

*О.В. Сакун, к.б.н., с.н.с., доц. кафедри, НУЦЗУ*

## **ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ В ГАЗОДЕТОНАЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ МЕТАННЯ КОНТЕЙНЕРІВ З ВОГНЕГАСНИМИ РЕЧОВИНАМИ**

(представлено д.т.н. Басмановим О.С.)

Шляхом чисельного моделювання досліджено вплив маси тіл, що метаються, на їх прискорення у газодетонаційній установці метання контейнерів з вогнегасними речовинами. Встановлена динаміка розподілу тиску продуктів детонації газового горючого заряду вздовж ствола газодетонаційної установки під час метання тіл масою 0,64 кг, 1,28 кг, 3,2 кг.

**Ключові слова:** детонація в газах, модель, метання тіл.

**Постановка проблеми.** Практика гасіння пожеж на базах зберігання боєприпасів показала, що ефективність дій пожежних підрозділів Збройних Сил України та Державної служби України з надзвичайних ситуацій знижується через небезпеку ураження особового складу, а також пошкодження засобів пожежогасіння фугасною дією і осколками від вибухів боєприпасів. Ефективним способом дистанційного гасіння пожеж на арсеналах може бути метання вогнегасних речовин в зону горіння з відстані, що перевищує небезпечну. небезпечна відстань визначається дальністю розльоту боєприпасів реактивних систем залпового вогню, відстанню, на яку розкидаються вибухами уцілілі боєприпаси, тара, елементи конструкцій будівель, розльотом осколків артилерійських боєприпасів, що вибухнули [1]. За досвідом ліквідації надзвичайної ситуації на арсеналі поблизу м. Балаклія Харківської області в березні 2017 року, середня щільність уцілілих боєприпасів та їх частин, які були виявлені групами розмінування навколо місця горіння складів (штабелів), становила: у радіусі 7 – 10 км – 0,13 одиниць на гектар; у радіусі 3 – 7 км – 0,64 одиниць на гектар; у радіусі до 3 км – 8,3 одиниць на гектар [2]. Із урахуванням ступеню небезпеки, зведений піротехнічний загін базувався на відстані близько 4 км від складів з боєприпасами, що горіли.

Під час пожеж на арсеналах, вибухи боєприпасів, що зберігаються в дерев'яній тарі, відбуваються через 10 – 12 хвилин після займання деревини ящиків. Після цього виконання завдань з гасіння повинно бути припинене, а пожежні підрозділи відведені на безпечну відстань [1]. Так, під час ліквідації надзвичайної ситуації на арсеналі поблизу смт Калинівка Вінницької області, що виникла ввечері 26 вересня 2017 року, через високу інтенсивність вибухів боєприпасів (до 2 – 3 вибухів на

секунду), гасіння пожежі у перші години не здійснювалось. Пожежні танки були направлені для ліквідації горіння лише на другий день після виникнення пожежі, коли інтенсивність вибухів зменшилась до 3 – 4 вибухів на хвилину [3]. Дистанційне гасіння пожежі не проводилося через відсутність засобів доставки вогнегасних речовин на відстань, більшу за небезпечну. З урахуванням приведеного, розробка потужних систем метання вогнегасних речовин із регульованою дальністю пострілу є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Спосіб гасіння пожеж імпульсною подачею вогнегасної речовини у порошкоподібному стані в зону горіння реалізований у дослідницьких зразках пожежної установки на базі шасі танка Т-62 «Імпульс-Шторм» [4]. Розроблена вітчизняною компанією ТОВ «Нові імпульсні технології», пожежна установка є потужним зразком імпульсної пожежної техніки. Вона оснащена п'ятдесятиствольною системою залпового вогню, у якій для створення газодисперсного вогнегасного потоку використовується енергія пострілу порохових зарядів. Максимальна дальність метання вогнегасних речовин залпом із 10 стволів однієї установки становить 100 – 120 м [5]. Із урахуванням цього показника, пожежна установка «Імпульс-Шторм» може ефективно застосовуватись для гасіння пожеж на арсеналах у той період, коли не відбуваються вибухи артилерійських боєприпасів.

Аналіз останніх досліджень систем метання газодетонаційного типу [6-8] вказує на можливість створення на їх основі пожежної установки металльної дії, яка забезпечує доставку контейнерів з вогнегасними речовинами на відстань до 4000 м. У роботі [6] аналітично розраховано, що для метання за допомогою газодетонаційної установки на вказану відстань капсули масою 3,2 кг необхідно застосувати газодетонаційний заряд пропан-бутану технічного з киснем у стехіометричному співвідношенні з початковим тиском 1,2 МПа. Під час пострілу на зазначену відстань початкова швидкість тіла, що метається, із урахуванням опору повітря, дорівнює 237 м/с. Загальна довжина ствола установки метання приймалась рівною 2,0 м, довжина газового детонаційного заряду – 0,5 м, внутрішній діаметр ствола – 0,093 м. Але авторами не досліджено імпульсні динамічні навантаження, які виникають в газодетонаційній установці під час пострілу.

У роботі [7] представлена математична модель внутрішньобалістичних процесів у газодетонаційній установці метання, досліджено вплив початкового тиску суміші газів, що детонують, на термодинамічний стан продуктів детонації, час релаксації хвильових процесів і динаміку руху тіла, яке метається, в каналі ствола. Але авторами роботи не розглянуто впливу зміни маси тіла, що метається, на внутрішньобалістичні параметри пострілу.

У роботі [9] досліджено вплив маси тіла, що метається, на його початкову швидкість. Але аналітичні залежності, за якими проводились

розрахунки, не дозволяють описати динамічні процеси, які відбуваються в каналі ствола установки під час прискорення тіла, що метається. Авторами розроблена математична модель прискорення і зовнішньої балістики польоту контейнера, у якій враховуються вплив тиску газу, яким прискорюється тіло, що метається, маси тіла та розміру зазору між стінками контейнера і внутрішньою поверхнею ствола пневматичної установки метання на параметри пострілу. Але ця модель не може поширюватись на системи, у яких для метання використовується енергія розширення продуктів детонації горючих газів.

Авторами [10] здійснено чисельне моделювання процесів, які протікають під час вибуху газового горючого заряду, сформованного в об'ємі, обмеженому тонкою плівкою. Але отримані результати не можна переносити на системи у яких газовий горючий заряд формується під високим, понад 1 МПа, початковим тиском, а робота розширення продуктів детонації заряду витрачається на метання тіла.

Результати досліджень [11, 12] вказують на те, що газодетонаційні заряди потенційно мають суттєві переваги над зарядами інших типів щодо ефективності прискорення тіл. Підвищення початкового тиску газового заряду понад 0,6 МПа дозволяє досягти зростання енергетичної ефективності пострілу до 60 – 70 % та зменшити витрати горючої газової речовини.

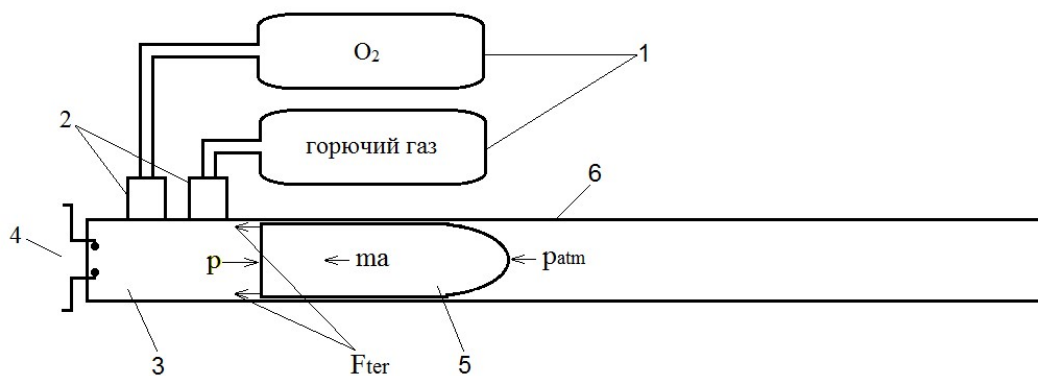
Важливими характеристиками, що враховуються під час визначення конструкції елементів пожежних установок метання контейнерів з вогнегасними речовинами газодетонаційного типу є розподіл тиску, який створюється продуктами детонації горючих газових зарядів в каналі ствола під час пострілу та динаміка прискорення тіл, що метаються. Але результати аналізу літературних даних не дозволяють на їх основі розробити конструкцію металевий установки без проведення додаткових досліджень.

**Постановка завдання та його вирішення.** Метою дослідження є визначення амплітудних значень тиску продуктів детонації газового горючого заряду, а також прискорення контейнерів з різною масою в каналі ствола газодетонаційної установки під час їх метання для формулювання вимог до конструкційних матеріалів установки.

Завданням дослідження є чисельне моделювання розподілу тиску в продуктах детонації заряду під час метання контейнерів з різною масою та динаміки їх прискорення в стволі газодетонаційної установки;

Принципова схема металевий установки газодетонаційного типу представлена на рисунку 1. Прискорення контейнера 5 в стволі установки 6 відбувається під дією надлишкового тиску  $p$  продуктів детонаційного згоряння заряду. Формування металевий заряду в камері 3 забезпечується імпульсною подачею горючого газу та окисника під тиском з балонів 1. Стимування руху контейнера під час заповнення газодетонаційної камери газовою сумішшю забезпечується силою його

інерції ( $ma$ ) та, меншою мірою, сумарною дією сил тертя між контактними поверхнями корпусу контейнера й каналу ствола  $F_{\text{тер}}$  і опору повітря  $p_{\text{атм}}$ . Дозування газів здійснюється за допомогою електроклапанів 2. Ініціювання детонаційного згоряння заряду відбувається в результаті електричного розряду, який забезпечується електророзрядним пристроєм 4. Розміщення контейнера в установці метання перед пострілом можливе через казенну частину або дульний зріз ствола.



**Рис. 1.** Схема установки газодетонаційного типу: 1 – балони з компонентами суміші газів, яка детонує; 2 – електричні клапани для дозування компонентів суміші газів, яка детонує; 3 – газодетонаційна камера; 4 – електророзрядний пристрій для ініціювання детонаційного згоряння газового заряду; 5 – контейнер з вогнегасною речовиною; 6 – ствол

Термодинамічні процеси зміни стану продуктів детонаційного згоряння заряду під час пострілу описуються диференціальними рівняннями газодинаміки для багатокомпонентної газової суміші, яка хімічно реагує [13], та розглянуті в одновимірній плоско-симетричній постановці задачі.

Вирішувалася система рівнянь нерозривності, імпульсу та енергії, яка замикалась рівнянням стану багатокомпонентного ідеального газу.

Суміші пропан-бутану технічного з киснем та водню з киснем у стехіометричному співвідношенні є співмірними за питомою енергією згоряння. Із урахуванням того, що достатньо вивченою є кінетична схема згоряння водню, розрахунок хімічних реакцій здійснювався за спрощеною кінетичною схемою згоряння водню [14].

Динаміка руху контейнера визначається через розрахунок переміщення правої границі розрахункової області із урахуванням протитиску зовнішнього середовища за рівняннями:

$$F = (p - p_{\text{атм}}) \cdot S = m \cdot a, \quad (1)$$

$$x_m = x_{m0} + \int_0^t a \cdot t dt, \quad (2)$$

де  $p$  – тиск на правій границі розрахункової області;  $p_{atm}$  – протитиск навколишнього середовища;  $S$  – площа поперечного перерізу ствола;  $a$  – миттєве прискорення контейнера;  $m$  – маса контейнера;  $x_{m0}$  – початкове положення контейнера у стволі;  $x_m$  – положення контейнера у стволі на час  $t$ .

Розподіл начального термодинамічного стану газового заряду у розрахунковій області відображено на рис. 2.

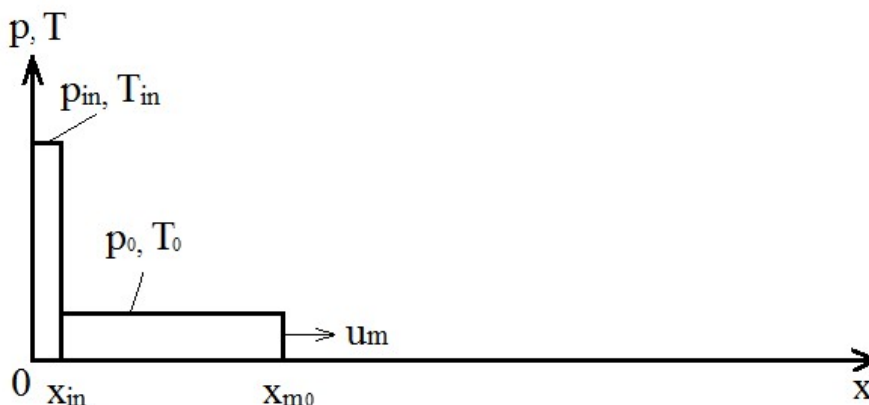


Рис. 2. Схема розподілу тиску та температури у розрахунковій області на час  $t = 0$  [7]

На початок розрахунку (час  $t = 0$ ), правій рухомій границі розрахункової області присвоєна координата  $x_{m0}$ . Приймалось, що  $x_{m0} = 0,5$  м (довжина газодетонаційного заряду). Рух контейнера на час  $t = 0$  не відбувається, газодинамічні збурення в розрахунковій області у розрахунковому інтервалі  $0 < x < x_{m0}$  відсутні. Ліва нерухома границя розрахункової області з координатою  $x = 0$  відповідає закритому торцю ствола. На розрахункових границях виконується умова непротікання.

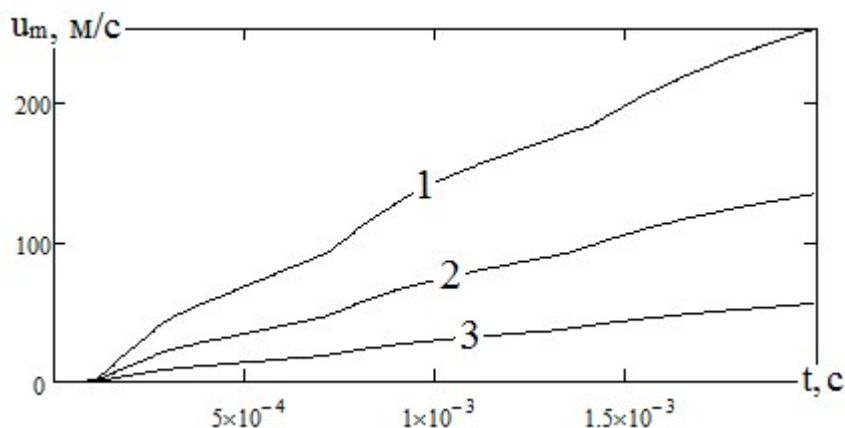
Умови прямого ініціювання детонації забезпечені створенням високих тиску  $p_{in}$  та температури  $T_{in}$  у розрахункових чарунках на ділянці  $0 - x_{in}$ . Початковий тиск на цій ділянці визначався за законом ізохори за температури  $T_{in} = 3000$  К. Приймалось, що  $x_{in} = 0,002$  м. Розрахунковий крок за часом складав  $\Delta t = 10^{-7}$  с.

Початкова температура заряду дорівнює  $T_0 = 300$  К. Початковий тиск дорівнює  $p_0 = 1,2$  МПа. Внутрішній діаметр ствола (калібр) прийнятий рівним  $0,093$  м. Маса контейнера у розрахункових варіантах дорівнює  $m = 0,64$  кг,  $m = 1,28$  кг та  $m = 3,2$  кг. За таких умов, відповідно до розрахунків [6], у разі використання ствола довжиною  $2,0$  м, максимальна дальність метання контейнера масою  $3,2$  кг становить  $4000$  м. При цьому, кут підвищення ствола газодетонаційної установки метання дорівнює  $45^\circ$ .

Під час чисельного моделювання застосовувався метод розщеплення за фізичними процесами: газодинамічними, хімічними і механічними. Газодинамічні процеси розраховувалися за методом

Годунова С.К. першого порядку точності [15]. Розрахунок ланцюгових хімічних реакцій зводився до рішення жорсткої системи звичайних диференціальних рівнянь. Під час розрахунку механічних процесів на розрахунковому кроці за часом рух контейнера вважався рівноприскореним.

У результаті чисельного дослідження розраховано, що швидкість контейнера, який метається  $u_m$ , на фіксований час нелінійно залежить від його маси (рис. 3).



**Рис. 3.** Швидкість  $u_m$  переміщення контейнерів в газодетонаційній установці метання за значень маси контейнерів: 1 – 0,64 кг; 2 – 1,28 кг; 3 – 3,2 кг

Зокрема, на час  $t = 2$  мс, за значення маси контейнера  $m = 3,2$  кг, швидкість контейнера досягає 56,0 м/с, за значення маси контейнера  $m = 1,28$  кг – 134,1 м/с, за значення маси контейнера  $m = 0,64$  кг – 251,8 м/с (рис. 3). Тобто, зменшення маси контейнера у 2,5 рази (з 3,2 кг до 1,28 кг) призводить до зростання миттєвої швидкості контейнера у 2,4 рази, а зменшення маси контейнера у 5 разів (з 3,2 кг до 0,64 кг) призводить до зростання миттєвої швидкості контейнера у 4,5 рази. Цей результат розширює область застосування висновку, зробленого у роботі [5], стосовно лінійної залежності швидкості тіла, що метається, у стволі газодетонаційної установки метання на фіксований час від початкового тиску заряду.

У границях приведенного розрахункового діапазону, тіла набувають кінетичної енергії, величина якої також нелінійно залежить від їх маси. Зокрема, на час  $t = 2$  мс, тілу масою  $m = 3,2$  кг відповідає значення кінетичної енергії  $E = 5018$  Дж, тілу масою  $m = 1,28$  кг –  $E = 11509$  Дж, тілу масою  $m = 0,64$  кг –  $E = 20289$  Дж. Із урахуванням того, що повна енергія згоряння заряду була рівною для усіх трьох варіантів, можна стверджувати, що швидкість перетворення енергії, яка виділяється під час згоряння заряду, в кінетичну енергію руху контейнера є вищою для тіл з меншою масою.

Динаміка прискорення контейнерів у газодетонаційній установці метання, представлена на рисунку 4, має складний характер.

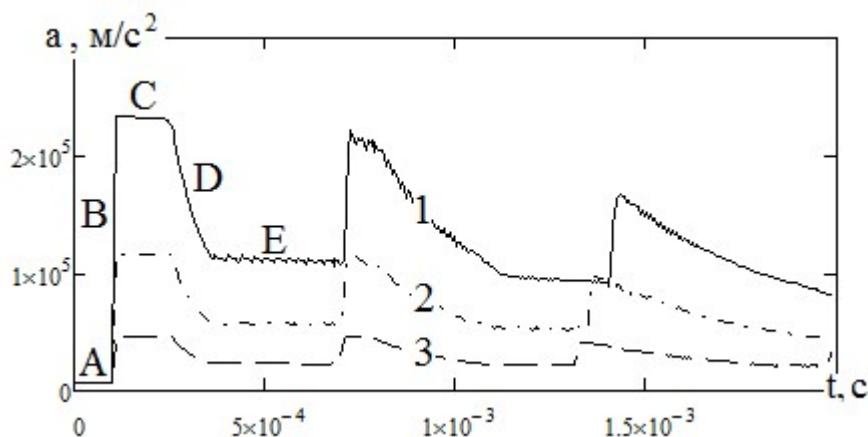


Рис. 4. Прискорення  $a$  контейнерів у газодетонаційній установці метання за значень маси контейнерів: 1 – 0,64 кг; 2 – 1,28 кг; 3 – 3,2 кг

Форма кривих 1, 2, 3 є однотипною для тіл з різною масою. Під час ініціювання детонаційного згоряння заряду та наближення фронту ударної хвилі до контактної поверхні контейнерів, їх прискорення практично не відбувається (ділянка А на кривих 1, 2, 3). Після виникнення сили  $F$  (рівняння 1), на ділянці В контейнери набувають прискорення, величина якого нелінійно залежить від маси тіл, що метаються. Тіло масою  $m = 0,64$  кг прискорюється до  $2,4 \cdot 10^5$  м/с<sup>2</sup>, тіло масою  $m = 1,28$  кг – до  $1,2 \cdot 10^5$  м/с<sup>2</sup>, тіло масою  $m = 3,2$  кг – до  $0,4 \cdot 10^5$  м/с<sup>2</sup>. На ділянці С значення прискорення тіл різної маси залишається максимальним. Далі, в результаті відбивання від контактних поверхонь тіл, що метаються, ударні хвилі починають рухатися в бік закритого торця ствола. Тому на ділянці D відбувається плавне зменшення величини прискорення тіл, що метаються, до значень, які нелінійно залежать від маси контейнерів. Прискорення тіл на ділянці Е відбувається під дією тиску продуктів згоряння заряду за фронтом ударної хвилі. Після відбивання ударних хвиль від закритого торця ствола і наближення їх до контейнерів, приведений вище цикл повторюється. На графіках помітні незначні коливання прискорення контейнерів з різними масами, які можуть виникати в результаті протікання складних хвильових процесів, пов'язаних із відбиттям ударних хвиль від поверхонь газодетонаційної камери та тіл, що метаються [8]. Амплітуда цих коливань на визначений час має більше значення для тіл з меншою масою.

Отримані значення прискорення можуть бути врахованими під час визначення допустимих навантажень, які виникають в результаті дії сили інерції на елементи конструкції контейнерів.

На рис. 5 представлено результат розрахунку поля розподілу тиску в

продуктах детонації під час відбиття детонаційних хвиль від поверхні тіл, що метаються (крива 2) та закритого торця ствола (крива 1). Слабші хвилі або імпульси тиску також можуть досягати закритого торця ствола і, відбиваючись від нього, підсилювати основну ударну хвилю [16].

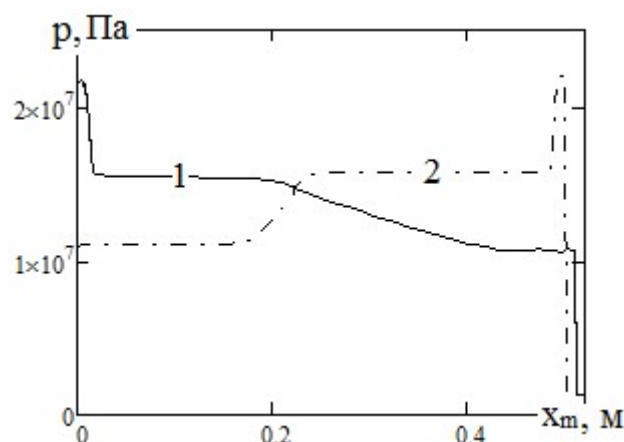


Рис. 5. Поле розподілу тиску в продуктах детонації за значення маси контейнера  $m = 0,64$  кг на час: 1 –  $4,15 \cdot 10^{-4}$  с; 2 –  $1,15 \cdot 10^{-4}$  с.

Розраховано, що максимальний тиск продуктів детонації воднево-кисневої суміші зростає у 19,2 разів відносно початкового тиску та виникає під час відбиття детонаційних хвиль від контактних поверхонь контейнерів (крива 5 на рис. 6). На фронті детонаційних хвиль тиск зростає у 13,3 разів від початкового, а за детонаційними хвилями – у 9,2 разів (криві 1 – 5). При цьому, динаміка розподілу тиску по довжині газодетонаційної установки під час детонаційного згоряння заряду в розрахунковому діапазоні є практично однаковою для тіл масою  $m = 3,2$  кг,  $m = 1,28$  кг та  $m = 0,64$  кг.

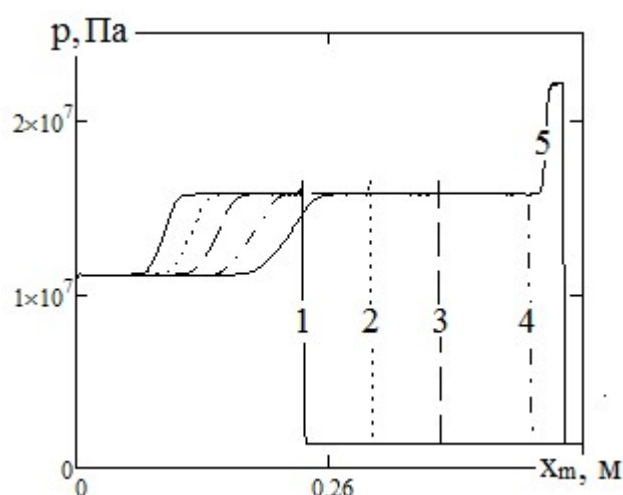


Рис. 6. Поле розподілу тиску в продуктах детонації за значень маси контейнера  $m = 0,64$  кг,  $m = 1,28$  кг,  $m = 3,2$  кг на час: 1 –  $5 \cdot 10^{-5}$  с; 2 –  $6,5 \cdot 10^{-5}$  с; 3 –  $8,5 \cdot 10^{-5}$  с; 4 –  $1 \cdot 10^{-4}$  с; 5 –  $1,25 \cdot 10^{-4}$  с



Отримані максимальні значення тиску, який виникає в каналі ствола газодетонаційної установки метання  $p = 2,3 \times 10^7$  Па, та початкової швидкості тіл, які метаються  $u_m = 251,8$  м/с є співмірними відповідним величинам для 82-мм міномету –  $3,9 \times 10^7$  Па та 211 м/с. Маса осколкової міни калібру 82-мм також відповідає масі найважчого з трьох контейнерів, які досліджувались. Крім того, спільною особливістю пострілу газодетонаційної установки метання контейнерів та міномету є наявність прориву продуктів згорання заряду через зазор між тілом, яке метається, і каналом ствола. Для міномету, частина газів, яка не приймає участі в прискоренні міни, становить 10 – 15 %, тоді як в інших артилерійських засобах ствольного типу це значення є мізерним [17]. Тому балістичне проектування, розрахунок параметрів міцності й конструкції ствола та інших елементів газодетонаційних установок метання контейнерів з вогнегасними речовинами може здійснюватися із використанням методик, які застосовуються під час конструювання артилерійських засобів мінометного типу.

Застосування в роботі методу чисельного моделювання дозволило визначити динамічні навантаження, які виникають у стволі газодетонаційної установки метання під час пострілу, уникнувши при цьому складних і вартісних натурних експериментів. Але з метою уточнення розрахункових результатів у подальшому варто провести експериментальні дослідження внутрішньобалістичних процесів в системах прискорення контейнерів газодетонаційного типу.

**Висновки.** У результаті чисельного моделювання виявлена нелінійна залежність моментальної швидкості контейнерів, що метаються, від їх маси під час прискорення у газодетонаційній установці метання. На час від початку детонації заряду  $t = 2,0$  мс, за значень мас контейнерів  $m = 0,64$  кг,  $m = 1,28$  кг,  $m = 3,2$  кг, зменшення маси контейнера у 2,5 рази призводить до зростання його миттєвої швидкості у 2,4 рази, а зменшення маси контейнера у 5 разів – до зростання його миттєвої швидкості у 4,5 рази; розрахована динаміка прискорення контейнерів у газодетонаційній установці метання є однотипною для тіл з різною масою. Більшого прискорення набувають тіла з меншою масою; встановлено, що під час детонаційного згорання заряду, у границях приведенного розрахункового діапазону, динаміка розподілу тиску по довжині газодетонаційної установки є практично однаковою для тіл з різною масою. Максимальний тиск продуктів детонації воднево-кисневої суміші зростає у 19,2 разів відносно початкового тиску заряду та виникає під час відбиття детонаційних хвиль від контактних поверхонь контейнерів; формулювання вимог до конструкційних матеріалів газодетонаційних установок метання контейнерів з вогнегасними речовинами може здійснюватися із використанням методик, які застосовуються під час конструювання мінометів; отримані у роботі результати можуть бути використані під час створення прототипу системи метання контейнерів з

вогнегасними речовинами, а метод розрахунку динамічних навантажень в газодетонаційних установках метання – для визначення параметрів систем метання газодетонаційного типу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Безпека зберігання вибухових речовин та боєприпасів: навч.-метод. посіб. для курсантів, студентів та слухачів, які навчаються у відомчих вузах / М.І. Адаменко, О.В. Гелета, Ю.В. Квітковський та ін.; за заг. ред. В.О. Росохи. – Харків: АЦЗУ, 2005. – 337 с.

2. План організації робіт з очищення від вибухонебезпечних предметів населених пунктів і територій, прилеглих до 65 арсеналу ЗСУ у Балаклійському районі Харківської області. – Затверджено віце-прем'єр-міністром – Міністром регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства Г.Г. Зубком 25.03.2017 р.

3. Пожежа і вибухи на складах боєприпасів в Калинівці: всі подробиці [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <http://nv.ua/ukr/ukraine/events/pozhezha-i-vibuhi-na-skladah-bojepripasiv-v-kaliniivtsi-vsi-podrobitsi-1922844.html>.

4. Zakhmatov V.D. Overview of impulse fire-extinguishing system applications / V.D. Zakhmatov, M.V. Silnikov, M.V. Chernyshov // Journal of Industrial Pollution Control. – 2016. – № 32 (2). – P. 490 – 499.

5. Справочник инженера пожарной охраны: учебно-практ. пособ. / Д.Б. Самойлов, А.Н. Песикин, Д.Г. Снегирев и др.; под общ. ред. Д.Б. Самойлова. – Москва: Инфра-Инженерия, 2010. – 864 с.

6. Сакур О.В. Обґрунтування тактико-технічних характеристик вогнеметної установки до бойової вогнеметної машини / О.В. Сакур // Механіка та машинобудування: наук.-техн. журнал. – Харків: НТУ “ХПІ”, НПКП “Транспортне машинобудування”. – 2017-1. – С. 130–138.

7. Сакур А.В. Численное моделирование внутрибаллистических процессов в газодетонационной установке метания тушащих веществ / А.В. Сакур, Ю.В. Хилько, К.В. Коротченко // Проблемы пожарной безопасности. – 2014. – Вып. 36. – С. 208-217.

8. Combustion Light Gas Gun Technology Demonstration / UTRON, Inc. Report N00014-02-C-0419. – 2007. – 21 p.

9. Жуйков Д.А. Разработка математической модели контейнеров для доставки огнетушащих веществ в очаги сложных пожаров / Д.А. Жуйков, А. В. Баран, А. Н. Комиссаров // Wyksza cenie I nauka bez granic: Matirialy II miedzynarodowej naukowopraktycznej konferencji. – Belgrad, – 2005. – S. 56–58.

10. Dubinin D. Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge / D. Dubinin, K. Korytchenko, A. Lisnyak, I. Hrytsyna, V. Trigub // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6(10 (90)), P. 11–16.

11. Kailasanath K. Review of propulsion applications of detonation waves / K. Kailasanath // AIAA Journal. – 2000. – Vol. 38, No. 9. – P.1698–1708.
12. Coleman M.L. Overview of pulse detonation propulsion technology / M.L. Coleman // Chemical propulsion information agency, The Johns Hopkins University, 2001. – № CPTR 70. – 53 p.
13. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б.Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1982. – 688 с.
14. Petersen E.L. Reduced kinetics mechanisms for ram accelerator combustion / E.L. Petersen, R.K. Hanson // Journal of Propulsion and power. – 1999. – Vol. 15, No 4. – P. 591-600.
15. Годунов С. К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др.; под ред. С.К. Годунова. – Москва: Наука, 1976. – 400 с.
16. Бартенев С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С.С. Бартенев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 215 с.
17. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика / М.Е. Серебряков – Москва: Оборонгиз, 1949. – 672 с.

*Отримано редколлегією 12.03.2018*

А.В. Сакун

**Динамические нагрузки в газодетонационных установках метания контейнеров с огнетушащими веществами**

Путём численного моделирования исследовано влияние массы метаемых тел на их ускорение в газодетонационной установке метания контейнеров с огнетушащими веществами. Установлена динамика распределения давления продуктов детонации газового горючего заряда вдоль ствола газодетонационной установки во время метания тел массой 0,64 кг, 1,28 кг, 3,2 кг.

**Ключевые слова:** детонация в газах, модель, метание тел.

O.V. Sakun

**Dynamic loads in the gas-detonation device for shooting of containers with extinguishing substances**

The influence of the mass of throwing bodies on its acceleration in the gas-detonation device has been numerically simulated for shooting containers with extinguishing substances. The pressure-time distributions of products of detonative charge along the barrel of the gas-detonation device were found out for throwing bodies weighing 0,64 kg, 1,28 kg, 3,2 kg.

**Keywords:** detonation in gases, model, throwing bodies.