

УДК: 358.2:623.11.3

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.32.2025.125-133>

Є. Шматов, І. Мартинюк, О. Ємельянов, Т. Погребняк, А. Каршень, О. Стаднічук

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Article history: Received 24 February 2025; Revised 24 February 2025; Accepted 14 March 2025

МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОБАРИЧНИХ БОЄПРИПАСІВ ДЛЯ ПРОРОБЛЕННЯ ПРОХОДІВ У МІННИХ ПОЛЯХ

Масштабне використання дистанційного мінування та застосування сучасних типів мін, обладнаних механізмами проти вилучення, суттєво впливають на хід тактичного планування та успішне проведення операцій. На лінії зіткнення основним і дієвим способом подолання мінно-вибухових загороджень залишаються заходи з пророблення проходів силами інженерно-саперних підрозділів. Ризики, пов'язані з проробленням проходів у загородженнях, є доволі великими, тому використання різних безпечних, актуальних способів і засобів для розмінування та пророблення проходів, особливо в смузі, де оборона готувалась завчасно з високою щільністю мінних полів, пошук більш ефективних вибухових речовин, що можуть бути використані для спорядження засобів пророблення проходів, залишається актуальним і доволі затребуваним. Мета дослідження – обґрунтування доцільності використання термобаричних сумішей (вибухових речовин) для пророблення проходів у мінно-вибухових загородженнях. Проаналізовано термодинамічні параметри продуктів вибухового перетворення термобаричних і фугасних боєприпасів. Визначено, що важливими термодинамічними параметрами вибуху є надлишковий тиск та питомий імпульс тиску. Термобаричні вибухові суміші у порівнянні зі звичайними конденсованими вибуховими речовинами характеризуються більшою тривалістю ударних хвиль, що виникають при детонації, надлишковим тиском і питомим імпульсом надлишкового тиску. Оцінено достатність надлишкового тиску та імпульсу, які виникають при підриві термобаричної вибухової суміші, що складається з октогену, металічного пального (магнієво-алюмінієвого порошку, амонії перхлорату та полібутадієну) для спрацювання підричників (основних датчиків цілі) натискної дії протитанкової міни ТМ-62. Отримані значення імпульсу спрацювання підричників натискної дії дозволяють зробити висновки, що досліджувана термобарична суміш масою від 2 кг і більше на ділянці радіусом до 9 м спроможна привести у дію підричники натискної дії протитанкової міни ТМ-62. Основний напрям наступних досліджень необхідно спрямувати на проведення розрахунків та натурних випробувань з визначення оптимальної висоти підриву термобаричного боєприпасу, його маси та конфігурації для збільшення ефективності дії ударної хвилі вибуху.

Ключові слова: мінно-вибухові загородження, подолання інженерних загороджень, термобаричні суміші, заряди розмінування, надлишковий тиск вибуху, питомий імпульс тиску.

Постановка проблеми

Збройні конфлікти сучасності, зокрема війна в Україні, підтверджують актуальність застосування безпілотних літальних апаратів, вогню артилерії та тотального мінування місцевості для посилення оборони та захисту позицій [3, 23]. Відповідно до доктринальної моделі збройних сил росії мінне поле розміщується на передньому краю оборони, в проміжках між опорними пунктами і на флангах по всій глибині смуги оборони. По всій ширині району бойових дій будуються райони оборони та опорні пункти, а оборона підтримується шляхом масованого створення вибухових і невибухових загороджень, головно – протитанкових і комбінованих мінних полів.

На окремих ділянках оборони щільність мін у десятки разів перевищує розрахункові норми. Мінні поля прикриваються засобами вогневого ураження (наприклад, артилерією), що становить значну проблему для атакуючих сил, обмежуючи свободу їхнього маневру під час атаки перших ліній оборони противника, чи розгортання основних сил атаки [14]. - Підрозділ, що атакує, в такій ситуації зазвичай втрачає ініціативу, його маневр стає обмеженим, і він потрапляє під прицільний вогонь противника. Використання мінних полів та груп мін багаторазово підсилює оборону противника.

На сьогодні одним із поширених способів мінування є дистанційний, коли встановлення мінних полів здійснюється на відстані за допомогою реактивної

артилерії, мінних пускових установок або безпілотних літальних апаратів. Тактичне використання дистанційної доставки мін, що практикується в поточній війні в Україні, базується на встановленні мін на місцевості безпосередньо перед підрозділами, що атакують і уже подолали завчасно встановлені мінні поля [6]. Інше можливе тактичне застосування дистанційного мінування – встановлення мін у безпосередній близькості від підрозділів, що відходять, щоб ускладнити маневр і полегшити знищення техніки та живої сили. Масштабне використання дистанційного мінування та використання сучасних типів мін, обладнаних механізмами проти вилучення, є важливим фактором для тактичного планування та успішного ведення бою. Відповідно, з огляду на перебіг російсько-Української війни, пророблення проходів у загородженнях за допомогою різних засобів є актуальним і доволі затребуваним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Значна кількість досліджень з інженерної підтримки присвячена питанням підвищення живучості та мобільності підрозділів [1, 6-8, 10-13, 20]. Пошук варіантів подолання інженерних загороджень, особливо за обмеженості ресурсів, спонукає до напрацювання альтернативних (резервних) способів пророблення проходів без необхідності використання спеціального інженерного обладнання. Зокрема, засобам інженерного захисту озброєння та військової техніки від ураження інженерними кумулятивними зарядами КЗ-6 направленої дії присвячено дослідження у роботі [1], а технічні рішення, розробки сучасних засобів, використання вогню артилерії для подолання мінно-вибухових загороджень з відповідним ступенем живучості, надійності та ефективності розглянуто у працях [6, 12, 20].

Для очищення територій, забруднених вибухонебезпечними предметами, пророблення проходів в мінних полях авторами [7, 10] розглядаються різні варіанти пошуку мін: від наземних, так і за допомогою різного типу датчиків, встановлених на безпілотних літальних апаратах. Фактор середовища занурення мінно-вибухових засобів (наприклад, різний склад і вологість ґрунтів, прісна чи морська вода, рослинність, сніг, лід, будівельні матеріали тощо) впливає на функціонування засобів розмінування, особливо дистанційно керованих [8].

Моделювання процесів вибуху, розрахунок термодинамічних параметрів вибухових речовин (ВР) та їхніх сумішей є предметом дослідження багатьох науковців [4, 11, 13, 15, 19], що вказує на перспективність використання вибухового способу для пророблення проходів у мінних полях. Так, методом спільного моделювання FEM-FVM [13] було

оцінено вплив ефектів вибуху термобаричних боеприпасів на технічні пристрої, наприклад, турбогвинтовий двигун, а чисельним моделюванням за допомогою програмного забезпечення FLUENT розраховано параметри термодинамічного вибуху в закритому приміщенні [15].

Очевидно, що подолання інженерних загороджень є однією з важливих проблем сучасних військових конфліктів. Ризики, пов'язані з проробленням проходів у загородженнях, є доволі великими, тому використання різних способів і засобів для розмінування і пророблення проходів, особливо в добре підготовленому захисті з високою щільністю мінних полів, пошук більш ефективних вибухових речовин, що можуть бути використані для спорядження засобів пророблення проходів, залишається актуальним і вимагає подальших досліджень.

Формування мети статті

Мета дослідження – обґрунтування доцільності використання термобаричних сумішей (вибухових речовин) для пророблення проходів у мінно-вибухових загородженнях.

Виклад основного матеріалу

Подолання мінно-вибухових загороджень підрозділами відповідно до [5] виконується:

- самостійно з використанням різних технічних засобів (мінних тралів, комплектів розмінування, навісного бульдозерного обладнання тощо);
- по завчасно пророблених проходах;
- в обхід загороджень;
- десантуванням (перекидання військ повітрям).

Вибір способу подолання загороджень залежить від оперативної-тактичної обстановки, даних розвідки, наявності сил і засобів для пророблення проходів, часу та визначається на підставі рішення загально-військового командира на бій [8]. Також потрібно враховувати характер загороджень та умови місцевості.

На лінії зіткнення дієвим способом подолання мінно-вибухових загороджень є завчасно пророблені проходи інженерно-саперними підрозділами. На сьогодні, під час бойових дій, Збройні сили України успішно використовують американські установки дистанційного розмінування M58 MICLIC з довжиною лінійного вибухового заряду до 100 м, що запускаються ракетою в потрібному напрямку замінованої ділянки [3, 23].

Загалом пророблення проходів у безпосередній близькості від власних військ виконуються переважно механічними, ручними, вибуховими засобами розмінування або їхнім комбінуванням [5, 12]. Серед них зручним, швидким та ефективним є вибуховий спосіб, що базується на створенні надлишкового

тиску при підриві вибухових речовин (ВР) у місці встановлення міни. На даний час для пророблення проходів в основному використовують подовжені заряди розмінування, основою яких є ВР [3, 17, 22, 23]. Кількість і тип ВР у подовженому заряді має забезпечити спрацювання міни на певній відстані від його підриву. Стійкість мін до певної величини надлишкового тиску та убезпечення їх від масового спрацювання випадкових вибухів різних снарядів залежить безпосередньо від вибухової стійкості датчиків цілі (табл. 1, 2, 3) [17].

Для мінування в умовах російсько-Української війни широко використовують протитанкові міни серії ТМ-62, що споряджаються підривниками натискної дії. Відповідно до характеристик, наведених у табл. 1, підривники натискної дії спрацьовують при навантаженні силою від 1200 Н до 6500 Н, мають невелику активну площу (від 0,0122 м² до 0,0165 м²) і хід спрацьовування підривників (від 2 мм до 20 мм).

Таблиця 1

Характеристика окремих підривників натискної дії для протитанкових мін, що використовують зс рф

Характеристики	Марка (тип) підривника			
	МВ-62	МВЧ-62, МВЗ-62	МВП-62 (62М)	МВД - 62
Корпус матеріал d×h, мм	М 125×70	М, П 145×90	М, П 125×90	М, П 137×85
Маса, кг	0,24	0,9	0,45	0,4
Маса детонатора, г	-	10	5,7	4
Умови спрацювання:				
Підсилення, Н	1750 ÷ 6500	1500 ÷ 5500	1500 ÷ 6000	800 ÷ 2000
хід, мм	10÷20	8÷20	2÷4	2,2÷3,6

Примітка: М – металічний; П – пластиковий

Таблиця 2

Основні характеристики окремих зарядів розмінування, що використовуються Збройними Силами України

Заряди	Характеристики				
	Маса ВР, кг	Довжина заряду, м	Тип ВР	Витрата ВР, кг/м	Відстань подачі, м
УЗП-77	1200	93	ПВВ-7	4	200, 500
УЗП-83	1380	114	ПВВ-7	4	440
ЗРП-2	34	60	А-ІХ-1	1	140 ÷ 160
МІСЛІС	2300	107	С-4	7,38	107+75
М-59	1360	107	С-4	7,38	107+75
DM-11	15	80	ТЕН	0,125	20+80
ЛЗА1	2140	230	РЕ6/АЛ	5,91	350

Таблиця 3

Основні характеристики бризантних вибухових речовин, що використовуються у подовжених зарядах розмінування

ВР	Формула / склад	ρ , кг/м ³	D, м/с	Q _в , МДж
ППВ-7	Гексоген, Al (пор.), інертний згущувач	1520	6500	6,3
А-ІХ-1	Флегматизований гексоген	1680	8450	5,2
С-4	Гексоген, пластифікатор, полімерний згущувач, олива	1640	8050	5,9-6,7
ТЕН	C ₅ H ₈ (ONO ₂) ₄	1600	7900	5,7

Примітка: ρ – щільність вибухової речовини або суміші; D – швидкість детонації; Q_в – теплота вибуху

Означені характеристики вказують на високу вибухостійкість підривників.

Водночас характеристики подовжених зарядів, що використовуються у штатних засобах розмінування (табл. 2), є приблизно однаковими і забезпечують спрацьовування мін у смузі шириною до 6 м. Довжина смуги залежить від довжини самого подовженого заряду та можливості його подачі на цю відстань. Однак у протраленій вибуховим способом смугі ще можуть залишатися мінно-вибухові засоби, які не спрацювали, але повністю справні і готові до підриву. Тому зазначені подовжені заряди не забезпечать більшої ширини для пророблення проходу і не відповідають критерію “якість – витрата ВР”.

Стандартні фугасно-уламкові снаряди мають переважно осколкову (значна кількість уламків розсіюється після вибуху) та руйнівну (через тиск вибуху) дії на ціль, що дозволяє використовувати їх для знешкодження мін і створення проходів у мінних полях за допомогою артилерії [20]. Артилерійські боєприпаси середнього калібру (152 мм та 155 мм) мають потенціал для створення проходів через більшу кількість вибухового заряду всередині снаряда та енергію хвилі тиску, що виникає під час вибуху і підвищує здатність ураження цілі (міни).

Підрип об’ємно-детонуючих боєприпасів утворює великі за розмірами хмари аерозолі і забезпечує дію ударної хвилі на значній відстані, що також дозволяє розглядати їх як засоби для пророблення проходів у мінних полях. Вибухові речовини, що входять до складу об’ємно-детонуючих боєприпасів першого та другого покоління (наприклад, оксиди етилену та пропілену, суміші вуглеводнів пропіну, пропадієну і пропану тощо), вказують на вищу ефективність відносно традиційних ВР. Так, підрип хмари, утвореної з 30 л етилен оксиду радіусом 8,5 м і висотою до 3 м, ініційованої зарядом із затримкою

≈125 мс, утворює детонаційну хвилю з тиском на межі хмари – 2100 кПа, а щоб отримати ударну хвилю з подібною амплітудою тиску на відстані 8 м, потрібно підірвати майже 250 кг тротилу. Водночас використання об'ємно-детонуючих боєприпасів для пророблення проходів, порівняно з боєприпасами, спорядженими конденсованими ВР, є обмеженим через:

- утрудненість доставки до цілі масогабаритних розмірів ВР (не менше 25-30 кг);
- складність схеми підризу;
- залежність від метеоумов.

Ці недоліки можливо усунути шляхом використання технологій, направлених на добування рівномірної хмари пально-повітряної суміші і симетричного її підризу.

Поряд з об'ємно-детонуючими сумішами вагоме місце займають термобаричні ВР та суміші [9, 17] та створені на їхній основі термобаричні боєприпаси (ТББ). Ударні хвилі, що утворюються від вибуху ТББ, потребують менше часу для формування та мають набагато більшу тривалість, ніж хвилі, що створені бризантними ВР, а самі боєприпаси не мають обмежень за критичною масою ВР [9, 15, 22]. Особливість ТББ – мала чутливість до механічного впливу та атмосферних явищ (наприклад, дії вітру, дощу, снігу) та відносна безпечність у використанні.

Загалом в останні десятиліття спостерігається підвищений інтерес до вибухових речовин і сумішей, що характеризуються підвищеною вибуховою продуктивністю, зокрема високою енергією вибуху та щільністю [4]. Крім того, синтез термобаричних ВР і сумішей дозволяє регулювати термодинамічні характеристики, а їхнє виробництво є дешевшим. Актуальними є термобаричні суміші, що у своєму складі не містять розривного заряду, а роль пального виконує високий вміст металу (магнію, алюмінію, бору) [4, 11, 13, 15, 16, 18, 19, 21, 22]. Ударні хвилі бризантних ВР локалізовані, короточасні (швидкозгасаючі), а високий піковий тиск зменшується в рази при віддаленні від центру вибуху [4, 22], тоді як при підриві термобаричних ВР дія ударних хвиль є довшою, тривалішою, надлишковий тиск, що виникає при цьому, – вищим, а радіус ураження – більшим.

Підризу заряду розмінування на певній висоті матиме більший ефект для спрацювання міни, зокрема датчика цілі натискної дії, оскільки робоча площа самого датчика цілі порівняно з просторовою зоною стискання ударної хвилі є малою, а дія тиску вибуху – рівномірно розподіленою (рис. 1).

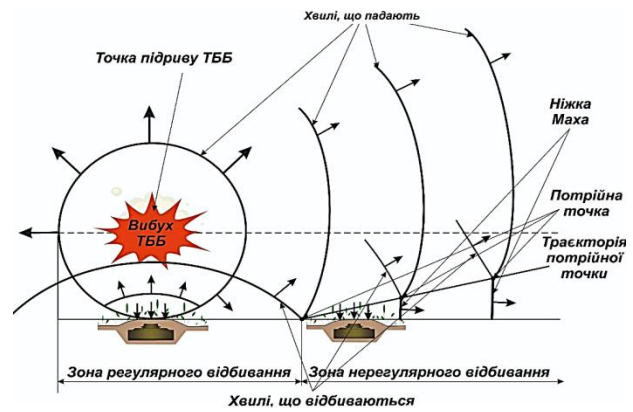


Рис. 1. Утворення і поширення ударної хвилі при вибуху ТББ у повітрі

Очевидно, що для знешкодження мінно-вибухового загородження важливим показником є тиск, що утворюється при підриві ТББ і зможе ініціювати підризу міни або пошкодити (нейтралізувати) її так, що в подальшому вона не зможе детонувати [4, 11, 19].

Для розрахунку надлишкового тиску (ΔP), що утворюється при вибуху ТББ у повітрі, використовують вирази, що базуються на дослідженнях Садовського та Покровського, [4, 16, 18]

$$\Delta P = 686,7 \frac{m_t}{R_s} + 264,9 \frac{m_t^{2/3}}{R_s} + 82,4 \frac{m_t^{1/3}}{R_s} \quad (1)$$

$$m_t = h \times m_{BP} \times K \times K_1$$

$$R_s = R + R_1 \times K_2$$

де m_t – маса приведеної вибухової речовини, що залежить від:

- вихідної маси ВР (m_{BP}), кг;
- тротилового коефіцієнту ВР (K);
- коефіцієнта заповнення боєприпасу ВР (K_1);
- коефіцієнта, що визначає вплив характеристик ґрунту (склад, вологість, температура, щільність) на поширення ударної хвилі (h);

R_s – область поширення вибухової хвилі, яка враховує:

- відстань від точки вимірювання до місця формування ударної хвилі (R), м;
- радіус ділянки високої температури, утвореної після вибуху (R_1) м;
- коефіцієнт втрати енергії на утворення хмари вибуху, що залежить від властивостей ТВР (K_2).

Навантаження, що створюється при підриві ТББ і діє на міну, залежить від співвідношення тривалості фази стискання в ударній хвилі (τ^+) на період і час деформації датчика цілі (T_{def}) [13, 16]. Якщо тривалість фази стискання буде значною і перевищуватиме час деформації датчика цілі, то міна спрацює

$$\tau^+ \geq T_{def}.$$

Ця властивість дозволяє використовувати ТББ для знешкодження мін із підриивниками натискної дії.

Тривалість стискання можна приблизно розрахувати за допомогою емпіричної формули

$$\tau^+ \cong 1,5 \times 10^{-3} \times \sqrt[6]{m} \times \sqrt{r}$$

де m – маса вибухової речовини у тротиловому еквіваленті, кг;

r – відстань від центру вибуху до точки вимірювання, м.

Розраховані значення тривалості фази стискання при вибуху окремих конденсованих і термобаричних вибухових речовин на відстані до 5 м наведено у табл. 4. Як видно з отриманих даних, час фази стискання для термобаричних речовин більший майже на 10 %, ніж для конденсованих ВР.

Крім тривалості фази стискання ударної хвилі важливою розрахунковою характеристикою є питомий імпульс фази стискання ударної хвилі (I), а для міни – питомий імпульс спрацювання датчика цілі ($I_{спрац}$). Приймається, що на межі зони ударної хвилі питомий імпульс від вибуху дорівнює питомому імпульсу спрацювання датчика цілі.

Таблиця 4

Тривалість фази стискання при вибуху деяких конденсованих та термобаричних вибухових речовин і сумішей на відстані до 5 м

Вибухові речовини	Тротиловий еквівалент	Тривалість стискання τ^+
Конденсовані		
Тетрил	1,25	0,00349
Гексоген	1,6	0,00360
Октоген	1,7	0,00367
Термобаричні		
Суміш 1	2,3	0,00386
Суміш 2	2,4 -2,8	0,00388÷0,00398
HAS-4 EB [22]	2,9	0,004

Примітка. Суміш 1 на основі октогену, етилітрату, алюмінію, полібутадієнового каучуку; суміш 2 на основі гексогену, ізопропілітрату та воску [2, 19, 20]

Якщо тривалість фази стискання $\tau^+ \leq 0,27 \times T_{def}$ то навантаження можна вважати імпульсним, а умовою руйнування цілі (наприклад, міни) буде критерій, що визначатиметься питомим імпульсом надлишкового тиску I (Па×с) фази стискання ударної хвилі на відстані r (м) від центру вибуху [13, 16, 17]

$$I = 0,058 \sqrt{p_0 \times \rho_0} \times \sqrt[3]{\frac{E_w}{p_0}} \times \sqrt[3]{\frac{E_w}{p_0} \times \frac{p_0}{r}} \times \cos^4 \alpha \quad (2)$$

$$E_w = \eta \times \xi \times E_0; \quad E_0 = m_{BP} \times Q_{згор};$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{1 + B^2 / A^2}$$

де p_0 – атмосферний тиск;

ρ_0 – густина повітря за відповідних атмосферних умов;

r – відстань від центру вибуху, на якому спостерігається імпульс, м;

E_w – енергія ударної хвилі, кДж;

E_0 – повна енергія, що виділяється під час реакції усієї маси термобаричної вибухової речовини або суміші, кДж;

η – коефіцієнт корисної дії вибуху для ТББ (0,41- 0,44);

ξ – коефіцієнт повноти реакції під час вибуху термобаричної (від 0,02 до 0,25);

m_{BP} – маса термобаричної вибухової речовини або суміші, кг;

$Q_{згор}$ – питома теплота згорання вибухової речовини або суміші, кДж/кг;

α – кут між нормаллю до поверхні землі у даній точці і радіусом, проведеним з центру заряду у цю точку (рис. 2);

A – висота підриву, м;

B – відстань між проекцією точки вибуху ТББ на поверхню землі та центром міни, м.

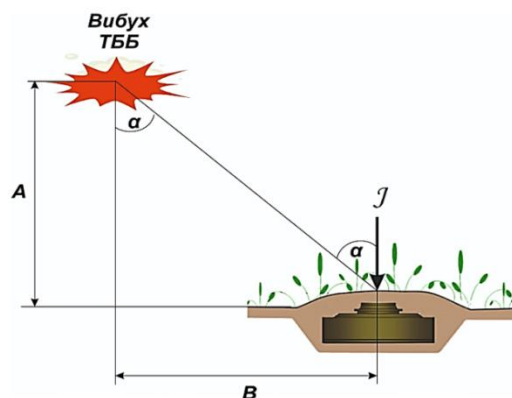


Рис. 2. Дія вибуху ТББ на протитанкову міну

Імпульс спрацювання датчика цілі натискної дії для мін ($I_{спрац}$) розраховують за допомогою формули:

$$I_{спрац} = \sqrt{\frac{2 \times \left(\frac{m_p}{S} + h_g \times \rho_g \right) \times \Psi \times P_m \times Z_{cp}}{S}} \quad (3)$$

де Ψ – коефіцієнт повноти епюри;

P_m – тиск спрацювання підриивників;

Z_{cp} – хід спрацювання підриивників до міни;

S – площа ґрунту під підриивником міни;

m_p – маса рухомої частини підриивника;

h_g – товщина шару ґрунту, що маскує міну;

ρ_g – щільність ґрунту.

Отже, для того, щоб оцінити ефективність (доцільність) використання термобаричних вибухових речовин або сумішей для ініціювання підриву/нейтралізації міни, необхідно розрахувати термодинамічні параметри вибухової хвилі, зокрема надлишковий тиск (ΔP) та питомий імпульс надлишкового тиску (I), та порівняти їх з імпульсом спрацювання датчика цілі ($I_{спрац}$). Відповідні параметри було розраховано за допомогою MATLAB для термобаричної твердої суміші, що складається з октогену (45 %), суміші порошку алюмінію (21 %) і магнію (9 %), амоній перхлорату (10 %) та пластифікатора, наприклад, полібутадієну чи фторполімеру (15 %). Такі пропорції між ВР, паливом, згущувачем та пластифікатором є оптимальними для отримання задовільних термодинамічних показників та ефектів вибуху [16, 18, 19]. Крім того, такі композитні суміші мають високу вільну від'ємну енергію Гіббса, помірний тиск детонації та посилений імпульс дії вибуху.

Для розрахунків було прийнято: щільність суміші становить $1,702 \text{ г/см}^3$, швидкість детонації – 7154 м/с , форма заряду – циліндрична, висота підриву – 2 м , маса вибухової суміші – $0,43 \text{ кг}$, $1,1 \text{ кг}$, $2,2 \text{ кг}$ і $4,4 \text{ кг}$. Результати обчислень надлишкового тиску вибухової хвилі (рис. 3) та питомого імпульсу тиску (рис. 4) залежно від маси вибухової суміші розраховані за формулами (1) і (2).

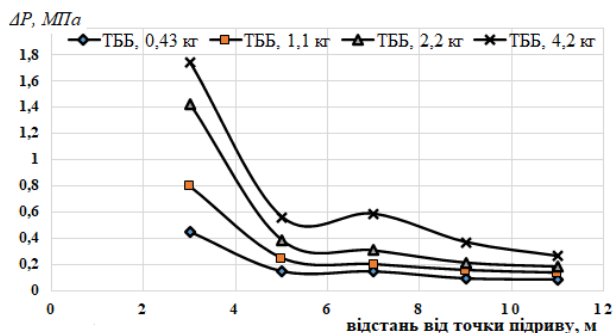


Рис. 3. Залежність надлишкового тиску від відстані і точки підриву ТББ різної маси

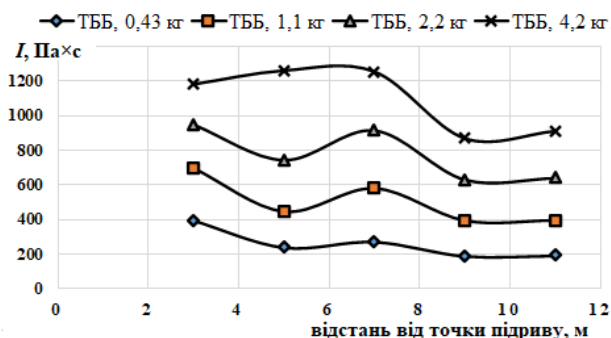


Рис. 4. Величина питомого імпульсу тиску на фіксованих відстанях від точки підриву ТББ різної маси

Розрахунки показують, що ураження від термобаричної суміші відбувається переважно поблизу джерела вибуху: надлишковий тиск зростає зі збільшенням маси ВР і зменшується на відстані від 3 м до 5 м від епіцентру вибуху майже на 70% . Водночас, питомий імпульс тиску на відстані до 11 м зменшується лише вдвічі. Ударна хвиля, відбита від поверхні землі, має більшу швидкість поширення у повітрі, нагрітому ударною хвилею, що падає. У певний момент відбита і падаючі ударні хвилі “зустрічаються” (складаються), що призводить до збільшення тиску, величини імпульсу тиску та фази стиснення на поверхню землі (рис. 1). При збільшенні маси вибухової суміші прогнозовано зростає надлишковий тиск, питомий імпульс, термодинамічні характеристики та зона ураження. Залежність надлишкового тиску та питомого імпульсу тиску від відстані описується поліноміальною лінією тренду 4 ступеня, що вказує на складні процеси, які відбуваються під час вибуху.

Отримані параметри дозволяють оцінити спроможність термобаричної суміші привести у дію датчики цілі мін. Оскільки, як уже зазначалось, основу мінних полів, встановлених підрозділами (частинами) зс рф, складають протитанкові міни ТМ-62 з датчиками цілі натискної дії, то для окремих підривників (табл. 1) було розраховано імпульс спрацювання датчика цілі за формулою (3) (для підривників міни ТМ-62 коефіцієнт повноти епюри знаходиться в межах від $0,55$ до $0,7$, тиск спрацювання – $1500 \div 6500 \text{ Н}$, хід спрацювання – $2 \div 20 \text{ мм}$) (табл. 5).

Таблиця 5

Імпульс спрацювання підривників натискної дії, що встановлюються на міни ТМ-62

Марка	Імпульс спрацювання підривника, Па·с
МВ-62	913
МВЧ-62	665
МВП-62М	514,8
МВП-62	514,5
МВД-62	98

Значення імпульсу спрацювання підривників натискної дії, якими комплектуються міни ТМ-62, отримані при розрахунках, дозволяють зробити висновки, що досліджувана термобарична суміш масою від 2 кг і більше спроможна проробити прохід у мінному полі шириною до 18 м (радіус дії вибухової хвилі – до 9 м).

В Україні ведуться дослідження над розробленням термобаричних сумішей для спорядження різних боєприпасів з тротиліним еквівалентом 3 і вище [2], що дозволить, залежно від маси спорядження не лише уражати живу силу противника, окремі зразки техніки та озброєння, але й використовувати для вибухового способу пророблення проходів у мінних полях у подовжених зарядах розмінування.

Висновки

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки:

- проаналізовано термодинамічні параметри продуктів вибухового перетворення термобаричних та фугасних боеприпасів. Визначено, що важливими термодинамічними параметрами вибуху є надлишковий тиск та питомий імпульс тиску. Термобаричні вибухові суміші порівняно зі звичайними конденсованими вибуховими речовинами характеризуються більшою тривалістю ударних хвиль, що виникають при детонації, надлишковим тиском і питомим імпульсом надлишкового тиску;

- оцінено достатність надлишкового тиску та імпульсу, що виникають при підриві термобаричної вибухової суміші, що складається з октогену (пентрилу), металічного пального (наприклад, магнієво-алюмінієвого порошку, амоній перхлорату та полібутадієну для спрацювання підричників (основних датчиків цілі) натискної дії протитанкової міни ТМ-62. Отримані значення імпульсу спрацювання підричників натискної дії дозволяють зробити висновки, що досліджувана термобарична суміш, споряджена у ТББ масою від 2 кг і більше, спроможна привести у дію протитанкові міни з підривниками натискної дії на ділянці радіусом до 9 м і може застосовуватись для спорядження зарядів розмінування.

Основний напрям наступних досліджень необхідно спрямувати на проведення розрахунків та натурних випробувань з визначення оптимальної висоти підриву термобаричного боеприпасу, його конфігурації та маси, що збільшить ефективність дії ударної хвилі вибуху.

Список літератури

1. Білик А.С., Кашуба Я.М. Фактори загроз від БПЛА противника типу "Ланцет" та засоби інженерного захисту від них, у тому числі із використанням предетонаційних екранів. *Військово-технічний збірник*. 2024. 31. С.71–82. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.31.2024.71-82>
2. В Україні розробили нові ручні гранати (перші фото). *Defense Express*. 24 червня 2020. https://defence-ua.com/news/ukrajina_rozpochala_rozrobku_novih_ruchnih_garanat_pershii_foto-1053.html
3. Збірник матеріалів вивчення бойового досвіду російсько-української війни 2022 року. 2022. Вип. № 4. 256 с.
4. Каплук О., Нікітченко В., Кірдей Л., Терновський А., Брайко В. Щодо визначення основних термодинамічних параметрів вибуху термобаричного боеприпасу. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2022. 11(1). С. 55–65. DOI: [10.37701/dndivsovt.11.2022.07](https://doi.org/10.37701/dndivsovt.11.2022.07).
5. Керівництво з подолання інженерних загороджень підрозділами Збройних Сил України: Наказ Генерального штабу Збройних Сил України від 19.10.2016 № 390. Київ : ГШ ЗСУ, 2016. 111 с

6. Коршок В.М., Білоус І.І., Марко В.П., Голобородько С.Б. Обґрунтування технічних рішень щодо засобів для пророблення проходів у мінних полях дистанційним способом. *Наука і оборона*. 2023. № 3. DOI: <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2023-22-3-33-37>

7. Кривцун В.І., Коцюрба В.І., Ляшенко В.А. Методика вибору комплексу електромагнітних методів пошуку та виявлення вибухонебезпечних предметів для структурного синтезу пошукового пристрою. *Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОБТ*. 2024. Вип. 2(20). С. 47–54. DOI: [10.37701/dndivsovt.20.2024.06](https://doi.org/10.37701/dndivsovt.20.2024.06)

8. Кривцун В.І., Ляшенко В.Ф., Кузнецов В.О. Аналіз факторів, які впливають на процес розмінування забрудненої території вибухонебезпечними предметами. *Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОБТ*. 2022. Вип. 4 (14). С. 69–77. DOI: [10.37701/dndivsovt.14.2022.08](https://doi.org/10.37701/dndivsovt.14.2022.08)

9. Ларіонов В.В., Хомяк К.М., Казмірчук Р.В., Івахів О.С., Платонов М.О., Стаднічук О.М. Аналіз розвитку та основні тенденції застосування термобаричних боеприпасів. *Військово-технічний збірник*, 2016 (15), С. 28–31. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.15.2016.28-31>

10. Мартинюк І., Шматов Є., Погребняк Т., Каршень А., Стаднічук О., Лаврененко О. Хімічні сенсори на безпілотних літальних апаратах: перспективний напрямок пошуку мінно-вибухових пристроїв. *Військово-технічний збірник*. № 29. С. 102–110. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.29.2023.102-110>

11. Телевний І.В., Нікітченко В.І., Клюфас С.І., Дмитрієв А.Г. Особливості дослідження боеприпасів з термобаричними вибуховими речовинами. *Системи озброєння і військова техніка (Systems of arms and military equipment)*. 2020. Вип. № 1 (61). С. 145–151. DOI: [10.30748/soivt.2020.61.17](https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.17)

12. Харун О. Дослідження методів подолання мінно-вибухових загороджень бойовими підрозділами Державної прикордонної служби України за обмежених ресурсів. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія військові та технічні науки*. 2023. №4 (93). С.149–157

13. Baigang M., Xuan B. A novel FEM-FVM coupled method of evaluating the explosion shock wave of a thermobaric bomb on the internal and external flow characteristics of aircraft. *Aerospace Science and Technology*. 2022. Volume 126, 107558. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107558>

14. Collier A. Detonating the air: The legality of the use of thermobaric weapons under international humanitarian law. *International Review of the Red Cross*. 2023. 105 (923), 1125–1151. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1816383123000115>

15. Chen F., Mao J., Zhou J., Hou P., Liu L., Chen S. Thermal Environment inside a Tunnel after Thermobaric Explosion. *Shock and Vibration*. 2017. 5427485, 11 pages. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5427485>

16. Elioff M.S., Hoy J., Bumpus J.A. Calculating Heat of Formation Values of Energetic Compounds: A Comparative Study. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Physical Chemistry*. 2016. 11 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5082084>

17. Explosive Ordnance Guide for Ukraine, GICHD, 2022. 224 p. https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Publications/GICHD_Ukraine_Guide_2022_Second_Edition_web.pdf

18. Gryś S., Trzciński W. A. Calculation of Combustion, Explosion and Detonation Characteristics of Energetic Materials. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2010. 7(2). 97–113.

19. Simić D., Andjelić U., Knežević D., Savić K., Draganić V., Sirovatka R., Tomić L. Thermobaric Effects of Cast Composite Explosives of Different Charge Masses and Dimensions. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2016. 13(1). 161–182. DOI:10.22211/cejem/64970

20. Švehlík M., Šustr M., Potužák L., Varecha J., Drábek J. Creating of Minefield Breaches with Artillery. In *Proceedings of the 20th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2023)*. 2023 Volume 1, p. 266–272. DOI: 10.5220/0012208500003543

21. Thermobaric explosive mixture. SK500072017A3. Priority to SK50007-2017A. 2018-09-03 8 p.

22. Türker L. Thermobaric and enhanced blast explosives (TBX and EBX). *Defence Technology*. 2016. 12. P. 423–445. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dt.2016.09.002>

23. Wadling J., Reynolds N. Stormbreak: Fighting Through Russian Defences in Ukraine's 2023 Offensive. RUSI. 2023. 28 p. URL: <https://www.rusi.org>

Reference

1. Bilyk A.S. and Kashuba Ya.M. (2024), "Fakty zahroz vid BPLA protyvyntky typu "Lantset" ta zasoby inzhenerneho zahystu vid nykh, u tomu chysli iz vykorystanniam predetonatsiinykh ekraniv" [Threat factors from enemy UAVs of the "Lancet" type and means of engineering protection against them, including the use of predetonation screens]. *Military Technical Collection*. Lviv, 2024. Issue 31. pp. 71–82. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.31.2024.71-82> [in Ukrainian].

2. (2020), "V Ukraini rozrobyly novi ruchni hranaty (pershi foto)" [New hand grenades have been developed in Ukraine (first photos)]. *Defense Express*. https://defence-ua.com/news/ukrajina_rozpochala_rozrobku_novih_ruchnih_granat_pershi_foto-1053.html [in Ukrainian].

3. (2022), "Zbirnyk materialiv vyvchennia boiovoho dosvidu rosiisko-ukrainskoi viiny 2022 roku" [Collection of materials for studying the combat experience of the Russian-Ukrainian war of 2022]. Issue № 4. 256 p [in Ukrainian].

4. Kapliuk O., Nikitchenko V., Kirdei L., Ternovskiy A. and Braiko V. (2022), "Shchodo vyznachennia osnovnykh termodynamichnykh parametrov vybukhu termobarychnoho boieprypasu" [Regarding the determination of the main thermodynamic parameters of the explosion of a thermobaric munition]. *Editor of scientific works of the State Research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment*. Issue 11(1). pp. 55–65. doi: 10.37701/dndivsovt.11.2022.07. [in Ukrainian].

5. (2016), "Kerivnytstvo z podolannia inzhenernykh zahorodzen pidrozdilamy Zbroinykh Syl Ukrainy": nakaz Heneralnogo shtabu Zbroinykh Syl Ukrainy vid 19.10.2016 № 390. [Guidance on overcoming engineering obstacles by units of the Armed Forces of Ukraine]: the Order of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv: HSh ZSU. 111 p. [in Ukrainian].

6. Korshok V.M., Bilous I.I., Marko V.P. and Holoborodko S.B. (2023), "Obgruntuvannia tekhnichnykh rishen shchodo zasobiv dlia proroblennia prokhodiv u minnykh poliakh

dystantsiynym sposobom" [Substantiation of technical solutions regarding means for making passages in minefields remotely]. *Science and defense*. Issue № 3. DOI: <https://doi.org/10.33099/2618-1614-2023-22-3-33-37>. [in Ukrainian].

7. Kryvtun V.I., Kotsiuruba V.I. and Liashenko V.A. (2024), "Metodyka vyboru kompleksu elektromagnetnykh metodiv poshuku ta vyavlenia vybukhonebezpechnykh predmetiv dlia strukturnoho syntezy poshukovoho prystroiu" [Methodology for selecting a set of electromagnetic methods for searching and detecting explosive objects for the structural synthesis of a search device]. *Collection of scientific works of the National Research Institute of the Armed Forces of the USSR*. Issue. 2 (20). pp. 47–54 DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.20.2024.06> [in Ukrainian].

8. Kryvtun V.I., Liashenko V.F. and Kuznetsov V.O. (2022), "Analiz faktoriv, yaki vplyvaiut na protses rozminuvannia zabrudnenoj terytorii vybukhonebezpechnykh predmetamy" [Analysis of factors that influence the process of demining an area contaminated with explosive objects]. *Collection of scientific works of the National Research Institute of the Armed Forces of the USSR*. 2022. Issue 4 (14). pp. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.14.2022.08>. [in Ukrainian].

9. Larionov V.V., Khomiak K.M., Kazmirchuk R.V., Ivakhiv O.S., Platonov M.O. and Stadnichuk O.M. (2016), "Analiz rozvytku ta osnovni tendentsii zastosuvannia termobarychnykh boieprypasiv" [Analysis of the development and main trends in the use of thermobaric ammunition]. *Military Technical Collection*. Lviv, 2016. Issue (15). pp. 28–31. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.15.2016.28-31>. [in Ukrainian].

10. Martyniuk I., Shmatov Ye., Pohrebniak T., Karshen A., Stadnichuk O. and Lavrenenko O. (2023), "Khimichni sensory na bezpilotnykh litalnykh aparatakh: perspektivnyi napriamok poshuku minno-vybukhovyykh prystroiv" [Chemical sensors on unmanned aerial vehicles: a promising direction for the search for mines and explosive devices]. *Military Technical Collection*. Lviv, 2023. Issue (29). pp. 102–110. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.29.2023.102-110>. [in Ukrainian].

11. Televnyi I.V., Nikitchenko V.I., Kliufas S.I. and Dmytriiev A.H. (2020), "Osoblyvosti doslidzhennia boieprypasiv z termobarychnykh vybukhovymy rehovynamy" [Features of research into ammunition with thermobaric explosives] *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika (Systems of arms and military equipment)*. 2020. Issue. № 1 (61). pp. 145–151. DOI: 10.30748/soivt.2020.61.17 [in Ukrainian].

12. Kharun O. (2023), "Doslidzhennia metodiv podolannia minno-vybukhovyykh zahorodzen boiovymy pidrozdilamy Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy za обмеzhenykh resursiv" [Research into methods of overcoming mine and explosive obstacles by combat units of the State Border Service of Ukraine with limited resources]. *Collection of scientific papers of the National Academy of the State Border Service of Ukraine. Series Military and Technical Sciences*. 2023. Issue 4 (93). pp. 149–157. [in Ukrainian].

13. Baigang M. and Xuan B. (2022), A novel FEM-FVM coupled method of evaluating the explosion shock wave of a thermobaric bomb on the internal and external flow characteristics of aircraft. *Aerospace Science and Technology*. p. 126, 107558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107558>

14. Collier A. (2023), Detonating the air: The legality of the use of thermobaric weapons under international humanitarian

law. *International Review of the Red Cross*. 105 (923), pp. 1125–1151. DOI: 10.1017/S1816383123000115

15. Chen F., Mao J., Zhou J., Hou P., Liu L., Chen S. (2017), Thermal Environment inside a Tunnel after Thermobaric Explosion. *Shock and Vibration*. 5427485, 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/5427485>. [in English].

16. Elloff M.S., Hoy J. and Bumpus J.A. (2016), Calculating Heat of Formation Values of Energetic Compounds: A Comparative Study. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Physical Chemistry*. 11 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5082084>. [in English].

17. Explosive Ordnance Guide for Ukraine, GICHD, (2022), 224 p. https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Publications/GICHD_Ukraine_Guide_2022_Second_Edition_web.pdf. [in English].

18. Grys S. and Trzciński W. A. (2010), Calculation of Combustion, Explosion and Detonation Characteristics of Energetic Materials. *Central European Journal of Energetic Materials*. 7(2). pp. 97–113. [in English].

19. Simić D., Andjelić U., Knežević D., Savić K., Draganić V., Sirovatka R. and Tomić L. (2016), Thermobaric Effects of

Cast Composite Explosives of Different Charge Masses and Dimensions. *Central European Journal of Energetic Materials*. No 13 (1). pp. 161–182. DOI: 10.22211/cejem/64970. [in English].

20. Švehlík M., Šustr M., Potužák L., Varecha J. and Drábek J. (2023), Creating of Minefield Breaches with Artillery. In *Proceedings of the 20th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2023)*. 2023. Volume 1, pp. 266–272. DOI: 10.5220/0012208500003543. [in English].

21. Patent of Slovakia (2018), "Thermobaric explosive mixture". Patent SK500072017A3. Priority to SK50007-2017A. 2018-09-03 8 p. [in English].

22. Türker L. (2016), Thermobaric and enhanced blast explosives (TBX and EBX). *Defence Technology*. 12. p. 423–445. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dt.2016.09.002>

23. Watling J. and Reynolds N. Stormbreak (2023), Fighting Through Russian Defences in Ukraine's 2023 Offensive. RUSI. 28 p. URL: [https:// www.rusi.org](https://www.rusi.org).

THE POSSIBILITY OF USING THERMOBARIC AMMUNITION TO MAKE PASSAGES IN MINEFIELDS

Y. Shmatov, I. Martyniuk, O. Yemelianov, T. Pogrebnyak, A. Karshen, O. Stadnichuk

The large-scale use of remote mining and the use of modern types of mines equipped with anti-removal mechanisms is an important factor for tactical planning and successful operation. On the contact line, pre-designed passages by engineer units are an effective way to overcome minefields. The risks associated with making passages in the barriers are quite high, so the use of various methods and means for demining and making passages, especially in well-prepared defenses with a high density of minefields, the search for more effective explosives that can be used to equip the means of making passages, remains relevant and quite in demand. The aim of the study is to substantiate the feasibility of using thermobaric mixtures (explosives) for making passages in minefields. The thermodynamic parameters of the products of the explosive transformation of thermobaric and high explosive ammunition are analyzed. It is determined that the important thermodynamic parameters of the explosion are the overpressure and the specific pressure pulse. Thermobaric explosive mixtures, in comparison with conventional condensed explosives, are characterized by a longer duration of shock waves arising during detonation, overpressure, and specific overpressure impulse. The sufficiency of the overpressure and impulse arising from the detonation of a thermobaric explosive mixture consisting of octogen, metal propellant (magnesium-aluminum powder, ammonium perchlorate, and polybutadiene) for triggering the fuzes (main target sensors) of the TM-62 anti-tank mine was evaluated. The obtained values of the triggering pulse of the pressure fuzes allow us to conclude that the studied thermobaric mixture weighing 2 kg or more on the territory with a radius of up to 9 m is capable of activating the target sensors of the TM-62 anti-tank mine. The main focus of further research should be on calculations and field tests to determine the optimal height of the thermobaric munition, its mass and configuration to increase the effectiveness of the blast wave.

Keywords: minefields, overcoming engineering obstacles, thermobaric mixtures, demining charges, overpressure of explosion, specific pressure pulse.