

УДК 004.942:62-756.62:621.869.888.8

Ю.М. Сидоренко,
кандидат технічних наук, доцент
Я.О. Мариненко

ВПЛИВ ФОРМИ САМОРОБНОГО ВИБУХОВОГО ПРИБОРУ НА ПРОЦЕС ДЕФОРМУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНОГО КОРПУСУ ЗАСОБУ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ЙОГО ВИБУХУ

У роботі досліджується процес деформування товстостінного циліндричного корпусу локалізатора вибуху саморобного вибухового пристрою (СВП) під дією тиску його продуктів детонації. Проводиться оцінка впливу на НДС корпусу локалізатора процесу вибуху СВП циліндричної форми та у формі паралелепіпеда.

Ключові слова: саморобний вибуховий пристрій, локалізатор вибуху, математичне моделювання, пластична деформація, вибух.

В работе исследуется процесс деформирования толстостенного цилиндрического корпуса локализатора взрыва самодельного взрывного устройства (СВУ) под воздействием давления его продуктов детонации. Проводится оценивание влияния на НДС корпуса локализатора процесса взрыва СВУ цилиндрической формы и в форме параллелепипеда.

Ключевые слова: самодельное взрывное устройство, локализатор взрыва, математическое моделирование, пластическая деформация, взрыв.

This paper investigates the process of deformation of a thick-walled cylindrical body of the detector of the explosion of an improvised explosive device because of the pressure of detonation products.

An estimation of the impact of VAT on housing localiser explosion process IED of cylindrical form and in the form of a parallelepiped is carried out.

Keywords: improvised explosive device explosion localizer, mathematical modeling, plastic deformation, explosion.

Постановка задачі

На сьогодні активність терористичних угруповань набирає дедалі більших масштабів і загрожує безпеці громадян багатьох держав. Останнім часом терористичні організації світу активізували свою діяльність, розраховуючи на максимальний міжнародний резонанс. Результатом цього стало зростання кількості терористичних актів з використанням вибухових речовин. Особливо небезпечними вони стають у місцях великого скупчення людей, зокрема у транспорті. Тому, за вимогами Міжнародної організації цивільної авіації ІКАО (27-ме виправлення до шостого додатку Чиказької 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].

У зв'язку з тим, що вартість проектування таких засобів методами натурального моделювання є досить високою, альтернативою стають методи числового комп'ютерного моделювання процесів вибухового навантаження силових елементів вибухозахисних конструкцій. Тоді кількість експериментальних досліджень можна суттєво зменшити до рівня, необхідного для оцінки правильності створення відповідних математичних моделей процесів, що моделюються [2–5].

Мета роботи

У статті описані результати математичних досліджень, метою яких була оцінка впливу форми заряду ВР фіксованої маси на процес вибухового деформування товстостінного циліндричного корпусу локалізатора вибуху СВП.

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

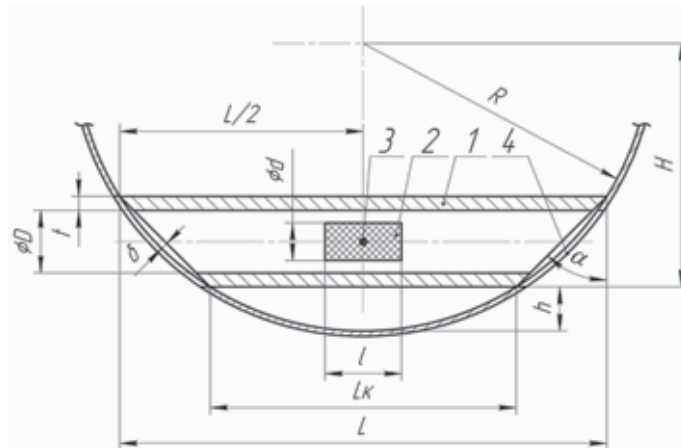


Рис. 1. Схема контейнера для знешкодження СВП на борту літака:
1 – циліндричний корпус, 2 – заряд вибухової речовини (ВР),
3 – точка ініціації детонації заряду ВР, 4 – аеродинамічний обтічник літака

Товщина корпусу контейнера становить $t=20$ мм, довжина – $L=700$ мм, внутрішній діаметр – $D=125$ мм. Модель СВП симетрично розміщується всередині нього, тобто поздовжня вісь симетрії моделі СВП збігається з поздовжньою віссю симетрії корпусу контейнера.

Як модель СВП був обраний відкритий заряд вибухової речовини (ВР) тринітротолуол (ТНТ) масою 400 г у вигляді циліндра та паралелепіпеда з густиною 1630 кг/м³ зі співвідношенням висоти до ширини як 2:1. За цієї умови розміри циліндричного заряду ВР становили: висота – 100 мм, діаметр – 56 мм. Розміри штатної тротилової шашки масою 400 г становили: довжина – 100 мм, а висота і ширина – 50 мм. Точка ініціації детонації СВП знаходиться в його центрі мас.

Методика математичного моделювання

Для проведення математичних досліджень процесу вибухового деформування моделі корпусу контейнера використовувалася комп'ютерна програма LS-DYNA [6–13].

Математична модель процесу була побудована на основі тривимірного змішаного лагранжево-ейлерового підходу щодо опису поведінки середовищ, що деформуються. Лагранжевим підходом описувалася поведінка сталевого корпусу контейнера. Ейлеровим підходом описувалася поведінка повітря та продуктів детонації.

Наявність в задачі геометричної симетрії та симетрії внутрішнього навантаження корпусу дозволило спростити її відповідну математичну модель шляхом використання 1/8 частини геометрії труби та моделі СВП з накладанням на них відповідних граничних умов.

Поведінка оточуючого заряду ВР повітря з початковим значенням густини $r_0 = 1,26 \text{ кг/м}^3$ описувалася за допомогою рівняння стану у формі лінійного поліному (LINEAR_POLYNOMIAL) [12], а процес розширення продуктів детонації заряду ВР – за допомогою рівняння стану в формі Джонса-Уілкінса-Лі (JWL) [21, 22]:

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

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

Значення параметричних констант рівняння стану ПД в формі JWL: $A=371,2 \text{ ГПа}$; $B=3,231 \text{ ГПа}$; $R_1=4,15$; $R_2=0,95$; $\omega=0,3$; $E_0=7 \text{ ГПа}$ [22].

Лагранжевим підходом з використанням пружно-пластичної реологічної моделі матеріалу з кінематичним зміцненням "PLASTIC-KINEMATIC" була описана поведінка металевого корпусу контейнера, який був виготовлений з конструкційної легованої сталі 38ХНЗМФА ($\rho=7900 \text{ кг/м}^3$, $E=210 \text{ ГПа}$, $G=83410 \text{ ГПа}$, $\sigma_t=785 \text{ МПа}$, $\sigma_b=930 \text{ МПа}$, $E_t=1 \text{ ГПа}$ [14-20]).

Для побудови відповідної скінченно-елементної моделі задачі використовувався скінченний елемент SOLID 164.

Точність методики моделювання та математичної моделі була перевірена експериментально в роботі [5].

Результати математичного моделювання

Після створення математичної моделі, були проведені відповідні числові розрахунки. Відповідні кадри комп'ютерного моделювання процесу вибуху моделі СВП у формі паралелепіпеда всередині контейнера зображені на рис. 2.

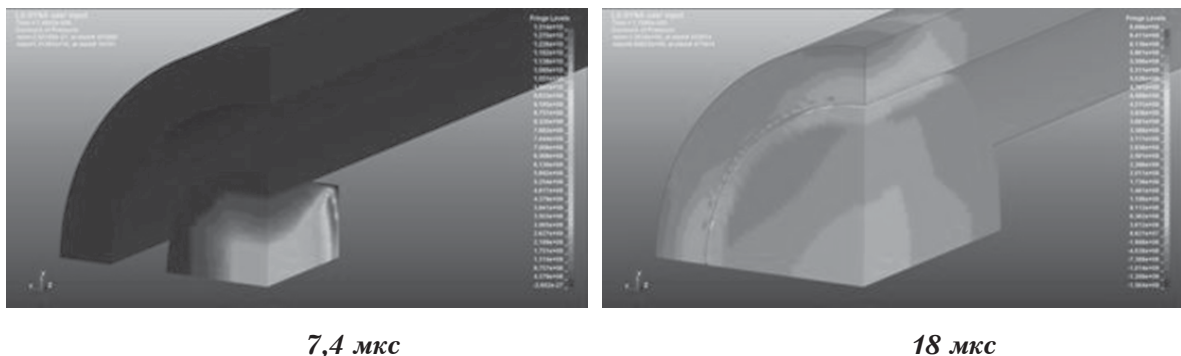
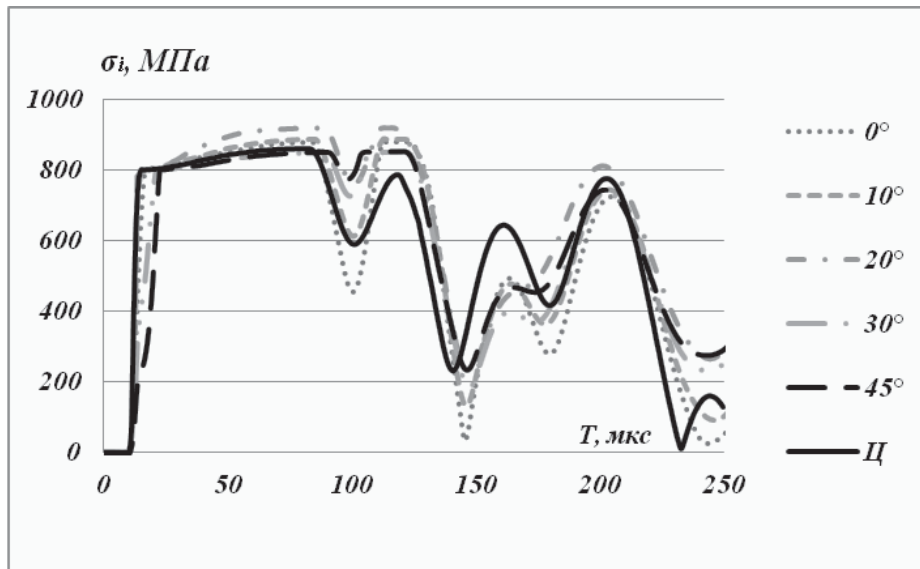


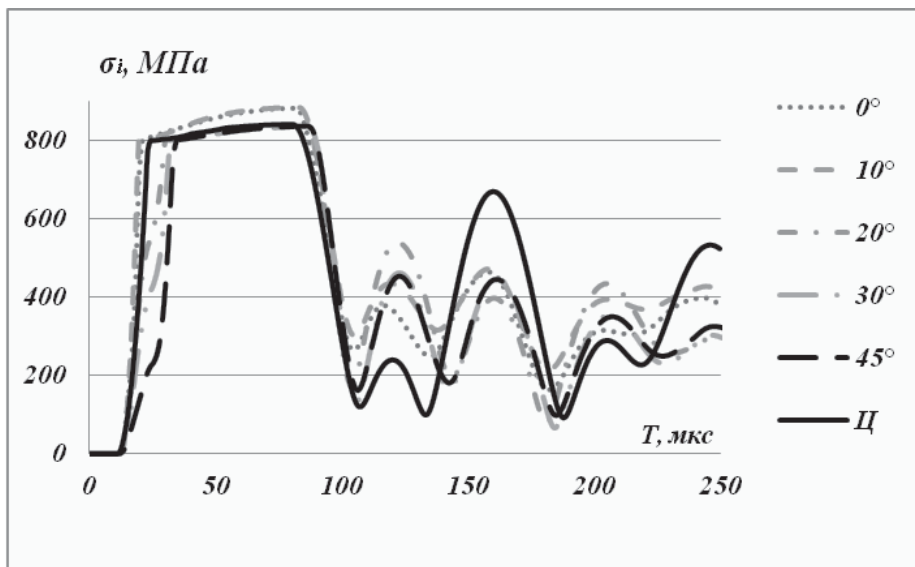
Рис. 2. Кадри комп'ютерного моделювання процесу вибуху моделі СВП у формі паралелепіпеда всередині контейнера для його локалізації

Аналіз кадрів комп'ютерного моделювання показує, що найбільш навантаженим місцем корпусу засобу локалізації є його центральний поперечний переріз. Це переріз, який розташований навпроти місця ініціації детонації заряду ВР. Тому логічно оцінку загальної міцності всієї конструкції проводити на основі дослідження поведінки саме цього поперечного перерізу сталеві труби з використанням деформаційного критерію міцності.

Розрахункові дані про зміну з часом значень інтенсивності напружень на внутрішній та зовнішній поверхнях центрального поперечного зрізу корпусу засобу локалізації вибуху СВП представлені на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Графіки зміни в часі значень інтенсивності напружень в центральному поперечному перерізі локалізатора для локалізації СВП на:
а) внутрішній поверхні, б) зовнішній поверхні

Якщо модель СВП мала циліндричну форму, то за зміну значень напружень на рис. 3. відповідає графік функції у вигляді суцільної лінії "Ц". Якщо була обрана модель СВП у формі паралелепіпеда, то розглядалася зміна значень напружень в частинах труби, які знаходяться або навпроти грані СВП (кут 0°), або навпроти ребер СВП (45°), та проміжні положення (10° , 20° , 30°).

Із представлених залежностей видно, що процес навантаження внутрішньої поверхні труби проходив у два етапи. Спочатку в ній виникали напруження від взаємодії труби з повітряною ударною хвилею (20 мкс), а потім майже подвійне зростання сформованих значень напружень від взаємодії з потоком продуктів детонації (30 мкс).

Незалежно від того, яка це частина товщини центрального поперечного перерізу в усіх її точках, значення напружень перевищують межу текучості матеріалу корпусу контейнера. Причому на внутрішній поверхні таке перевищення формується двічі (40 та 100 мкс). У наступні моменти часу відбувається затухання внутрішніх ударнохвильових процесів всередині труби із формуванням зон розвантаження.

Перевищення значень інтенсивності напружень межі текучості матеріалу спричинив формування в корпусі локалізатора зон із пластичними деформаціями ϵ_p .

Відповідний розподіл значень ϵ_p за товщиною поперечного перерізу корпусу засобу локалізації вибуху СВП представлений на рис. 4.

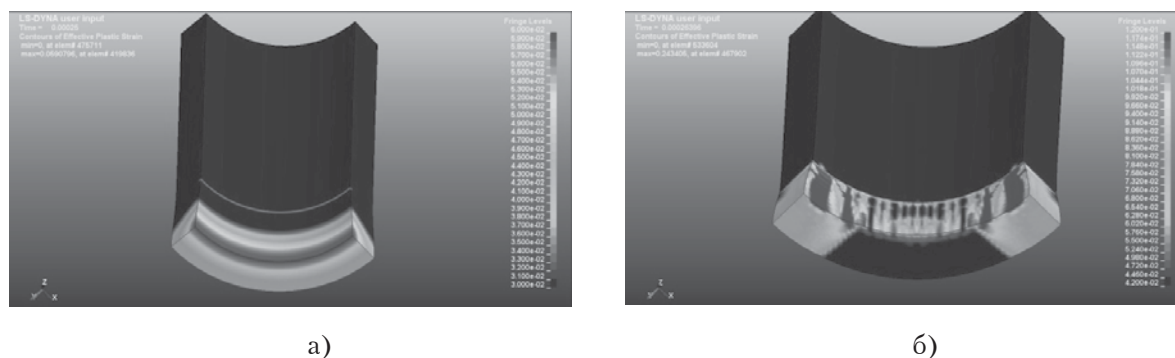
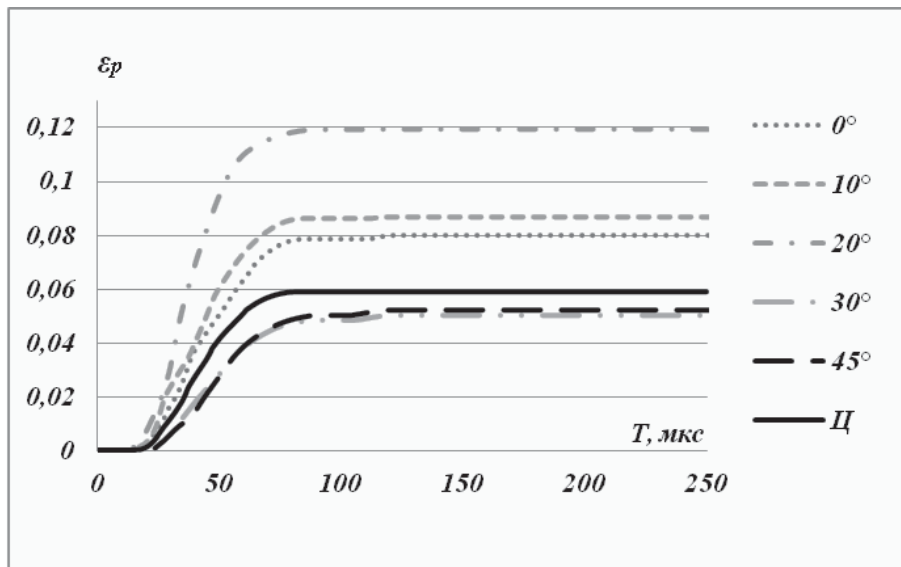


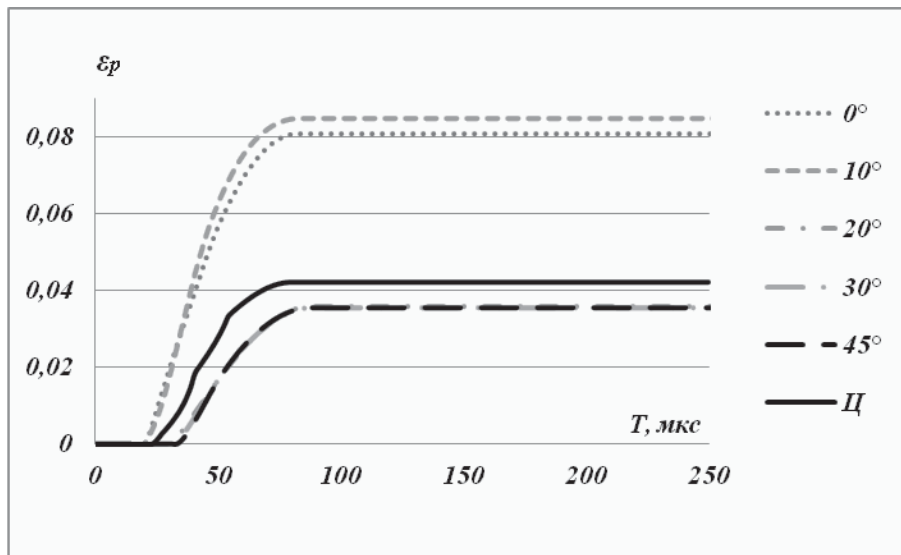
Рис. 4. Розподіл значень пластичної деформації за товщиною стінки центрального поперечного перерізу корпусу засобу локалізації СВП у формі:
а) циліндра, б) паралелепіпеда

З цих малюнків видно, що від вибуху всередині труби СВП циліндричної форми в поперечному перерізі корпусу локалізатора формується рівномірний розподіл значень пластичної деформації за окружним напрямом. Від вибуху СВП у формі паралелепіпеда навпроти бокових граней СВП в корпусі локалізатора формуються відповідно 4 окремі локальні пластичні зони. Кутова ширина цих зон приблизно становить 40° .

З метою кількісної оцінки значень ϵ_p були побудовані залежності зміни з часом значень пластичної деформації на внутрішній та зовнішній поверхнях корпусу засобу локалізації вибуху СВП (рис. 5.).



а)



б)

Рис. 5. Графіки зміни з часом значень пластичної деформації в центральному поперечному зрізі локалізатора на поверхні: а) внутрішній, б) зовнішній

Результати розрахунків показали, що значення ϵ_p в трубі від вибуху СВП у формі паралелепіпеда навпроти його граней майже в 2 рази перевищують аналогічні значення, що формуються навпроти ребер заряду ВР. Наприклад, на зовнішній поверхні труби навпроти грані заряду ВР $\epsilon_p=0,08$, а навпроти ребер – $\epsilon_p=0,0355$, що у 2,25 разів менше.

Слід відзначити те, що значення ϵ_p , що виникають в трубі від вибуху циліндричного СВП, формуються на рівні $\epsilon_p=0,042$, це лише на 15% більше ніж значення ϵ_p , що виникають в трубі навпроти ребер СВП у формі паралелепіпеда.

Але всі значення пластичної деформації не перевищують аналогічних максимально допустимих. Це свідчить про те, що цей варіант конструкції корпусу

локалізатора вибуху СВП, незалежно від того, якої форми вибухає у нього всередині модель СВП, має щонайменше 5-тикратний запас міцності.

Крім того, дані рис. 6. показують, що значення ϵ_p зосереджені у відносно невеликій зоні.

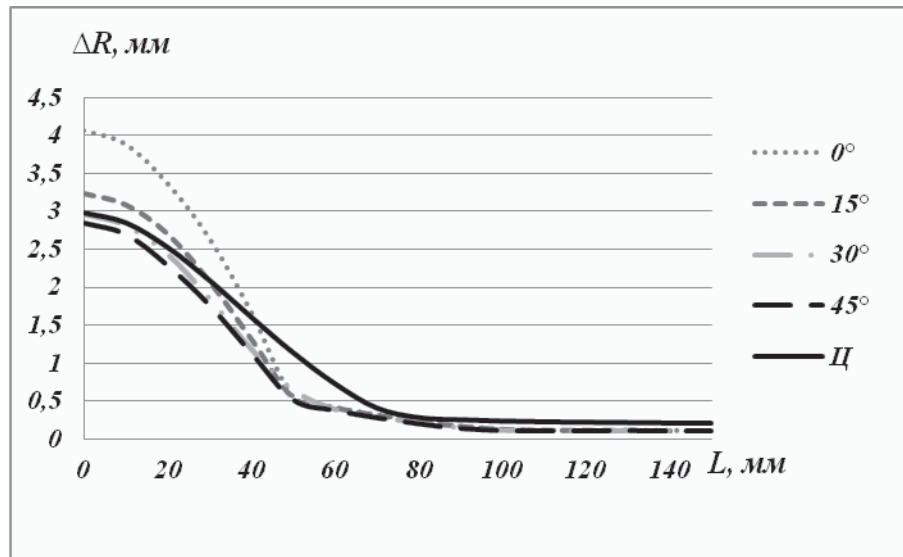


Рис. 6. Графік розподілу значень ступеня розширення зовнішньої поверхні корпусу засобу локалізації уздовж її твірної при вибусі СВП

Довжина зони деформування зовнішньої поверхні труби становить 130...140 мм, це приблизно відповідає висоті СВП 100 мм, що вибухає в неї всередині.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень було встановлено, що незалежно від форми заряду ВР в результаті їх вибуху в стінці труби виникають зони з пластичними деформаціями. Найбільші значення цих деформацій формуються в центральному поперечному зрізі труби, тобто в районі місця ініціації детонації заряду. Причому від вибуху циліндричного СВП формується їх рівномірний розподіл за окружним напрямом, а від СВП в формі паралелепіпеда навпроти його бокових граней – 4 окремих локальних зони зі значеннями ϵ_p , що понад як 2 рази перевищують аналогічні значення в інших місцях конструкції. Кутлова ширина таких зон приблизно становить 40° .

У частинах труби, що знаходяться навпроти ребер заряду ВР, виникають пластичні деформації, значення яких приблизно дорівнюють значенням, що формуються в результаті вибуху циліндричного заряду ВР.

Розглянутий варіант конструкції локалізатора вибуху СВП має надлишковий запас міцності, що, з одного боку, дозволяє зменшити його масу, а з іншого, вимагає проведення додаткових досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ICAO Annex 6. Part 1. Amendment.
2. Сидоренко Ю.М. К оценке напряженно-деформированного состояния силовых элементов конструкции трубчатой взрывной камеры / Ю.М. Сидоренко, П.С. Шленский // Проблемы прочности. – 2013. – № 2. – С. 121–133.

3. *Sidorenko Yu., Shlensky P.S.* Stress-Deformed State of Elements of Tube Explosive Chamber / International Conference "Shock Waves in Condensed Matter" Kiev, Ukraine, 16–21 September 2012. – С. 413–418.
4. *Войтенко С.Д.* Експериментальні дослідження процесу деформування корпусів контейнерів для знешкодження саморобних вибухових пристроїв / С.Д. Войтенко, А.О. Вінгловський, Ю.М. Сидоренко // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Машинобудування". – 2010. – № 58. – С. 147–154.
5. *Сидоренко Ю.М.* Про вплив картонного корпусу заряду вибухової речовини на ступінь деформування контейнера для знешкодження саморобних вибухових / Ю.М. Сидоренко, Я.О. Мариненко // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Машинобудування". – 2012. – № 65. – С. 131–138.
6. LSTC (Livermore Software Technology Corporation) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.lstc.com.
7. LS-DYNA : динамика, нелинейности, crash-, drop-тесты, пробивание, композиты, пластическая обработка металлов [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ls-dyna.ru/>.
8. *John O. Hallquist.* LS-DYNA. Theory manual. Livermore Software Technology Corporation. March, 2006. – 680 p.
9. *Рудаков К.М.* Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій : навч. посібник. – К. : НТУУ "КПІ", 2007. – 379 с. : іл.
10. Численные методы в задачах физики взрыва и удара : учебник для вузов / А.В. Бабкин, В.И. Колпаков, В.Н. Охитин и др., под ред. В.В. Селиванова. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – Т. 3. – 516 с.
11. *Bate K.* Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон ; пер. с англ. А.С. Алексеева и др. ; под ред. А.Ф. Смирнова. – М. : Стройиздат, 1982 – 448 с.
12. *Муйземнек А.Ю.* 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.
13. LS-DYNA 971. Keyword user's manual. Livermore software technology corporation (LSTC), 2007. – Volume 1. – 2206 p.
14. Марочник сталей и сплавов [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.splav.kharkov.com>.
15. Офіційний сайт ТОВ "СПЕЦМЕТАЛЛСЕРВИС" [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://s-metall.com.ua>.
16. Справочник металлста [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://spmet.vztk.org/mr_kon_leg_38xn3mf.php.
17. Металлургический портал [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.metalpro.ru>.
18. *Селиванов В.В.* Ударные и детонационные волны. Методы исследования / В.В. Селиванов, В.С. Соловьев, Н.Н. Сысоев. – М. : Изд. МГУ, 1990. – 264 с.
19. *Орлов Б.В.* Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий / Б.В. Орлов, Э.К. Ларман, В.Г. Маликов. – Том 1. Основания устройства артиллерийских орудий. – М. : Машиностроение, 1976. – 432 с.
20. *Ларман Э.К.* Курс артиллерии. / Э.К. Ларман. – М. : ВАИА им. Дзержинского, 1956. – 540 с.
21. LLNL Explosive Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants / V.M. Dobratz., P.C. Crawford. – Livermore. – California, 1985. – 541 p.
22. Физика взрыва : в 2 т. / С.Г. Андреев, Ю.А. Бабкин, Ф.А. Баум и др. ; под ред. Орленко Л.П. – изд. 3-е, перераб. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – Т.1. – 832 с.

Отримано 07.08.2014

Рецензент Марченко О.С., кандидат технічних наук.