequacy level of created mathematical model to real physical process. In this article questions of design adequacy mathematical model of deforming process of special device body under inner pressure of home-made bomb explosion are discussed. Mathematical model adequacy is controlled by comparison modeling and experimental results. Computer program "ANSYS/LS-DYNA" was used for mathematical researching. Because of mathematical model have to consist as gas part (detonation product, air) as metal part (defuse home-made explosive bombs device body) it was based on Lagrange-Euler method of describing behavior of different materials under shock. Expansion of detonation products was described by JWL equation of state. States of metal defuse home-made explosive bombs device body and paper bomb body were described by elastic-plastic material model with kinematic hardening plasticity "PLASTIC-KINEMATIC". In order to find values of that model parameters for the paper bomb body spatial experiments were carried out.

Conclusions: Mode of deformation definition method of defuse home-made explosive bombs device was created. That method bases on adequacy mathematical model which describes home-made bomb explosion process which places inside of device align. Increasing of paper bomb body thickness to 16 mm leads to decreasing plastic deformation of outer surface of defuse home-made explosive bombs device body by straight line low with a coefficient 0,002 1/mm and decreasing level expansion that surface up to 1mm. This decreasing is equal to 20% of maximum level expansion special device body when was exploded inside of than high explosive without paper body.

Keywords: explosion, explosive-technical expertise, mathematic modeling explosive process, detonation, TNT, LS-DYNA, home-made explosive device, explosive deformation, explosive crashing, JWL, PLASTIC-KINEMATIC.

1. ICAO Annex 6. Part 1. Amendment.
2. Колпаков В.И., Бабкин А.В., Ладов С.В., Михайлин А.И., Орлов А.В., Сильников М.В. Численная оценка эффективности действия жидкостных локализаторов взрыва в двухмерной постановке // Двойные технологи. – 2000. – №2. – С.5-10.
3. Сильников М.В., Михайлин А.И., Орлов А.В., Садырин А.И. Моделирование деформации жидко-емкостного эластичного контейнера при взрыве заряда ВВ // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды Второй всероссийской научно-практической конференции: Том II. – Санкт-Петербург: НПО СМ, 1999. – С.190–198.

4. *Войтенко С.Д.,* Вінгловський А.О., Сидоренко Ю.М. Експериментальні дослідження процесу деформування корпусів контейнерів для знешкодження саморобних вибухових пристроїв // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Машинобудування". – 2010. – №58. – С.147-154.
5. www.ansys.com.
6. <http://www.ls-dyna.ru/>
7. www.lstc.com
8. *LS-DYNA 971.* Keyword user's manual. Livermore software technology corporation (LSTC), 2007. – Volume 1. – 2206p.
9. *John O. Hallquist.* LS-DYNA. Theory manual. Livermore Software Technology Corporation. March, 2006. – 680p.
10. *Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA:* учебное пособие / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.
11. *Рудаков К.М.* Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 379 с.: іл.
12. *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.
13. *LLNL Explosive Handbook.* Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants / В.М. Dobratz., Р.С. Crawford. – Livermore. – California, 1985. – 541 p.
14. *Колпаков В.И.,* Ладов С.В., Рубцов А.А. Математическое моделирование функционирования кумулятивных зарядов: Метод. указания. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 38 с., ил.
15. *Дремин А.Н.,* Савров С.В., Трофимов В.С., Шведов К.К. Детонационные волны в конденсированных средах. – М.: Наука, 1970. – 172с.
16. *Марочник сталей и сплавов:* <http://www.splav.kharkov.com>.
17. *Офіційний сайт ТОВ "СПЕЦМЕТАЛЛСЕРВИС":* <http://s-metall.com.ua>.
18. *Справочник металлста:* http://spmet.vztk.org/mr_kon_leg_38xn3mfa.php.
19. *Металлургический портал:* <http://www.metalpro.ru>.
20. *Селиванов В.В.,* Соловьев В.С., Сысоев Н.Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. - М.: Изд-во МГУ, 1990. – 264с.
21. *Орлов Б.В.,* Ларман Э.К., Маликов В.Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. – М.: Машиностроение, 1976. – 432с.
22. *Ларман Э.К.* Курс артиллерии. Том 1. Основания устройства артиллерийских орудий. – М.: ВАИА им. Дзержинского, 1956. – 540с.

REFERENCES

1. *ICAO Annex 6. Part 1. Amendment.*
2. *Kolpakov V.I.,* Babkin A.V., Ladov S.V., Mikhaylin A.I., Orlov A.V., Sil'nikov M.V. Chislennaya otsenka effektivnosti deystviya jidkostnykh lokalizatorov vzryva v dvuhmernoй postanovke, Dvoynye tehnologii, 2000, no 2, pp. 5-10.
3. *Sil'nikov M.V.,* Mikhaylin A.I., Orlov A.V., Sadyrin A.I. Modelirovanie deformatsii jidko-emkostnogo elastichnogo konteynera pri vzryve zaryada VV: Trudy Vtoroy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Aktualnye problemy zatschity i bezopasnosti). St-Petersburg: NPO SM, 1999, Vol. II, pp.190–198.
4. *Voytenko S.D.,* Vinglov'skiy A.O., Sydorenko Yu.M. Eksperymentalni doslidennya protsessu deformuvannya korpusiv konteyneriv dlya zneshkodgennya samorobnykh vybukhovoyh prystroiv, Journal of Mechanical Engineering of NTUU «KPI», 2010, no 58, pp. 147-154.
5. www.ansys.com.
6. <http://www.ls-dyna.ru/>
7. www.lstc.com
8. *LS-DYNA 971.* Keyword user's manual. Livermore software technology corporation (LSTC), 2007, Vol. 1, 2206 p.
9. *John O. Hallquist.* LS-DYNA. Theory manual. Livermore Software Technology Corporation, 2006, March, 680 p.
10. *Муземнек А.Ю.,* Богач А.А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA (Учебное пособие). Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005, 106 p.
11. *Rudakov K.M.* Chislenni metody analizu v dynamitsi ta mitsnosti konstruktсий (Navch. posibnyk). Kyiv: NTUU "KPI", 2007. 379 p.
12. *Andreev S.G.,* Babkin Yu.A., Baum F.A. i dr. Fizika vzryva: Pod red. Orlenko L.P. Moscow: FIZMATLIT, 2002, Vol.1, 832p.
13. *Dobratz B.M.,* Crawford P.C. LLNL Explosive Handbook [Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants]. Livermore: California, 1985, 541 p.
14. *Kolpakov V.I.,* Ladov S.V., Rubtsov A.A. Matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya kumulyativnykh zaryadov [Metod. ukazaniya]. Moscow: Izd-vo MG TU im. N.E.Baumana, 1998, 38 p.
15. *Dremin A.N.,* Savrov S.V., Trofimov V.S., Shvetsov K.K. Detonatsionnye volny v kondensirovanykh sredah. Moscow: Nauka, 1970, 172 p.
16. *Marochnik staley i splavov:* <http://www.splav.kharkov.com>.
17. *Official site TOV "SPETSMETALLSERVIS":* <http://s-metall.com.ua>.
18. *Spravochnik metallista:* http://spmet.vztk.org/mr_kon_leg_38xn3mfa.php.
19. *Memallurgicheskij portal:* <http://www.metalpro.ru>.
20. *Selivanov V.V.,* Solov'ev V.S., Sysoev N.N. Udamnye i detonatsionnye volny. [Metody issledovaniya]. Moscow: Izd-vo MGU, 1990, 264 p.
21. *Orlov B.V.,* Larman E.K., Malikov V.G. Ustroystvo i proektirovanie stvolov artilleriyskikh orudiy. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 432 p.
22. *Larman E.K.* Kurs artillerii. [Osnovaniya ustroystva artilleriyskikh orudiy]. Moscow: VAIA im. Dzerginskogo, 1956. Vol. 1, 540 p.