

**Mathematical model assessment longitudinal stability wheel modified military means**

U. Shabatura, W. Zalyпка

*The mathematical model changes longitudinal stability, which enable to clarify and define nonlinear boundary conditions mathematically substantiated application developed in previous studies ways to increase longitudinal stability of wheeled vehicles modified by changing the radius of the wheels.*

**Key words:** vehicles for military use, longitudinal stability, changes in the radius of wheels.

УДК 623.522.6

Ю.В. Шабатура, А.С. Міщенко

*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів***ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗАРЯДУ АРТИЛЕРІЙСЬКОГО БОЄПРИПАСУ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ**

*У статті розглянута проблема вимірювання температури зарядів артилерійських боєприпасів. Визначені математичні залежності зміни температури порохового заряду в середовищі з постійною температурою на основі теорії регулярного теплового режиму.*

**Ключові слова:** артилерія, балістична підготовка, температура заряду, вимірювання температури, регулярний тепловий режим.

**Вступ**

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день великого значення набуває точність ураження цілей вогневыми підрозділами наземної самохідної та реактивної артилерії, зменшення витрат часу на підготовку підрозділів до виконання бойового завдання. На точність ураження серед інших параметрів впливає правильність та своєчасність внесення балістичних поправок, зокрема поправки на температуру зарядів боєприпасів [1]. Аналіз наявних даних [2] показує, що значення температур металевих і реактивних зарядів у пострілах, виміряних штатними засобами (за допомогою ТБ-15 або за температурою оточуючого повітря в реактивній артилерії), може значно відрізнятись від реальної температури. Крім того, при вимірюванні температури штатними засобами виникають похибки внаслідок інструментальних помилок заряду, помилок зняття відліку, зміни температури навколишнього середовища, помилок за рахунок припущення про рівність балістичної температури заряду, фіксованої при рівномірному температурному полі, середньооб'ємної температури, що отримується при нерівномірному полі заряду, та інших факторів. При врахуванні цих помилок сумарна середина похибка вимірювання температури зарядів існуючими методами складає 2-3 °С для металевих зарядів та 4-5 °С – для реактивного.

Така розбіжність у вимірюванні температури заряду призводить до значних помилок при визначенні вихідних даних для стрільби та не відповідає вимогам повної балістичної підготовки. Тому проблема якомога точнішого визначення температури заряду є важливою і актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для визначення температури заряду артилерійського боєприпасу в будь-який момент часу, при нестационарному режимі, необхідно знайти залежність температури заряду від температури навколишнього середовища. Задача знаходження функції залежності температури заряду  $T_{зар}$  від часу  $\tau$  для боєприпасу, який охолоджується (нагрівається) в середовищі, може бути вирішена за допомогою поєднання гіпотези Фур'є про пропорційність між питомим тепловим потоком та градієнтом температури, наслідком якої є рівняння теплопровідності Фур'є, яке для декартових координат може бути записане у вигляді (1), та закону Ньютона-Ріхмана (2).

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

де  $\tau$  – час;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну між тілом та середовищем.

$$q = \alpha \Delta T, \quad (2)$$

де  $q$  – тепловий потік;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну між тілом та середовищем;

$\Delta T$  – різниця між температурою навколишнього середовища та температурою поверхні тіла (температурний напір).

У подальшому, враховуючи граничні та початкові умови, отримуються характеристичні (власні) функції і задача вирішується методами теорії теплової подібності, пов'язуючи температуру в будь-якій точці тіла із безрозмірними координатами, критерієм Фур'є  $F_0$  та критерієм Біо  $Bi$  або розкладаючи характеристичну функцію в ряд [3].

Такий метод важко застосувати на практиці. У випадку, коли тіло, яке розглядається, має скільки-небудь складну форму, або якщо розглядається система тіл з різними властивостями, виникають труднощі у визначенні характеристичних функцій. Крім того, розкладання функції в ряд за функціями певного виду до кінця вирішене тільки для певного обмеженого кола функцій. Разом з тим виникають труднощі із визначенням розподілу температури в початковий момент часу  $T_0(x,y,z)$  та визначенням коефіцієнта теплообміну між тілом та середовищем  $\alpha$ , який залежить не тільки від властивостей тіла, а і від зовнішніх умов в момент кожного конкретного визначення температури (вологість, температура навколишнього середовища та ін.).

Досвід останніх військових конфліктів із застосуванням артилерії дозволяє зробити обґрунтований висновок, що на момент застосування боеприпасів їх температурний режим набуває регулярного характеру.

Тому задача визначення температури заряду боеприпасу може бути спрощена завдяки застосуванню теорії регулярного теплового режиму, яка дозволяє не враховувати початковий розподіл температур в тілі [4].

**Метою статті** є розроблення математичної моделі зміни температури заряду артилерійського боеприпасу на основі теорії регулярного теплового режиму, яка дозволить розраховувати реальну температуру порохового заряду артилерійського боеприпасу за температурою його зовнішньої поверхні без урахування початкового розподілу температур.

### Основна частина

Розглянемо гільзу із повним змінним зарядом (рис. 1) як систему тіл, яка складається [5] із гільзи 1, посиленої кришки 2, нормальної кришки 3, розсипної частини заряду 4, картуза заряду 5, пучка порохових трубок 6, полум'ягасника 7, капсульної втулки 8, запальника 9.

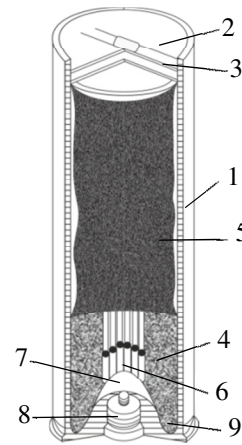


Рис. 1. Гільза 4Г5 із повним зарядом 4Б10

При переміщенні даної системи із середовища з одним температурним фоном в інше або при різкій зміні температурних умов (наприклад, при переміщенні боеприпасів зі складу на вогнесву позицію або при стрімкому зростанні температури в бойовому відділенні САУ після пострілу), температури тіл вирівнюються всередині системи, в подальшому зрівнюючись із температурою навколишнього середовища.

Теплову еволюцію системи тіл можна розділити на три стадії (рис. 2).

Перша стадія характеризується значним впливом на температурне поле тіл його початкового теплового стану (лінії АА', СС'), яке, взагалі, носить випадковий характер, не пов'язаний із тими умовами, в яких відбувається процес нагрівання (охолодження) тіл.

З часом вплив початкових особливостей температурного поля на його подальшу зміну згладжується, закон зміни температури набуває форми експоненти (лінія ЕЕ'). Цю другу стадію називають правильним або регулярним тепловим режимом.

Друга стадія поступово переходить в третю (лінія GG'), яка настає протягом великого терміну часу та полягає у тепловій рівновазі системи тіл із навколишнім середовищем.

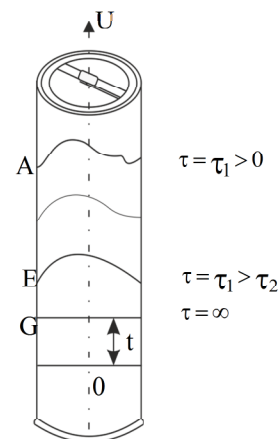


Рис. 2. Зміна з часом температурного поля заряду в гільзі при його охолодженні в постійних зовнішніх умовах

Загальний інтеграл рівняння Фур'є для задачі охолодження (нагрівання) однорідного та ізотропного тіла будь-якої форми виражається нескінченним рядом (3), члени якого розташовані за експоненційними убуваючими функціями часу [3, 4]:

$$\Theta = A_0 U_0 e^{-m_0 \tau} + A_1 U_1 e^{-m_1 \tau} + \dots, \quad (3)$$

де  $m_n$  – дискретно зростаючі додатні числа  $0 < m_0 < m_1 < m_2 < \dots$ ;

$U_0, U_1$  – функції координат точок тіла, всі кінечні;

$A_0, A_1$  – кінечні сталі, які не залежать від часу та координат.

Розглянемо другу стадію процесу зміни температури, а саме моменти часу, віддалені від начального  $\tau=0$ . Тоді члени ряду (3) убувають за абсолютною величиною і вже із другого члена їх значеннями можна знехтувати, порівняно із першим членом ряду. Тому температура  $U$  в будь-якій точці тіла, ще задовго до того, як зрівнятися з температурою навколишнього середовища  $t$ , буде з високою точністю виражатися тільки першим членом ряду (3), тобто слідувати простому експоненційному закону (4) [4].

$$U - t = \Theta \approx A U e^{-m \tau}, \quad (4)$$

де  $U$  – температура тіла;

$\Theta$  – температура тіла відносно температури навколишнього середовища.

Час настання регулярного теплового режиму визначається значенням критерію Фур'є (5) [4].

$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{l^2} \geq 0,3, \quad (5)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт температуропровідності тіла;

$l$  – визначальний розмір тіла.

З рівняння (4) впливають важливі для практики наслідки, прологарифмувавши його, отримуємо:

$$\ln|\Theta| = -m \tau + G(x, y, z), \quad (6)$$

де  $G(x, y, z)$  – функція координат точки;

$m$  – темп охолодження.

Отже, основна властивість всіх процесів регулярного охолодження (нагрівання) тіла, за відсутності джерел та стоків тепла полягає в тому, що після проходження достатнього часу з початку не стаціонарного процесу настає регулярний режим, особливою якого є те, що логарифм різниці між температурою  $U$  в будь-якій точці тіла та температурою навколишнього середовища  $t$  змінюється з плином часу  $\tau$  за лінійним законом, причому швидкість зміни логарифма  $m$  однакова для всіх точок.

Другим важливим практичним наслідком застосування теорії регулярного режиму є те, що якщо застосувати рівняння (5) до двох різних точок тіла з різною температурою  $U_1$  та  $U_2$  відповідно, та, віднявши почленно два отриманих рівняння, отримаємо (7).

$$\ln|U_1 - U_2| = -m \tau + const, \quad (7)$$

де  $const$  – незалежна від часу величина.

Якщо ж розглядати відношення температурних різниць  $\Theta_1$  та  $\Theta_2$  між температурою точки та середовища в двох різних точках тіла, тоді, враховуючи (4) та однаковість  $m$  для всіх точок тіла, отримуємо (8), це відношення також не залежить від часу  $\tau$ .

$$\frac{\Theta_1}{\Theta_2} = \frac{U_1(x_1, y_1, z_1)}{U_2(x_2, y_2, z_2)}. \quad (8)$$

Із вищезазначеного зрозуміло, що для того, щоб визначити, як змінюється температура в будь-якій точці тіла або системи, необхідно визначити темп нагрівання (охолодження)  $m$ . Визначення  $m$  доцільно проводити графоаналітичним способом. Для цього будується графік, по одній осі якого відкладаються значення часу  $\tau$ , по другій – логарифмічна шкала різниці  $U-t=\Theta$ . Для визначення  $m$  достатньо взяти на одній прямій напівлогарифмічного графіка дві точки  $B_1$  та  $B_2$ , які відповідають моментам часу  $\tau_1$  та  $\tau_2$  ( $\tau_1 > \tau_2$ ) і яким відповідають температури  $\Theta_1$  та  $\Theta_2$  ( $\Theta_1 > \Theta_2$ ), тоді:

$$m = \frac{\ln \Theta_1 - \ln \Theta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (9)$$

Ці висновки справедливі і для системи тіл.

Розглянемо процес охолодження заряду в гільзі в зовнішньому середовищі. Зауважимо, що нагрівання та охолодження тіла – схожі процеси, які відрізняються тільки напрямом вектора температурного градієнта, отже, всі залежності, отримані для процесу охолодження, повною мірою справедливі і для процесу нагрівання.

При розгляді процесу введемо наступні обмеження:

- теплові властивості системи (коефіцієнти температуропровідності  $\alpha_m$ , теплопровідності  $\lambda$ , питома теплоємність  $c$ ) приймемо постійними та такими, що не залежать від температури протягом розгляду процесу;
- абсолютний тепловий контакт між сусідніми тілами системи, тобто неперервність функції  $U - t = \Theta$ ;
- теплообмін із середовищем вважається незмінним, тобто умови  $\alpha = const, t = const$ , зберігаються протягом всього часу проведення вимірювань;

Для внесення поправки на температуру заряду необхідно визначити середньооб'ємну температуру заряду.

Для цього із залежності (9), шляхом двократного проведення вимірювання температури в точці на поверхні гільзи протягом періоду часу отримуємо значення температур гільзи  $U_{1T}$  та  $U_{2T}$  в моменти часу  $\tau_1$  та  $\tau_2$  відповідно, і за залежністю (9) отримуємо  $m$ .

Значення  $m$  однакове для всіх тіл системи, отже, з умови (8), яка справедлива і для середньооб'ємної температури тіла, отримуємо для заряду

$$\frac{\Theta_{23}}{\Theta_{13}} = e^{-m(\tau_2 - \tau_1)}, \quad (10)$$

де  $\Theta_{13}$  та  $\Theta_{23}$  – значення середньооб'ємних температур заряду відносно температури навколишнього середовища  $t$  в моменти часу  $\tau_1$  та  $\tau_2$  відповідно.

Зміна температури заряду викликає зміну його теплової енергії, яка через зміну середньооб'ємної температури виражена залежністю (11).

$$\Delta Q_3 = c_3 \rho_3 V_3 \Theta_3, \quad (11)$$

де  $c_3$  – питома теплоємність пороху;  
 $\rho_3$  – густина порохового заряду;  
 $V_3$  – об'єм порохового заряду.

Ця зміна теплової енергії викликає зміну середньооб'ємної температури тіл, які складають оболонку заряду та випромінювання через поверхні гільзи, кришки та дно гільзи. Отже, зміна теплової енергії дорівнює (12)

$$\begin{aligned} \Delta Q_3 &= \Delta Q_{\text{випр}} + \Delta Q_{\text{об'єм}} = \\ &= \bar{\alpha} S \Delta \vartheta + \sum c_i \rho_i V_i \Delta \Theta_{\text{об}}, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $\bar{\alpha}$  – середнє значення коефіцієнта теплообміну на поверхні;

$S$  – повна площа поверхні;

$\vartheta$  – середня температура поверхні;

$\Theta_{\text{об}}$  – середньооб'ємна температура оболонки відносно температури навколишнього середовища  $t$ ;

$c_i$  – питома теплоємність оболонки;

$\rho_i$  – густина порохового оболонки;

$V_i$  – об'єм порохової оболонки.

Темп охолодження  $m$  пов'язаний із коефіцієнтом  $\bar{\alpha}$  залежністю (13).

$$m = \bar{\alpha} \psi \frac{S}{\sum c_i \rho_i V_i}, \quad (13)$$

де  $\psi$  – характеристика нерівномірності теплового поля в тілі  $\Psi = \frac{\vartheta}{\Theta}$ .

У випадку використання гільз з металу (сталь, латунь) велика температуропровідність гільзи, значна вага та об'єм, у порівнянні із рештою тіл, які складають оболонку заряду боєприпасу, та порівняно невелика її товщина дозволяють припустити, що значення середньооб'ємної температури оболонки відносно температури навколишнього середовища,  $\Theta_{\text{об}}$ , середня температура поверхні  $\vartheta$  в будь-який момент часу, після настання регулярного режиму, практично не

відрізняються від температури в точці поверхні, тобто для оболонки  $\psi \approx 1$ , та  $\vartheta = \Theta_{\text{об}} = U$ .

Вирішуючи систему рівнянь, отримуємо значення середньооб'ємної температури заряду в момент часу  $\tau_2$

$$\Theta_{23} = \frac{\Delta U \sum c_i \rho_i V_i (m+1)}{c_3 \rho_3 V_3 (e^{-m\Delta\tau} - 1)} \cdot e^{-m\Delta\tau}. \quad (14)$$

## Висновки

Використання теорії регулярного теплового режиму для визначення температури заряду артилерійського боєприпасу полегшує вирішення задачі отримання відповідної аналітичної залежності між температурою на поверхні боєприпасу та температурою заряду всередині, тому що дозволяє уникнути визначення коефіцієнта теплообміну між боєприпасом і середовищем.

Такий метод визначення температури заряду не вимагає знаходження складних характеристичних функцій тіл, які можуть бути отримані лише для певних видів тіл на підставі вирішення диференціальних рівнянь теплопровідності.

## Список літератури

1. Стрельба и управление огнем наземной артиллерии: [учебник / под общ. ред. проф., д.т.н. Круковского А.С.]. – М.: Воениздат, 1975. – 541 с.
2. Шляхи підвищення точності вимірювання температури зарядів у наземній артилерії / П.С. Трофименко, В.І. Макеєв, А.Ф. Раскошній // Системи озброєння і військова техніка. Сумський державний університет, Суми – 2011. – № 1(25). – С. 58 – 60.
3. А.В. Лыков Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М.: "Высшая школа", 1967. – 600 с.
4. Г.М. Кондратьев Регулярный тепловой режим / Кондратьев Г.М. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 408 с.
5. Боєприпаси / [П.П. Ткачук, В.О. Чумакевич, О.М. Дробан та ін.]. – Львів: АСВ, 2012. – 296 с.

**Рецензент:** д.т.н., О.М. Купріненко, начальник кафедри бронетанкової техніки факультету бойового застосування військ Національної академії сухопутних військ, Львів.

### Определение температуры заряда артиллерийского боеприпаса на основе использования теории регулярного теплового режима

Ю.В. Шабатура, А.С. Міщенко

В статье рассмотрена проблема измерения температуры зарядов артиллерийских боеприпасов. Определены математические зависимости изменения температуры порохового заряда в среде с постоянной температурой на основе теории регулярного теплового режима.

**Ключевые слова:** артиллерия, баллистическая подготовка, температура заряда, измерение температуры, регулярный тепловой режим.

### Determining artillery ammunition charges temperature based on the regular thermal regime theory

Y. Shabatura, A. Mishchenko

In the article discussed artillery ammunition charges temperature measurement problem. Defined mathematical dependences of temperature change of powder charge in an environment with constant temperature based on the regular thermal regime theory.

**Keywords:** artillery, ballistic preparations, ammunition charges temperature, temperature measuring regular thermal regime theory.