ISSN 2706-7386

УДК 622.2-397(237.3-381) DOI: 10.37701/dndivsovt.11.2022.07

Каплюк О.М., Нікітченко В.І., Кірдей Л.М., *Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*
Терновський А.Ю., *Національний університет оборони України імені Івана Черняховського*
Брайко В.В., *Товариство з обмеженою відповідальністю "Науково-виробнича фірма "Адрон"*

ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИБУХУ ТЕРМОБАРИЧНОГО БОЄПРИПАСУ

На основі аналізу методів визначення термодинамічних показників вибуху індивідуальних і сумішевих вибухових речовин запропоновані удосконалені розрахунки і методики визначення основних термодинамічних параметрів вибуху термобаричного боєприпасу, таких як: теплота вибуху, об'єм газоподібних продуктів що утворюються, температура і радіус високотемпературної області, надлишковий тиск у фронті ударної хвилі і його швидкість. Особливістю удосконалених розрахунків і методик є врахування фізичних особливостей вибуху термобаричної вибухової речовини.

Ключові слова: *термобаричний боєприпас, термобарична вибухова речовина, термодинамічні показники вибуху, особливості вибуху термобаричної вибухової речовини.*

Постановка проблеми.

Декілька останніх десятиліть свідчать про появу великої кількості систем озброєння. Більшість бойових частин (БЧ), що використовуються в теперішній час, для ураження цілей використовують вибухові речовини (ВР) з метою формування осколкового поля чи кумулятивного струменя. До недавнього часу тільки окремі БЧ визначали вибух як основний фактор ураження. Але нові технології дозволили розробити БЧ, які мають покращені характеристики вибуху і використовують його як один з основних методів впливу на ціль, це - термобаричні бойові частини (ТБЧ).

Для спорядження ТБЧ використовують ТВР, що являють собою суміші індивідуальних вибухових речовин (гексоген, октоген тощо), палива (роль палива виконує хімічно активний металевий порошок з високою потенційною енергією) та інертних речовин. Термобаричні вибухові речовини (ТВР) здатні демонструвати значно триваліший час існування зони надлишкового тиску і температури, за рахунок більш тривалого процесу виділення енергії вибухового перетворення.

Сумішеві ТВР, до складу яких входять декілька індивідуальних ВР з додаванням різноманітних добавок розробляються для отримання специфічних властивостей термобаричного боєприпасу (ТБ), таких як: зниження чуттєвості до механічного впливу, підвищення теплоти вибуху тощо.

Боєприпаси споряджені сумішевими (багатокомпонентними) ТВР мають багато переваг перед боєприпасами спорядженими звичайними ВР. Вони більш економічні (дешевші у виготовленні), більш безпечні при застосуванні та дають змогу регулювати термодинамічні характеристики, а також склад продуктів вибуху, це дає можливість підібрати оптимальне наповнення ТБ для виконання конкретних завдань.

Процес вибуху сумішевих ТВР проходить у дві стадії. У першій стадії відбувається вибухове розкладання (газифікація) одного або декількох компонентів. У другій стадії, в процесі розширення і турбулентного змішування з киснем навколишнього повітря відбувається взаємодія компонентів розкладання (газифікації) між собою та з іншими частинами компонентів які не розклалися на першій стадії (наприклад металів) [1]. Основна частина енергії виділяється на другій стадії, у зв'язку з вторинними реакціями взаємодії в газовій фазі.

© Каплюк О.М., Нікітченко В.І., Кірдей Л.М., Терновський А.Ю., Брайко В.В., 2022

При визначенні термодинамічних параметрів вибуху ТБ можливо користуватися розрахунками і методиками визначення характеристик звичайних індивідуальних і сумішевих ВР, якими споряджаються фугасні боєприпаси. Але зважаючи на суттєві відмінності процесу протікання термобаричного вибуху для достовірної оцінки бойових характеристик ТБ доцільно провести уточнення розрахунків і методик визначення термодинамічних параметрів продуктів вибухового перетворення ТВР.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Зважаючи на широкий спектр застосування ТВР у БЧ різноманітних типів озброєння, [2–7] можна зробити висновок про перспективи розвитку боєприпасів на основі ТВР.

Тому, в наш час, проводиться велика кількість теоретичних і практичних досліджень, для того, щоб зрозуміти і описати процес реакції часток палива у складі ТВР з газоподібними продуктами детонації і окреслити оптимальні умови необхідні для повного використання палива під час детонації ТБ. Кінцевий склад суміші повинен являти собою компроміс між швидкістю реакції, оптимальним розподілом палива, не окислених продуктів детонації і здатністю ініціювати горіння суміші металевого палива і повітря. Процес вибуху повинен бути достатньо повільним, щоб розсіяти порошок металевого палива, але достатньо швидким, щоб гарантувати безперервність процесу горіння. Якщо процес буде занадто швидким, то паливо розсіється надмірно великим радіусом, а згенерована теплова хвиля занадто мала, щоб ініціювати подальше окислення частин палива [8, 9].

Основна мета цих перспективних досліджень в тому, щоб “змусити” частини металевого палива згорати повністю і з достатньою швидкістю, щоб енергія, котра виділяється, могла повністю використовуватися під час вибуху (на анаеробній стадії для посилення вибухової хвилі, а на аеробній стадії для підвищення температури і тиску вогняної кулі).

Однак це завдання вирішити не просто, адже на сьогодні не існує надійного кількісного методу для визначення чи навіть оцінки реальної кількості палива, яке дійсно згоріло і використовувалось ефективно під час всього процесу детонації. А це ускладнює роботи по оптимізації складу ТВР і робить дослідження щодо оцінки термодинамічних характеристик ТБ довшими і більш затратними.

Ряд дослідників, намагалися усунути ці недоліки шляхом покращення обробки існуючих компонентів ТВР та пошуком нових [10]. Одним із таких методів обробки матеріалів являється процес зменшення розміру їх часток за допомогою технологій подрібнення. Тут варто зазначити, що дрібні частини зазвичай більш реакційно здатні, ніж відносно великі, тому процес пошуку оптимального розміру і форми часток металізованого порошку є одним з методів покращення показників вибуху ТБ.

На теперішній час на заміну алюмінію в складі ТВР почали розглядати бор: він має вищу теплоту згорання в порівнянні з алюмінієм і багатьма іншими металічними видами палива.[11]. Інші дослідники [12] вивчали можливість використання суміші бору і алюмінію в складі композиції гексогену і гуми.

Ще одним кроком у покращенні характеристик ТБ буде подолання природного “захисного” шару частинок бору і алюмінію – оксиду бору і оксиду алюмінію, що ззовні окутують частинки палива і ускладнюють процес запалення алюмінію і бору. З метою подолання цієї проблеми можуть бути застосовані більш активні метали, такі як магній – для покращення температури запалення і часу згорання. [10].

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми.

Таким чином, різноманітність сучасних підходів до створення ТВР спонукає розвиток методичного апарату щодо оцінки термодинамічних показників сучасних ТБ.

Мета статті.

В статті запропоновано розрахунки і методики визначення основних термодинамічних параметрів вибуху ТБ а саме: теплота вибуху, об’єм газоподібних продуктів що утворюються, температура і радіус високотемпературної області, надлишковий тиск у фронті ударної хвилі (ФУХ) і його швидкість з урахуванням фізичних особливостей ТВР.

ISSN 2706-7386

Виклад основного матеріалу.

Виходячи з фізики термобаричного вибухового перетворення, основними термодинамічними параметрами вибуху ТБ, що впливають на його бойові характеристики є: теплота вибуху, об'єм газоподібних продуктів що утворюються, температура і радіус високотемпературної області, надлишковий тиск у ФУХ і його швидкість.

Теплота вибуху являється однією з базових характеристик будь-якої ВР, так як, визначає її вибухові і детонаційні характеристики. Під нею розуміють кількість тепла, яке виділяється під час вибуху одного кілограма вибухової суміші.

Визначення теплоти вибуху базується на термохімічному законі Гесса. У відповідності з ним тепловий ефект вибуху залежить не від шляху реакції, а тільки від початкового і кінцевого стану системи [13] (Рис.1).

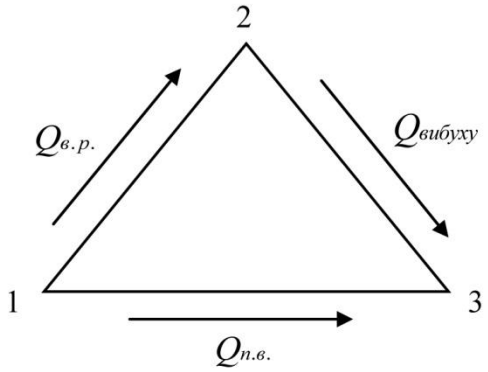


Рис.1. Схематичне зображення закону Геса

Виходячи з цього, теплота вибуху ($Q_{вибуху}$) дорівнює різниці теплоти утворення продуктів вибуху ($Q_{п.в.}$) і вихідної ВР ($Q_{в.р.}$):

$$Q_{вибуху} = Q_{п.в.} - Q_{в.р.}$$

Теплота вибуху однієї конкретної ВР у суміші визначається по формулі:

$$Q_1 = \frac{Q_{вибуху} \times 1000}{m_{ВР}}, \quad (1)$$

де $m_{ВР}$ – номінальна маса ВР.

Для одного кілограма сумішевої ТВР формула (1) приймає вигляд:

$$Q_1 = \frac{q_1 n_1 + ... + q_n n_n - (Q_1 n_1 + ... + Q_n n_n)}{N_1 m_1 + ... + N_n m_n},$$

де $q_1 ... q_n$ – теплота утворення продуктів вибуху; $N_1 ... N_n$ – число молів продуктів вибуху; $Q_1 ... Q_n$ – теплота утворення продуктів вибуху сумішевої ТВР; $m_1 ... m_n$ – число кіло молів компонентів в одному кілограмі термобаричної суміші.

При розрахунку теплоти вибуху необхідно завжди знати кінцевий стан продуктів вибуху. В існуючих методах розрахунку теплоти вибуху розглядаються два можливих значення $Q_{вибуху}$, що відповідають поточним станам продуктів вибуху:

на початковій стадії вибуху, тобто в самій детонаційній хвилі після завершення реакцій вибухового перетворення ВР;

при розширенні продуктів вибуху до моменту зрівняння їх тиску з тиском оточуючого середовища.

Відповідно до цих станів продуктів вибуху теплота вибуху може бути "детонаційна" і "фугасна".

Однак значення цих теплот вибуху не являються константами, що характеризують енергетику ВР. Детонаційна теплота залежить від тиску в детонаційній хвилі, а фугасна - від

умов протікання процесу розповсюдження продуктів вибуху, тобто від тиску в середовищі детонаційної хвилі.

Виходячи з вищесказаного, у фазах вибуху в якості критерію теплового ефекту вибуху ТВР необхідно розглядати теплоту вибуху, що відповідає максимально можливому тепловому ефекту $Q_{\max}$, який досягається при утворенні найвищих оксидів горючих компонентів у складі ВР (водню, вуглецю, металів). Величина $Q_{\max}$ являється величиною постійною і залежною тільки від складу ВР.

Об'єм газоподібних продуктів вибуху визначається по реалізації вибухового перетворення ТВР на основі закону Авогардо, згідно з яким об'єм, що займає один моль газу при температурі 0ºС і тиску $1{,}01*10^5$ Па, дорівнює 22,4 л.

Звідси вираз для визначення об'єму продуктів вибуху ($м^3$/кг) для одного моля індивідуальної вибухової речовини має вигляд[14]:

$$V_{п.в.} = \frac{22,4(n_1 + n_2 + ... + n_n)}{M_{в.в.}}, м^3/кг, \quad (2)$$

де $M_{в.в}$ – молекулярна маса вибухової речовини, г моль;

$n_1, n_2, ...$ – кількість грам-молекул газоподібних продуктів вибуху.

ТВР якими споряджаються сучасні ТБ є сумішевими багатокомпонентними сполуками, тому формула (2) приймає наступний вигляд:

$$V_{п.в.} = \frac{22,4(n_1 + n_2 + ... + n_n)}{M_1 m_1 + M_2 m_2 + ... + M_n m_n}, м^3/кг,$$

де $m_1, m_2, ...$ – кількість грам-молекул складових частин ТВР;

$M_1, M_2, ...$ – молекулярні маси складових частин ТВР.

Температуру і радіус високотемпературної області, що утворюється в наслідок вибуху ТБ доцільно оцінювати як розрахунковим методом так і методом натурного експерименту.

Більшість існуючих ТВР все ще засновані на застарілих типах компонентів, і для коректного процесу вибуху потребують підсилюючого заряду. В цьому випадку для розрахунку радіусу високотемпературної області ($R_{обл}$) користуються наступним виразом:

$$R_{обл} = m_У^{\frac{1}{3}}\left(6,37 + 0,09\frac{m_{ВР}}{m_У}\right), \quad (3)$$

де m_y - маса підсилюючого заряду, кг;

$m_{ВР}$ - маса ТВР, кг.

Сучасні ТБ зазвичай створюються з використанням термобаричних сумішей, що не потребують підсилюючого заряду, тоді формула (3) приймає наступний вигляд:

$$R_{обл} = m_В^{\frac{1}{3}}(Z + J\frac{m_{ВР}}{m_В}), \quad (4)$$

де m_B - маса вибухової частини в складі заряду ТВР ($m_{ВР}$);

Z, J - коефіцієнти, що визначаються експериментально.

Маса ВР (m_B) визначається виходячи із відсоткового складу компонентів термобаричної суміші.

Вираз (4) був перевірений експериментально на зарядах ТВР без підсилюючого заряду масою до 100 гр.

ISSN 2706-7386

Температура хмари вибуху ($T_{вибуху}$) ТБ описується температурою вибухового перетворення ТВР якою він споряджений, і визначається із загального термодинамічного виразу для ізольованої системи:

$$DE = DQ + PDV,$$

де $E = C_v T_{вибуху}$ - внутрішня енергія продуктів вибуху;

PDV - робота розширення газів.

Приймаючи припущення, що продукти вибуху утворюються практично у вихідному об'ємі вибухової речовини [14], тобто $DV = 0,$ можна скористатися методикою:

$$\Delta E = -\sum (C_{v_1} T_{вибуху} - C_{v_2} T_2) n_i = Q_{вибуху},$$

де $Q_{вибуху}$ - теплота вибуху;

n_i - число молей і-го компонента продуктів вибуху;

C_{v_1}, C_{v_2} - молярна теплоємність відповідного і-го компонента продуктів вибуху при $T_{вибуху}$ і при кінцевій температурі продуктів вибуху (T_2).

Значення величини $C_{v_2} T_2$ порівняно мале в порівнянні з $C_{v_1} T_{вибуху}$ і ним можна знехтувати. З урахуванням цього отримуємо вираз:

$$T_{вибуху} = \frac{Q_{вибуху}}{\Sigma_{Cvi} П_i}.$$

Теплоємність C_v зазвичай подається у вигляді формули Г. Каста [14]:

$$C_v = a + bT + cT^2 + \ldots, \quad (5)$$

де a, b, c - емпіричні коефіцієнти.

Для інженерних розрахунків у виразі (5) достатньо обмежитися двома першими частинами:

$$C_v = a + bT,$$

або, з урахуванням числа молів ПВ, що утворюються:

$$\Sigma C_{v_i} П_i = \Sigma_{a_c} n_i + (\Sigma_{в_i} n_i) T_{взр},$$

де $a_i, в_i$ - емпіричні коефіцієнти і-го компонента продуктів вибуху; n_i - число молей і-го компонента продуктів вибуху.

Виходячи з цього остаточний вираз для визначення температури хмари вибуху ТБ матиме наступних вигляд:

$$T_{вибуху} = \frac{\Sigma_{n_i a_i} + ((\Sigma_{n_i a_i})^2 + 4\Sigma_{n_i в_i} Q_{вибуху} 10^3)^{\frac{1}{2}}}{2\Sigma_{n_i в_i}}, \quad (6)$$

де $T_{вибуху}$ - температура продуктів вибуху ТВР боєприпату, °С;

n_i - число молів однойменних газів;

$Q_{вибуху}$ - теплота вибуху ТВР боєприпасу, кДж/моль.

Емпіричні коефіцієнти а і в, запропоновані Г. Кастом, наведені в таблиці 1.

Для основних твердих компонентів, що містяться в ПВ, значення в = 0, а величина а рівна $24{,}97 \times n_i$, де n_i - число молів твердих компонентів.

Таблиця 1

Значення емпіричних коефіцієнтів а і в

Тип газу	*а,* Дж/моль °С	*в*, Дж/моль °С
двохатомні (CO, H_2, O_2, H_2, H_0)	20,1	$18,86\times10^{-4}$
трьохатомні (CO_2, NO_2)	41,1	$24,3\times10^{-4}$
чотирьохатомні	41,9	$18,86\times10^{-4}$
п'ятиатомні	50,28	$18,86\times10^{-4}$
пар води (H_2O)	16,76	$90,10\times10^{-4}$
тверді компоненти продуктів вибуху (C, AC_2O_3)	24,97	0

Застосування виразу (6) можливе тільки при наявності відомої величини теплоти вибуху конкретної марки ТВР і реакції її вибухового перетворення.

Для експериментального підтвердження характеристик температури хмари вибуху, що утворюється в результаті підриву ТБ ($T_{вибуху}$), і радіусу високотемпературної області ($R_{обл}$) методом натурного експерименту можливо застосувати наступне обладнання:

- тепловізор з максимальною температурою реєстрації не менше 1500°С;
- відеокамера з частотою знімання не менше50 кадр/с.;
- персональний комп'ютер (далі - ПК);
- мірна лінійка у вигляді тичини з візуально видимими поділками;
- далекомір з можливістю вимірювання відстані не менше 500 м.

Типова схема розміщення обладнання наведена на рисунку 2.

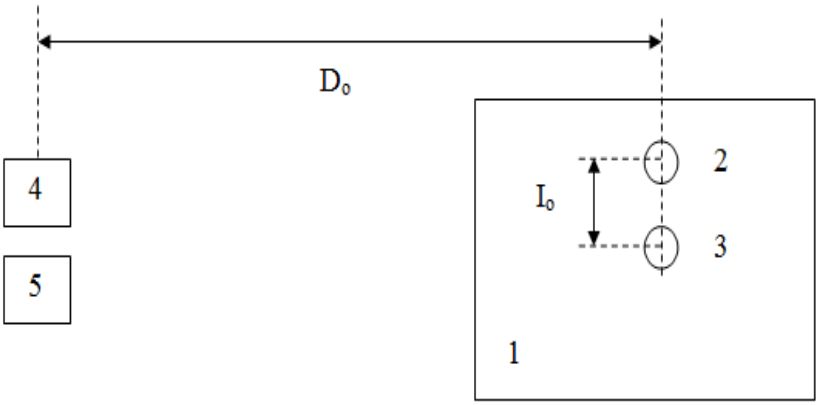


Рис.2. Схема розміщення обладнання

1 – площадка підриву; 2 – мірна лінійка; 3 – точка підриву; 4 – тепловізор; 5 – відеокамера; *Do* – відстань від точки підриву до апаратури реєстрації; *Io* – відстань між точкою 2 і 3.

Особливості тарирування відеокамери наведено на рисунку 3.

ISSN 2706-7386

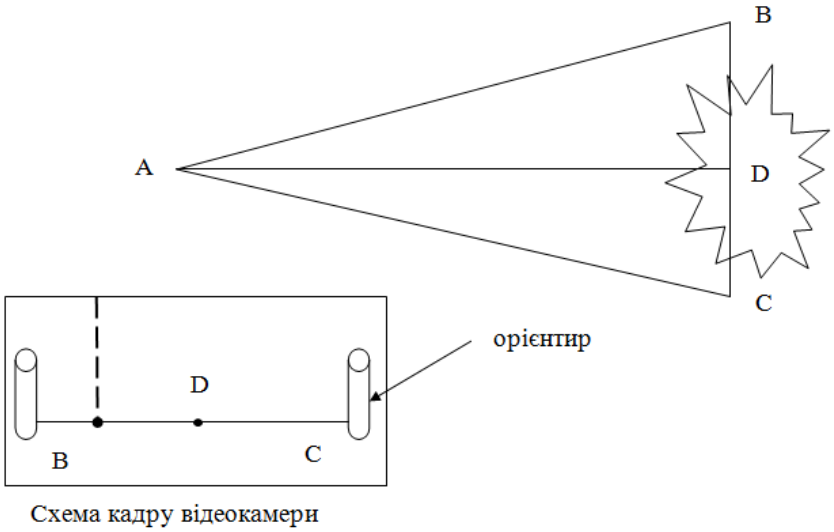


Рис.3. Схема тарирування відеокамери
A – точка встановлення відеокамери; B, C – точки орієнтиру; D – точка підриву

Для тарирування відеокамери, необхідно вибрати на місцевості мірну базу BC, позначити візуально контрастними орієнтирами точки B і C, заміряти далекоміром довжину бази BC і відстань AD. Розмір бази повинен бути більшим за очікуваний розмір хмари підриву.

Трансфокатором доцільно відрегулювати розмір кадру відеокамери таким чином, щоб його ширина співпадала з розміром мірної бази BC. Відзняти відео, не змінюючи положення трансфокатору.

Під майданчик для проведення підривів доцільно вибрати ділянку з щільним ґрунтовим покриттям у формі квадратурозміром (6х6) м.

За допомогою спеціального програмного забезпечення проводиться обробка зареєстрованих характеристик вибуху: температури хмари вибуху і радіусу високотемпературної області.

Одним з ключових факторів, що впливає на ступінь ураження цілі при підриві ТБ є рівень надмірного тиску, що утворюється у ФУХ. За допомогою формули Садовського можна описати залежність надмірного тиску від відстані до точки вибуху [15]:

$$\Delta p = \frac{0,7q}{r^3} + 0,27\left(\frac{0,7q}{r^3}\right)^{2/3} + 0,084\left(\frac{0,7q}{r^3}\right)^{1/3},$$

де Δp – надмірний тиск у фронті ударної хвилі, $мПа$, q – маса вибухової речовини, кг (тротиловий еквівалент), r – відстань до точки вибуху, м.

Швидкість руху ФУХ і рівень надмірного тиску є взаємопов'язаними між собою величинами:

$$\Delta p = \left(\frac{294,53}{273,15+t}\right)\left(V^2 - C^2\right),$$

де t – температура зовнішнього повітря, $^{\circ}C$; V – швидкість руху ФУХ, м/с;
C – швидкість звуку, м/с.

Швидкість звуку залежить від навколишнього середовища, зокрема, температури і вологості. Залежність швидкості звуку від температури і вологості можна визначити за формулою [15]:

$$C = 331,4 + 0,6t + 0,0124H,$$

де H – відносна вологість зовнішнього повітря, %.

Надлишковий тиск у ФУХ при вибуху сумішевої ВР, розраховується за уточненою формулою М.А. Садовського.

Для наземного вибуху вона має вигляд:

$$\Delta P_{ф} = 101\frac{m_t^{0,33}}{R} + 420(\frac{m_t^{0,33}}{R})^2 + 1410(\frac{m_t^{0,33}}{R})^3 \text{ , кПа,} \qquad (7)$$

де $m_t = h \times K \times m_{ВР} \times K_1$;

h - коефіцієнт впливу складу ґрунту;

K - тротиловий коефіцієнт ВР по ударній хвилі;

$m_{ВР}$ - маса ВР, кг; K_1 - коефіцієнт заповнення боєприпасу ВР;

R - відстань від місця формування ударної хвилі, м.

Однак формула (7) отримана для умовного зосередженого заряду і не враховує форму ТБ і особливості вибуху ТВР, що приводить до розбіжностей з експериментальними даними.

Всі боєприпаси, в тому числі і термобаричні, мають форму, близьку до циліндру певного розміру, а відрив ударної хвилі від меж вогняної кулі, що утворюється після детонації ТВР, проходить в умовах затрат енергії, яка виділилася на формування високотемпературної області.

Проведені натурні експерименти із зарядами ТВР масою від 40 гр. до 2000 гр. показали, що при інженерних розрахунках надлишкового тиску ФУХ необхідно за основу взяти формулу Г.І. Покровського. З урахуванням особливостей вибуху ТВР вона приймає наступний вигляд:

– для вибуху на поверхні:

$$\Delta P = 1373,4\frac{m_t}{(R + A + R_{обл})^3} + 421,8\frac{m_t^{\frac{2}{3}}}{(R + A + R_{обл})^2} + 107,9\frac{m_t^{\frac{1}{3}}}{R + A + R_{обл}}, кПа,$$

де $R_{обл}$ - радіус високотемпературної області, м.;

A - коефіцієнт, що враховує втрату енергії на утворення хмари вибуху (залежить від властивостей ТВР);

– для вибуху у повітрі:

$$\Delta P = 686,7\frac{m_t}{(R + A + R_{обл})^3} + 264,9\frac{m_t^{\frac{2}{3}}}{(R + A + R_{обл})^2} + 82,4\frac{m_t^{\frac{1}{3}}}{R + A + R_{обл}}, кПа.$$

Для визначення надлишкового тиску ФУХ і швидкості його руху експериментальним методом можливо використати цифровий вимірювач типу ЦИС-С з наступними характеристиками:

– межа швидкості що вимірюється – (340–1000) м/с;

– межа тиску, що вимірюється – (5–1000) кПа.

Типова схема розміщення датчиків для фіксації швидкості поширення ФУХ і створюваного тиску із комплекту ЦИС-С наведена на рисунку 4.

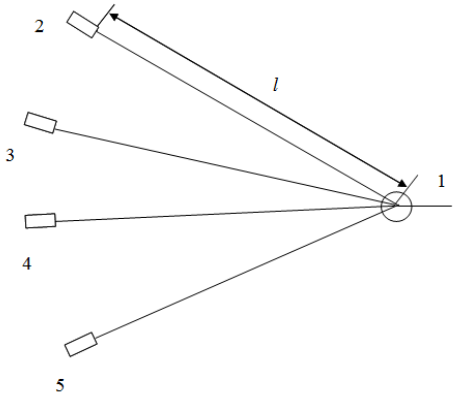


Рис.4. Схема розміщення датчиків ЦИС-С

1 – точка підриву; 2, 3 ,4, 5 – датчики; *l* – відстань від точки підриву до першого датчика

Датчики розміщуються на майданчику підриву точно у напрямку до точки підриву. Відстань *l* необхідно виміряти з похибкою ±1 см. Величина *l* залежить від маси ТВР у боєприпасі що підривається і повинна бути не менш ніж на 30% більше радіуса хмари, що створюється при вибуху.

Датчики доцільно заглибити у ґрунт. Верхній край датчиків повинен відповідати рівню майданчику підриву, а відстань між гранями датчика і стінками заглиблення біля 1 см.

У випадку використання датчиків тільки для виміру надлишкового тиску у фронті ударної хвилі, їх встановлення повинно відповідати керівництву з експлуатації.

До початку вимірювань необхідно провести тарирування датчиків з метою врахування чинників місця проведення випробувань, які впливають на точність отриманих характеристик (вид підстілаючої поверхні, рельєф, вид і місце встановлення заряду тощо).

Тарирування можна виконати шляхом підриву еталонного зразка ВР в точці наступного підриву термобаричного боєприпасу. Еталонний зразок повинен мати циліндричну форму, масою 0,1 кг±5% без оболонки. В точці підриву еталон встановлюється вертикально, а детонатор розташовується у верхній частині. Датчики необхідно встановити на (3±0,01) м. від точки підриву точно спрямованими на точку підриву.

Після підриву і контролю показників датчиків потрібно розрахувати тарирувальні коефіцієнти по вимірюваним надлишковому тиску (K_p) і швидкості (K_v) по наведеним формулам, відповідно:

$$K_p = \frac{P_{фп}}{P_ф};$$

$$K_v = \frac{V_{фп}}{V_ф},$$

де $P_{фп}$ і $V_{фп}$ - постійні величини, що характеризують властивості підстилаючої поверхні. Їх значення наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Характеристики підстилаючої поверхні

Величина	Пістилаюча поверхня			
	Плита, сталь залізобетон	Бетон, скеля	Глина	Грунт середньої щільності
$P_{фп}$, кПа	46	43,3	38,9	35,2
$V_{фп}$, м/с	401	398,2	392,7	388

Отже, запропоновані розрахунки і методики визначення термодинамічних параметрів вибуху дозволяють розрахувати і оцінити характеристики вибуху сучасних ТБ.

Висновки.

Бойові характеристик ТБ формуються на основі термодинамічних параметрів його вибуху, що свідчить про необхідність проведення максимально точних розрахунків цих параметрів.

Запропоновані розрахунки і методики проведення натурних експериментів щодо визначення об'єму газоподібних продуктів вибуху, температури і радіусу високотемпературної області, надлишкового тиску ФУХ, швидкості ФУХ дозволяють враховувати фізичні особливості вибуху ТБ.

Натурні експерименти щодо оцінювання термодинамічних параметрів вибуху ТБ необхідно організовувати з урахуванням специфіки вражаючої дії ТВР. Адже, особливості

вибуху боєприпасу спорядженого ТВР безпосередньо впливають і на організацію місця їх досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гельфанд Б.Е. Объемные взрывы: монографія / Б.Е. Гельфанд, М.В. Сильников. – СПб.: Астерион, 2008. – 374 с.
2. New RPO Shmel-M Infantry Rocket Flamethrower Man-Packable Thermobaric Weapon [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.defensereview.com/new-rpo-shmel-m-infantry-rocket-flamethrower-man-packable-thermobaric-weapon.
3. Modern Firearms – RMG // Russia: World Guns. January 24, 2011. – Retrieved July 12, 2011.
4. Kornet-EM: Multi-purpose Longrange Missile System // Russia: Kbptula. Archived from the original on December 29, 2013. – Retrieved December 28, 2013.
5. TOS-1 Heavy flamethrower system [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.military-todey.com/artillery/tos1.htm.
6. SS-26 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://missilethreat.csis/org/missile/ss-26-2.
7. ODAB-500PMV Fuel-Air-Explosive bomb [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https:// roe.ru/eng/catalog/aerospace-systems/air-bombs/odab-500pmv.
8. Trzciński W.A. Thermobaric and Enhanced Blast Explosives – Properties and TtestingMethods / W.A Trzciński, L. Maiz // (Review). Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 40(4), 2015,632–644.
9. Chen Y. Experimental Study of the Explosion of Aluminized Explosives in Air / Y. Chen, S. XU, D.J. WU, D.B. LIU // Central European Journal of Energetic Materials, 13(1),2016, 117–134.
10. Yen N.H. Reactive metals in explosives / N.H. Yen, L.Y. Wang // Propellants Explos Pyrotech 2012;37(2):143–55.
11. Makhov M. Explosion heat of boron-containing explosive composition. / 35th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, June 29–July2 2004, p. 55.1.
12. Lee K.B. Relationship between combustion heat and blast performance of aluminized explosives / K.B. Lee, K.D. Lee, J.K. Kim // 36th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, June 28–July 1 2005. p. 118.1.
13. Соболєв В.В. Технологія та безпека виконання підривних робіт: практикум / В.В. Соболєв, І.І. Усик, Р.М. Терещук // Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2014. – 18 с.
14. Горбонос М.Г. Методические указания. Часть I. / М.Г. Горбонос. – Петрозаводск: Петрозаводской государственный університет, 2011. – 28 с.
15. Телевний І.В. Особливості дослідження боєприпасів з термобаричними вибуховими речовинами / І.В. Телевний, В.І. Нікітченко, С.І. Клюфас, А.Г. Дмитрієв. // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – Харків: ХНУПС, 2020. – Вип. № 1. – С. 145–151.

Каплюк Олександр Миколайович
науковий співробітник науково-дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
https://orcid.org/0000-0002-9449-5395
e-mail: skaplyk@ukr.net

Oleksandr Kapliuk
Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-9449-5395
e-mail: skaplyk@ukr.net

Нікітченко Віктор Іванович
кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник науково-дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
https://orcid.org/0000-0001-8973-8711
e-mail: nazar200914@gmail.com

Кірдей Леонід Миколайович
провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
https://orcid.org/0000-0003-0954-9545
e-mail: kirdei550@gmail.com

Терновський Андрій Юрійович
слухач Національного університету оборони України імені Івана Черняховського, Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0001-9681-3740
e-mail: ternonovskoy91@gmail.com

Брайко Володимир Вікторович
провідний конструктор товариства з обмеженою відповідальністю "Науково-виробнича фірма "Адрон", Київ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-8273-8919

Viktor Nikitchenko
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Chief of Section of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-8973-8711
e-mail: nazar200914@gmail.com

Leonid Kirdei
Lead Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-0954-9545
e-mail: kirdei550@gmail.com

Andrey Ternovskoy
listener the National Defence university of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi, Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-9681-3740
e-mail: ternonovskoy91@gmail.com

Volodymyr Brajko
Lead Designer of Adron Research and Development Co. Ltd., Kyiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-8273-8919
e-mail: bvv@adron.ua

DETERMINATION OF MAIN THERMODYNAMIC PARAMETERS OF THERMOBARIC AMMUNITION EXPLOSION

O Kapliuk, V Nikitchenko, L Kirdei, A Ternovskoy and V Brajko

A large number of weapon systems have been emerged over the last few decades. Most of these parts create an explosive for poles using fragmentation or cumulative jet. Until recently, some combat units identified the explosion as a major factor. But new technologies have made it possible to develop warheads that improve the characteristics of the explosion and use it as one of the main methods of impacting the target, i.e thermobaric warheads.

Ammunition equipped with mixed (multicomponent) thermobaric explosives has many advantages over ammunition equipped with conventional explosives. They are more economical (cheaper to manufacture), safer to use and have adjustable thermodynamic characteristics, as well as the composition of products, which allows you to choose the optimal filling of thermobaric ammunition to perform specific tasks.

The article proposes calculations and methods for determining the main thermodynamic parameters of thermobaric ammunition explosion, namely: heat of explosion, volume of gaseous products, temperature and radius of high temperature area, excess pressure in front of the shock wave and its speed taking into account the physical characteristics of thermobaric explosive.

The peculiarity of the above calculations and methods is to take into account the physical characteristics of the explosion of the explosive mixture.

Keywords: *thermobaric ammunition, thermobaric explosive, thermodynamic parameters of explosion, features of explosion of thermobaric explosive.*