

УДК 614.843

К.В. Коритченко<sup>1</sup>, О.В. Сакун<sup>1</sup>, Ю.В. Хілько<sup>2</sup>, І.В. Цебрюк<sup>3</sup>, І.О. Белоусов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «ХПИ», Харків

<sup>2</sup> Національний університет цивільного захисту України, Харків

<sup>3</sup> Національна академія Національної гвардії України, Харків

## ПАРАМЕТРИ ПОСТРІЛУ ГАЗОДЕТОНАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МЕТАННЯ

Обґрунтовано відмінність горючих газових систем метання на дефлаграційному та детонаційному згораннях. Визначено залежність початкової швидкості снаряду у газодетонаційній системі метання від початкового тиску продуктів детонації, ступеню їх розширення, геометричних розмірів камери та питомої маси снаряду.

**Ключові слова:** артилерійський боєприпас, газодетонаційна система метання.

### Вступ

**Постановка проблеми.** У зоні АТО має місце широкомасштабне застосування бронетанкового озброєння. Специфіка виконання бойових завдань пов'язана з веденням бойових дій у міських умовах. Це, в свою чергу, зумовлює необхідність встановлення на бронетехніку сучасних засобів вогневого ураження ближнього бою.

На цей час не створено пристроїв для метання артилерійських боєприпасів, котрі могли б повноцінно замінити артилерійське озброєння, у якому застосовуються порохові металні заряди. Разом з тим, існуючі недоліки порохових зарядів за своїми умовами експлуатації зумовлюють необхідність пошуку альтернативних джерел метання. Основні недоліки порохових зарядів пов'язані зі старінням, сильної температурної залежності, наявності складнощів у регулюванні енергії пострілу та забезпеченні ефективного гасіння пожежі.

Також, недоліками артилерійських систем, у яких використовуються боєприпаси на основі порохових зарядів, є наявність помітного спалаху на зрізі ствола під час пострілу та виділення у внутрішній простір зразків ОБГ значної кількості токсичних порохових газів під час перезаряджання боєприпасів після пострілу. Наявність водню та чадного газу у продуктах згорання призводить до їх догорання у зовнішньому середовищі після пострілу з виникненням явища спалаху. Зазначені гази зумовлюють токсичну дію на екіпажі.

Особливо небезпечним є отруєння чадним газом. Отруєнню сприяє те, що цей газ є безбарвним, немає запаху та смаку. Дихання повітрям з незначним вмістом чадного газу упродовж певного часу призводить до ушкодження головного мозку. В результаті отруєння спостерігається головний біль, сонливість, кволість, запаморочення, нудота і втрата свідомості, а при тяжкому ступені отруєння – слабкий пульс, кома та порушення дихання [1].

На відміну від порохових зарядів, в результаті згорання стехіометричних або збіднених газових горючих сумішей формування сильно небезпечних продуктів практично не відбувається.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В ряді робіт [1 – 3] запропоновано застосування металних систем, в яких застосовуються горючі газові заряди. В роботі [2] розроблено математичну модель, що дозволяє здійснити дослідження внутрішньо балістичних процесів у газодетонаційній системі метання. В роботі [3] здійснено числове дослідження впливу початкового тиску детонаційної газової суміші на параметри пострілу. Разом з тим, дослідження впливу інших параметрів пострілу не представлено.

**Метою роботи** є визначення залежності початкової швидкості снаряду у газодетонаційній системі метання від початкового тиску продуктів детонації, ступеню їх розширення, геометричних розмірів камери та питомої маси снаряду.

### Відмінність горючих газових систем метання на дефлаграційному та детонаційному згораннях

Відмінність газової детонаційної системи метання від газових систем метання, що працюють на дефлаграційному («повільному») згоранні, полягає у наступному. Рух снаряду виникає під дією тиску, що виникає у камері згорання. Але динаміка зростання тиску значною мірою визначається швидкістю виділення енергії згорання газового заряду. У артилерійських установках, що працюють на дефлаграційному згоранні, взаємозв'язок процесів, що забезпечують постріл, визначається послідовністю:

$$U_{\text{снр1}} \rightarrow (P_1, T_1) \rightarrow k(T) \rightarrow U_{\text{дефл}} \rightarrow (P_2, T_2) \rightarrow U_{\text{снр2}}, \quad (1)$$

де  $U_{\text{снр1}}$ ,  $U_{\text{снр2}}$  – швидкість снаряду на поточний та на наступний час, відповідно;  $P_1(T_1)$ ,  $P_2(T_2)$ , – тиск (температура) у камері гармати на поточний та на наступний час, відповідно;  $k(T)$  – середня поточна

константа швидкості хімічних реакцій;  $U_{\text{дефл}}$  – швидкість дефлаграційного згорання.

Під дією тиску снаряд починає рухатись зі швидкістю  $U_{\text{снр1}}$ . Рух снаряду у каналі ствола зумовлює зменшення поточних тиску  $P_1$  та температури  $T_1$  у камері гармати в результаті процесу розширення газового заряду. Це призводить до зменшення константи  $k(T)$  швидкості хімічних реакцій, яка за законом Арреніуса залежить від експоненти температури

$$k(T) = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right), \quad (2)$$

де  $A$  – стала;  $E_a$  – енергія активування хімічної реакції.

В результаті уповільнюється швидкість  $U_{\text{дефл}}$  згорання, тобто швидкість виділення хімічної енергії. Це, відповідно, уповільнює зростання тиску  $P_2$  та температури  $T_2$ . Зменшення зростання тиску уповільнює зростання швидкості  $U_{\text{снр2}}$  снаряду (рис. 1).

Таке згорання зумовлює поступове виділення енергії, що зменшує термодинамічне навантаження на канал ствола. Але це призводить також до зменшення роботи переміщення снаряду

$$A_{\text{снр}} = \int PdV, \quad (3)$$

та, відповідно, до зменшення швидкості снаряду на зрізі каналу ствола.

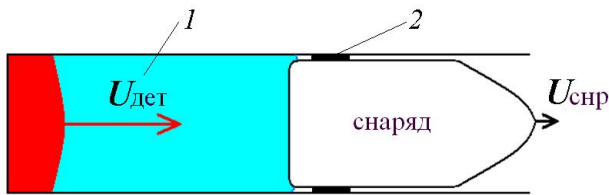


Рис. 1. Схема уцілювання газового заряду у гарматі [4]: 1 – горючий газовий заряд; 2 – уцілювач на снаряді

Залежність (1) дає відповідь на питання впливу якості обтюруючого пояса снаряду та зносу каналу ствола на швидкість снаряду. При низькій якості обтюруючого пояса виникає або підвищене тертя, або рух снаряду починається під час виникнення недостатньо високої температури у камері, з надмірно розтягнутим у часі процесом згорання. В обох випадках відбувається зменшення швидкості снаряду. Зниженню швидкості снаряду сприяє втрата заряду, що проривається в щелини між снарядом та стволом.

Особливість детонаційного згорання полягає у тому, що швидкість детонації залежить тільки від початкового термодинамічного стану та складу реагуючої газової горючої суміші [5]. Швидкість згорання газового заряду не залежить від поточної швидкості снаряду, тому що

$$U_{\text{дет}} \gg U_{\text{снр}}. \quad (4)$$

Цим досягається підвищення стабільності пострілу в більш широкому діапазоні зносу каналу ствола.

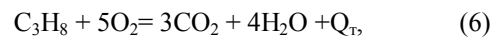
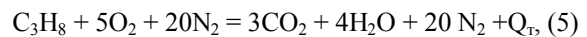
За газодетонаційним пострілом повний цикл включатиме такі операції:

1. Розміщення снаряду у стволі;
2. Імпульсне заповнення камери горючою газовою сумішшю;
3. Пряме ініціювання детонації;
4. Прискорення снаряду.

## Розрахунок параметрів пострілу у газодетонаційній установці метання

Проведемо енергетичну оцінку можливості застосування газових сумішей як зарядів для метання. Здійснимо розрахунок питомої потужності газових зарядів за питомою теплою згорання палива. Як заряд для метання розглянемо суміш пропану з сухим повітрям та пропану з киснем.

У цьому випадку згорання заряду описується хімічними рівняннями



де  $Q_T$  – тепловий ефект хімічної реакції.

Для детонаційного згорання допустимо прийняти, що хімічна реакція протікає за постійним об'ємом (ізохорний процес). Станом продуктів детонації на фронті детонаційної хвилі нехтуємо. В цьому випадку тепловий ефект реакції розраховується за різницею внутрішньої енергії компонентів до та після реакції. Енергія хімічної реакції витрачається на нагрівання продуктів детонації. Згідно довідникових даних [6], питома теплота згорання пропану дорівнює  $Q_{gr} = 46,6$  МДж/кг.

Враховуючи молярну масу пропану отримуємо  $Q_T = 2050,4$  кДж/моль. Вважаємо, що суміш палива з окислювачем у заряді знаходиться у стехіометричному співвідношенні. За нормальних умов питома енергія паливно-кисневого заряду (на 1 літр суміші) дорівнює  $Q_{л1} = 15,25$  кДж/л, для паливно-повітряного заряду  $Q_{л2} = 3,5$  кДж/л. Зростання питомої енергії газового заряду досягається за рахунок підвищення початкового тиску заряду.

Розрахуємо потенційні можливості систем метання на основі газової детонації. Припустимо, що об'єм заряду системи метання дорівнює  $V = 2$  л, а коефіцієнт корисної дії, що відображає перетворення хімічної енергії заряду у кінетичну енергію снаряду (димової гранати та інше), складає 40 %. За цими вихідними умовами отримаємо залежність швидкості снаряду від його маси, початкового тиску та типу заряду (табл. 1).

За розрахунковими швидкостями маємо, що детонаційні системи метання потенційно задовольняють вимогам до систем, що можуть використовуватись на бронетехніці. Для метання тіл масою 5–10 кг потребуються застосування установки на суміші пропану з киснем та початковим тиском 1 МПа, або на суміші пропан-повітря з тиском заряду 5 МПа.

Таблиця 1

Початкова швидкість снаряду в залежності від параметрів детонаційної системи метання

Швидкість, м/с		Тип заряду					
		пропан-кисень			пропан-повітря		
		Тиск, МПа					
		0,1	1	5	0,1	1	5
Маса, кг	1	156	493	1104	75	236	529
	5	70	220	493	33	106	236
	10	49	156	349	23	75	167
	20	35	110	247	17	53	118

Для проведення розрахунку приймемо, що початковий стан продуктів детонації відповідає миттєвому вибуху. У газодетонаційній установці під час прискорення відбувається перетворення потенціальної енергії газу у кінетичну енергію снаряду. Тому, для розрахунку процесу прискорення снаряду скористаємося законом збереження енергії

$$A_{ДЗ} = \Delta Q_{СН}, \quad (7)$$

де  $\Delta Q_{СН}$  – зміна кінетичної енергії снаряду;  $A_{ДЗ}$  – робота розширення, яка здійснюється детонаційним зарядом, за законом політропи, що визначається по рівнянню

$$A_{ДЗ} = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{1}{\epsilon} \right)^{n-1} \right], \quad (8)$$

де  $n$  – показник політропи;  $\epsilon$  – ступінь розширення;  $p_1$  – усереднений тиск у продуктах детонації на момент початку розрахунку;  $V_1$  – об'єм продуктів детонації на момент початку розрахунку.

З урахуванням того, що зміна кінетичної енергії снаряду визначається по виразу

$$\Delta Q_{СН} = \frac{m_{СН}}{2} (u_{m2}^2 - u_{m1}^2), \quad (9)$$

де  $u_{m1}$  – швидкість снаряду на момент початку розрахунку;  $u_{m2}$  – швидкість снаряду на зрізі каналу ствола;  $m_{СН}$  – маса снаряду.

В результаті перетворень виразів (8), (9) отримаємо рівняння для розрахунку швидкості снаряду на виході зі ствола у вигляді

$$u_{m2} = \left[ u_{m1}^2 + \frac{2S}{m_{СН}} \cdot \frac{p_1 x_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{1}{\epsilon} \right)^{n-1} \right] \right]^{0,5}, \quad (10)$$

де  $x_1$  – координата снаряду на момент початку розрахунку;  $S$  – площа поперечного перетину каналу ствола.

Рівняння (10) дозволяє здійснити приблизну оцінку початкової швидкості снаряду в залежності від тиску, що створюється в результаті детонаційного згорання суміші, геометричних розмірів камери, ступеню розширення продуктів детонації (рис. 2 – 4). Результати розрахунку впливу усередненого початкового тиску продуктів детонації та ступеню їх роз-

ширення на початкову швидкість снаряду представлено (рис. 2). В розрахунках сталими приймалися такі параметри:

$$x_1 = 0,3 \text{ м}, u_{m1} = 0, m_{СН}/S = 250 \text{ кг/м}^2.$$

За розрахунками маємо, що різке зростання швидкості відбувається у діапазоні ступенів розширення  $\epsilon = 1 - 4$ . Зі зростанням початкового тиску продуктів детонації прямо порційну від кореня квадратного тиску відбувається збільшення початкової швидкості снаряду.

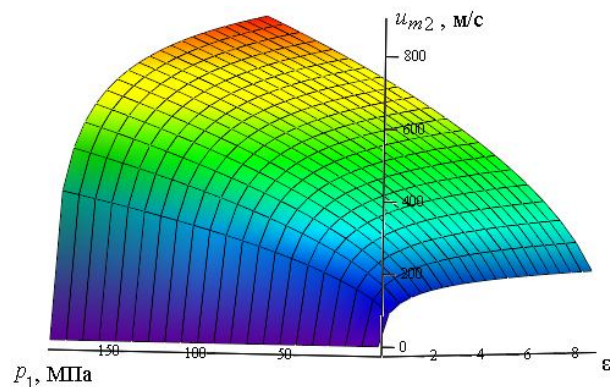


Рис. 2. Залежність початкової швидкості снаряду від початкового тиску продуктів детонації та ступеню їх розширення

За рахунок одночасного зростання початкового тиску продуктів детонації та геометричних розмірів камери досягається стрімке збільшення початкової швидкості снаряду (рис. 3). Це викликано зростанням енергії пострілу, що відповідним чином впливає на кінетичну енергію снаряду. В розрахунках сталими приймалися такі параметри:

$$\epsilon = 5, m_{СН}/S = 250 \text{ кг/м}^2, u_{m1} = 0.$$

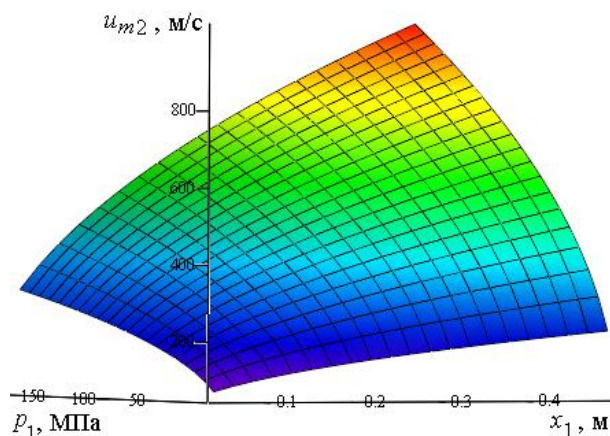


Рис. 3. Залежність початкової швидкості снаряду від початкового тиску продуктів детонації та геометричних розмірів камери

Результати розрахунку впливу питомої маси снаряду та ступеню розширення продуктів детонації на початкову швидкість снаряду представлено (рис. 4). В розрахунках сталими приймалися такі параметри:

$$\varepsilon = 5, u_{m1} = 0, p_1 = 100 \text{ МПа.}$$

Зі зменшенням маси снаряда забезпечується збільшення швидкості снаряду при незмінних інших параметрах пострілу газодетонаційним зарядом.

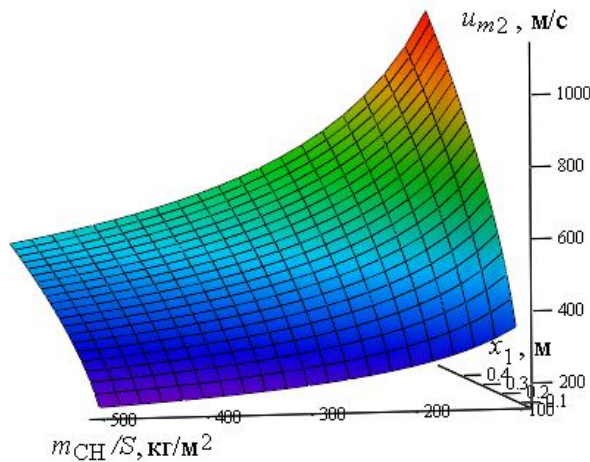


Рис. 4. Залежність початкової швидкості снаряду від питомої маси снаряду та ступеню розширення продуктів детонації

Область застосування виразу (10) обмежується ступенем розширення, за яким тиск порохових газів у гарматі досягає атмосферного  $p_{atm}$ . Зазначений ступень розраховується по рівнянню

$$\varepsilon_{max} = \left( \frac{p_1}{p_{atm}} \right)^{1/n}. \quad (11)$$

Також, початковій швидкості снаряду не може перевищувати швидкість звуку у продуктах згорання, що визначається виразом

$$u_m(\max) < \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}. \quad (12)$$

Дана умова пов'язана з обмеженням області застосування закону розширення газу за законом політропи.

## Висновок

Горючі газові системи метання на детонаційному згоранні мають переваги перед системами на

дефлаграційному згоранні, за якими досягається підвищення стабільності пострілу. Отримано аналітичну залежність початкової швидкості снаряду у газодетонаційній системі метання від початкового тиску продуктів детонації, ступеню їх розширення, геометричних розмірів камери та питомої маси снаряду. Визначено, що для збільшення початкової швидкості снаряду у газодетонаційній системі метання доцільне збільшувати ступінь розширення продуктів детонації у діапазоні від 3 до 7. Для обмеження максимального тиску продуктів детонації за умови досягнення високих швидкостей снаряду доцільне збільшувати розмір камери згорання.

## Список літератури

1. Гострі екзогенні отруєння : метод. вказівки з дисципліни "Невідкладні стани" для підготовки магістра медицини, бакалавра зі спеціальності "Сестринська справа" / упор. А.А. Хижняк, К.Г. Михневич, С.В. Курсов та ін. – Х.: ХНМУ, 2012. – 48 с.
2. Саун О.В. Чисельні дослідження динамічних параметрів та термомеханічних навантажень в газодетонаційній установці метання / О.В. Саун, Ю.В. Хилько, К.В. Коритченко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХУПС, 2014. – №1 (4) – С 154-157.
3. Детонаційні системи. Область застосування та проблеми реалізації / К.В. Коритченко, О.В. Серпухов, О.В. Галак, Ю.В. Хилько // Збірник матеріалів науково-технічної конференції ЦНДІ ОВТ ЗСУ "Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України". – К.: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2012. – С.67.
4. Саун А.В. Численное моделирование внутриваллистических процессов в газо-детонационной установке метания тушащих веществ / А.В. Саун, Ю.В. Хилько, К.В. Коритченко // Проблемы пожарной безопасности. – 2014. – Вып. 36. – С. 208-217.
5. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1982. – 688 с.
6. Мала гірнича енциклопедія, т. 1 / За ред. В.С. Білецького. – Донецьк: Донбас, 2004. – 640 с.

Надійшла до редколегії 31.07.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Стаховський, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

## ПАРАМЕТРЫ ВЫСТРЕЛА ГАЗОДЕТОНАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МЕТАНИЯ

К.В. Корытченко, А.В. Саун, Ю.В. Хилько, И.В. Цебрюк, И.А. Белоусов

Обоснованно отличие горючих газовых систем метания на дефлаграционном и детонационном сгорании. Определена зависимость начальной скорости снаряда в газодетонационной системе метания от начального давления продуктов детонации, степени их расширения, геометрических размеров камеры и удельной массы снаряда.

**Ключевые слова:** артиллерийский боеприпас, газодетонационная система метания.

## SHOT PARAMETERS OF GAS DETONATION THROWING SYSTEM

K.V. Koritchenko, O.V. Sakun, Yu.V. Khil'ko, I.V. Sebryuk, I.O. Belousov

Grounded difference of the combustible gas systems of throwing on deflagration and detonation combustion. Dependence of initial velocity of shell is certain in the gas detonation system of throwing from initial pressure of products of detonation, degree of their expansion, geometrical sizes of chamber and specific mass of shell.

**Keywords:** artillery ammunition, gas detonation throwing system.