УДК 534.222

В.Л. Сидоренко[1], С.І. Азаров[2]

[1]*Інститут державного управління у сфері цивільного захисту УЦЗ України, Київ*
[2]*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

РОЗРАХУНОК НАСЛІДКІВ ДІЇ ВИБУХОВОЇ УДАРНОЇ ХВИЛІ НА ЛЮДИНУ ПРИ ВИБУХУ НА СКЛАДІ БОЄПРИПАСІВ

Розглянута методика оцінки впливу повітряної ударної хвилі на людину, яка пов'язана з випадковими вибухами боєприпасів. Розраховані параметри зон детонаційних і постдетонаційних процесів при вибуху і розміри зон безпеки. Запропоновані співвідношення можуть бути практично використані для оцінки ризиків ураження військовослужбовців і рятівників, які випадковим чином знаходяться у зоні ураження вибухової ударної хвилі і вторинних осколків при вибуху на складі боєприпасів.

Ключові слова: *випадкові вибухи на артскладі, вибухові речовини, вибухова ударна хвиля, ураження людини.*

Вступ

Постановка проблеми і аналіз літератури. Аварії на артскладах з послідуючими вибухами можуть привести до травмуванню і загибелі людей та значних матеріальних збитків.

Для ефективного рішення прикладних задач необхідні фундаментальні знання і володіння сучасними методиками забезпечення вибухонебезпеки.

Однією з актуальних проблем є захист особового складу військовослужбовців і рятівників від руйнівних наслідків випадкового вибуху на складах боєприпасів. Моделювання динаміки вибуху і уражаючих факторів необхідно для прогнозування розвитку аварійної ситуації і попередження її несприятливих наслідків. На даний час одною з тенденцій у галузі математичного моделювання задач екологічної безпеки є створення регулярних моделей, тобто моделей, які враховують з одного боку основні фізичні процеси, а з іншого – пристосовані щодо практичного використання.

Проблема удосконалення розрахунку уражаючих факторів аварії при випадковому вибуху на складі боєприпасів є актуальною і вирішення її без науково-практичного забезпечення неможливо.

Мета статті. Описати фізичні процеси дії вибухової ударної хвилі (ВУХ) на довкілля при випадковому вибуху на складі боєприпасів.

Основна частина

Виклад основного матеріалу досліджень. Навантаження на людину від ВУХ визначається з урахуванням рельєфу місцевості, її взаємодії з перешкодами та інших факторів.

Методи визначення параметрів ВУХ і утворюваних нею навантажень на людину и навколишнє середовище при вибухах твердих вибухових речовин (ТВР) розроблені достатньо докладно і маються в нормативній і довідковій літературі [1 – 5].

При наземному вибуху тротилового заряду надлишковий тиск у фронті ВУХ визначається за емпіричною формулою М.А. Садовського [2]:

$$\Delta P_ф = 0,1\frac{\sqrt[3]{C}}{R} + 0,43\frac{\sqrt[3]{C^2}}{R^2} + 1,4\frac{C}{R^3}, \quad \text{МПа}, \quad (1)$$

де C – маса заряду ТВР, кг; R – відстань від епіцентру вибуху, м.

Тривалість фази стискання ВУХ визначається за формулою [1 – 3]:

$$\tau_{(+)} = 1,7\times10^{-3}\sqrt[6]{C}\sqrt{R}, \quad \text{с}. \quad (2)$$

Імпульс тиску у фазі стискання [4]:

$$i_s = \frac{6,3\sqrt[3]{C^2}}{R}, \quad \frac{\text{МПа}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}. \quad (3)$$

Максимальний тиск розрядження і тривалість фаз розрядження (див. рис. 1) [1-3]:

$$\Delta P_{(-)} = 0,03\frac{\sqrt[3]{C}}{R}, \quad \text{МПа}, \quad (4)$$

$$\tau_{(-)} = 0,16\sqrt[3]{C}, \quad \text{с}. \quad (5)$$

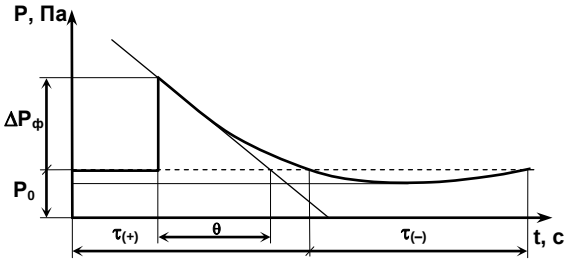

Рис. 1. Зміна тиску на фронті ВУХ при детонації ТВР

За наведеними вище формулами (1) – (5) розраховано значення $\Delta P_ф$ залежно від відстаней R при різних масах вибухових зарядів боєприпасів (рис. 2).

Визначаємо відстань, яка безпечна при дії ВУХ [5]:

$$R_б = \frac{K_б\sqrt[3]{C}}{\left[1+\left(a/C\right)^2\right]^{1/6}}, \quad \text{м}, \quad (6)$$

де a – коефіцієнт рівний 3180; $K_б$ – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує ураження людини; $K_б > 100$ – легкі забиття і травми; $K_б = 50 \div 100$ – ушкодження середньої ваги; $K_б = 25 \div 50$ – важкі ушкодження; $K_б = 10 \div 25$ – вкрай важкі ушкодження; $K_б = 5 \div 10$ – смертельні ушкодження.

© В.Л. Сидоренко, С.І. Азаров

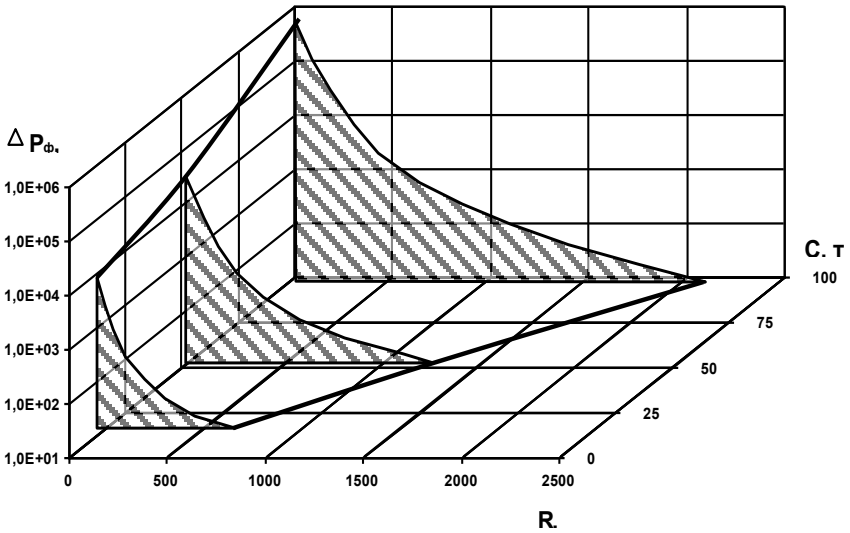

Рис. 2. Залежність рівня надлишкового тиску від відстані до епіцентру наземного вибуху різної маси ТВР

Наведена формула (6) дозволяє оцінювати реальну масу зарядуТВР при дії ВУХ на людину.

Найбільш чутливі до уражаючої дії ВУХ органи дихання і слуху людини.

На рис. 3 наведені криві ступеня ураження органів слуху людини за впливом ВУХ [6].

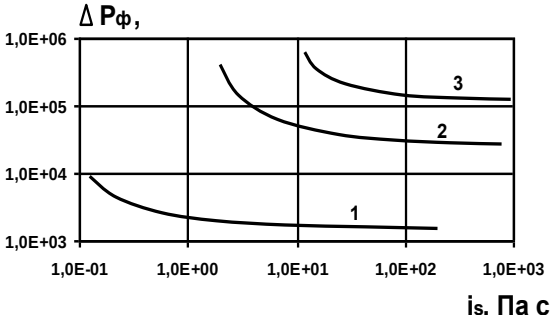

Рис. 3. Порогові криві ураження органів слуху людини при дії надлишкового тиску:
1 – 160 дБ, границя тимчасової втрати слуху;
2 – 185 дБ, нижня границя розриву барабанної перетинки; 3 – 195 дБ, 50-відсоткова ймовірність розриву барабанної перетинки

На практиці надання першої медичної допомоги військовослужбовцям і рятівникам відмічено, що найбільшому ушкодженню при вибуху підлягають легені, які складаються з повітряносних шляхів та кровоносних судин. За швидкого впливу ВУХ може відбуватися розрив легень, крововилив та ателектаз легень, тромбоемболія легеневих судин, гепоторанс, синдром "вологого" легеня і набряк легень. В подальшому на фоні наростаючої обструкції бронхіального дерева, парадоксального дихання та інфекції можуть розвиватися пневмонія, плеврит та гостра дихальна недостатність.

Органи слуху, у силу своєї досить високої чутливості до низьких рівнів потоків енергії, можуть уражатися при малих значеннях тиску у фронті і тривалості хвилі. Розрив барабанної перетинки людини відбувається після її переміщення всередину під час позитивної фази навантаження ВУХ. Рівні ураження військовослужбовців і рятівників від надлишкового тиску наступні (кПа): безумовне смертельне ураження – (100 ÷ 120), поріг смертельного ураження – (80 ÷ 100), тяжкий ступінь ураження легень – (60 ÷ 80), розрив барабанних перетинок – (35 ÷ 60).

Виявлена пряма залежність між ступеню ушкодження барабанних перетинок вуха людини і максимальним надлишковим тиском (рис. 4).

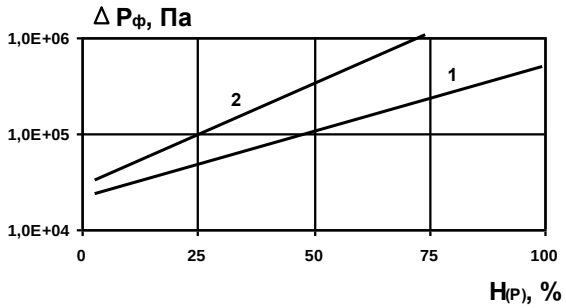

Рис. 4. Залежність ймовірності Н(Р) розриву барабанних перетинок від надлишкового тиску в ударній хвилі ΔРф вік людини: 1 – більше 20 років; 2 – до 20 років

Оцінка максимальної приведеної відстані для випадку загибелі людини, змінюється в залежності від фізичного положення людини і його розташування відносно відбиваючої поверхні.

Крім ураження органів дихання можливий механічний вплив з втратою орієнтації, стан нокауту і перенос тіла хвилею тиску.

Під впливом тиску та аеродинамічного напору ВУХ тіло людини може бути зрушено і перенесено на деяку відстань. При цьому ураження можуть виникати на стадії прискорення і гальмового удару. Рівняння дальності руху тіла людини, яке відкинуто ВУХ під кутом α до горизонту, мають наступний вид [7]:

$$L_0 = \tau_0 \, V_0 \cos\alpha, \quad \text{м}, \tag{7}$$

$$\tau_0 = \frac{2\,V_0 \cos\alpha}{g}, \quad \text{с}, \tag{8}$$

де L_0 – дальність польоту тіла; τ_0 – час руху; V_0 – швидкість польоту тіла людини; g – прискорення сили тяжіння (g = 9,8 м/с^2).

Рівняння руху тіла людини, яка підпадає під дію сили тяжіння в повітрі можна записати:

$$M\frac{dV_0}{dt} = Mg_0 - k_0 V_0, \tag{9}$$

де M – маса тіла людини; k_0 – коефіцієнт тертя, приймається рівним 0,2.

Істотне значення має ураження голови і тіла при ударі об тверду поверхню. Ступінь ураження голови і тіла при ударі в результаті переносу ВУХ буде визначатися наступними факторами: зміною швидкості при ударі, часом і відстанню гальмування, типом і площею тіла.

Відносна швидкість удару 3,05 м/с для частини тіла і голови практично безпечна, а поріг летального результату складає для голови без захисної каски – 3,96 м/с і частини тіла – 6,4 м/с.

Механічний вплив на людину при вибуху відбувається при дроблячих властивостях навколишнього середовища: обвал будівель і споруд, падіння дерев, фрагментів боєприпасів і будівельних конструкцій при ВУХ та осколками, утвореними при вибуху.

При вибуховому руйнуванні (фрагментації) будівельних конструкцій, контейнерів і ящиків, що утримують ТВР, утворюються первинні осколки різної маси, які розлітаються із швидкістю до кількох метрів у секунду. Осколки, що утворюються у результаті вибуху боєприпасів, є погано обтічними тілами, так як їх форма може бути подовженою або плоскою (дисковидною).

Розглянемо політ осколка як рух тіла, кинутого під кутом α до горизонту при наступних умовах:

– опір повітря і можливе обертання осколка не враховується;

– шлях, на якому на осколок діє тиск, приймається рівним товщині стінки контейнера;

– начало здвигу осколка відносно корпуса контейнера приймається одномірним по всьому периметру осколка;

– кут вилиту осколка α = 45 ° – при якому забезпечується найбільша дальність його польоту [8].

Рівняння руху тіла, кинутого під кутом до обрію, мають наступний вид [8]:

$$R_0 = t_0 V_0 \cos\alpha, \quad \text{м}, \tag{10}$$

$$t_0 = \frac{2V_0 \sin\alpha}{g}, \quad \text{с}, \tag{11}$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{R_0 g}{\sin 2\alpha}}, \quad \text{м/с}, \tag{12}$$

$$h_0^{max} = \frac{R_0^2 g}{2V_0^2}, \quad \text{м}, \tag{13}$$

де R_0 – дальність польоту осколка, м; V_0 – швидкість вилиту осколка, м/с; g – прискорення сили тяжіння, м/с^2; t_0 – час руху осколка, с; α – кут вилиту осколка, град.; h_0^{max} – максимальна висота польоту осколка, м.

Приблизна максимальна дальність польоту осколка с урахуванням (10) –(13):

$$R_0 = \frac{\Delta P_ф \; 2\delta f \sin 2\alpha}{m_0 g}, \quad \text{м}, \tag{14}$$

де m_0 – маса осколка; f – розмір поверхні осколка, м; δ – товщина осколка, м.

Результати визначення орієнтованої максимальної дальності польоту осколка різної маси приведені на рис. 5.

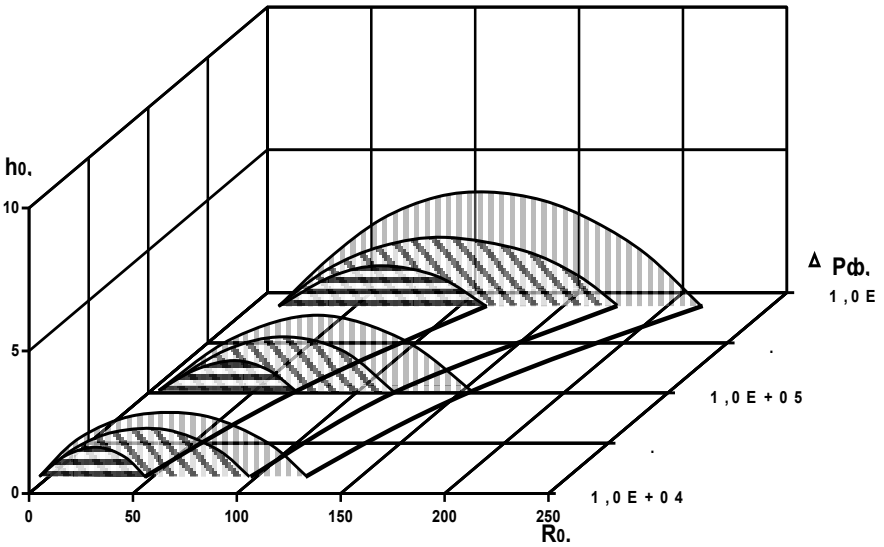

Рис. 5. Орієнтована максимальна дальність польоту осколків різної маси:
штриховка вертикальна – m_0 = 1,0 кг; коса – m_0 = 5,0 кг;
горизонтальна – m_0 = 10,0 кг

Імовірність ураження людини осколками, наприклад на відстанях, де влучання первинними осколками виводить її із строю, можна визначити як імовірність влучення в неї хоча б одного осколка. При цьому щільність розподілу фрагментів осколків може бути описана законом Пуассона. Тоді вираз для умовної ймовірності ураження осколками у випадку асиметричного розподілу осколків буде мати вигляд [7]:

$$Q = 1 - \exp\left[-FN\, f(R_n)\right], \quad (15)$$

де F – кутовий розмір людини; N – доля осколків, здатних уражати людину; $f(R_n)$ – розподіл осколків (щільність в залежності від відстані).

Тут $$f(R) = \frac{N\, n(R)}{2\pi}, \quad (16$$

де n(R) – доля осколків на відстані R.

Глибину проникнення осколка у тіло людини можна визначити за формулою [9]:

$$L_л = 3,46\left(\frac{m_0\, V_0^2}{2}\right)^{0,4}, \quad мм. \quad (17)$$

Гранична швидкість осколка може бути виражена наступною залежністю [8]:

$$V_n = \zeta_n\left(\frac{F_0}{m_0}\right) + 22,03, \quad с, \quad (18)$$

де V_n – гранична швидкість осколка, при якій у 50 % випадків шкіряний покрив людини пробиває наскрізь; ζ_n – коефіцієнт, рівний 1247; F_0 – міделевий перетин осколка.

Для осколка масою 1 кг, що летить із швидкістю 10 м/с у момент удару глибина проникнення у тіло людини може скласти 50 мм.

При масі осколка 1 кг, що летить із швидкістю 5,0 м/с і влучає у каску, може статися струс мозку людини, а при швидкості більше 30 м/с – пролам захисної каски.

Необхідно відмітити, що варіанти, які розглядаються, уявляють собою випадок максимального ураження людини осколками.

Рівняння (17) показує, що суттєве ушкодження організму людини може бути досягнуто у результаті ураження великим за розміром осколком.

Висновки

Запропоновані співвідношення можуть бути практично використані для оцінки ризиків ураження військовослужбовців і рятівників, які випадковим чином знаходяться у зоні ураження ВУХ і вторинних осколків при вибуху на складі боєприпасів.

Список літератури

1. *Власов О.Е. Основы теории действия взрыва. – М.: ВИА им. В.В. Куйбышева, 1957. – 201 с.*
2. *Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – М.: Физматлит, 2002. – 832 с.*
3. *Броуд Г. Расчеты взрывов на ЭВМ. Газодинамика взрывов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 274 с.*
4. *Зельдович Я.Б. Райзер Ю.Л. Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 400 с.*
5. *Саламахин Т.М. Физические основы механического действия взрыва и методы определения взрывных нагрузок. – М.: ВИА им. В.В. Куйбышева, 1974.*
6. *Покровский Г.И. Взрыв. – М.: Наука, 1973. – 182 с.*
7. *Байкер У., Кокс П., Уэстайн Н. Взрывчатые явления. Оценка и последствия. – М.: Мир, 1986. – 384 с.*
8. *Шапиро Д.М. Внешняя баллистика. – М.: Оборонгиз, 1946. – 120с.*
9. *Динамическая модель поглощения удара защитной каской / В.Е. Родин, Ю.М. Казанов, А.Ю. Казанов – Известие ВУЗов: Горный журнал, 2007. – № 2. – С. 40-44.*

Надійшла до редколегії 11.03.2008

Рецензент: канд. фіз.-мат. наук., ст. наук. співр. В.І. Гранцев, Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ.

РАСЧЕТ СЛЕДСТВИЙ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВЗРЫВЕ НА СОСТАВЕ БОЕПРИПАСОВ

В.Л. Сидоренко, С.И. Азаров

Рассмотрена методика оценки влияния воздушной ударной волны на человека, которая связана со случайными взрывами боеприпасов. Рассчитаны параметры зон детонационных и постдетонационных процессов при взрыве и размеры зон безопасности. Предложенные соотношения могут быть практически использованы для оценки рисков поражения военнослужащих и спасителей, которые случайным чином находятся в зоне поражения взрывной ударной волны и вторичных осколков при взрыве на составе боеприпасов.

Ключевые слова: *случайные взрывы на артиллерийском складе, взрывчатые вещества, взрывная ударная волна, поражение человека.*

CALCULATION OF RESULTS FROM THE ACTION OF THE EXPLOSIVE SHOCK WAVE ON A MAN AT AN EXPLOSION ON COMPOSITION OF LIVE AMMUNITIONS

V.L. Sidorenko, S.I. Azarov

The method of estimation of influence of air shock wave on a man, which is related to the casual explosions of live ammunitions, is considered. The parameters of areas of detonation and post-detonation processes at an explosion and sizes of areas of safety are expected. The offered correlations can be practically utillized for the estimation of risks of defeat of servicemen and rescuers which a casual rank it is been in the area of defeat of explosive shock wave and second fragments at an explosion on composition of live ammunitions.

Keywords: *casual explosions on ordnance depot, explosives, explosive shock wave, defeat of man.*