

УДК: 614.842

Т.Я. Глова<sup>1</sup>, Б.М. Кузніцька<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

<sup>2</sup>Львівський національний аграрний університет, Дубляни

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РОЗПОДІЛУ ПО ТОВЩИНІ СТІНКИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ТАРИ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ БОЄПРИПАСІВ

Досліджено розподіл температури по товщині стінки дерев'яної тари для зберігання боєприпасів, зумовлений тепловим потоком пожежі. Розглянуто випадок, коли дерев'яна тара нагрівається від факела полум'я пожежі. При моделюванні процесу нагрівання стінки дерев'яної тари враховані крайові умови другого роду. Використовуючи перетворення Лапласа, отримано аналітичні вирази для дослідження температурного розподілу по товщині стінки дерев'яної тари в залежності від ступеня чорноти її поверхні. Показано, що ступінь чорноти поверхні стінки дерев'яної тари та величина теплового потоку полум'я пожежі значно впливають на величину температурного поля.

**Ключові слова:** тепловий потік пожежі, ступінь чорноти, температура, боєприпаси, дерев'яна тара.

### Постановка проблеми

Виникнення пожеж на складах для зберігання боєприпасів та вибухових речовин є досить актуальною проблематикою для сьогодення. На складах боєприпасів ЗСУ на даний час склалася ситуація, яку можна визначити як критичну і найнебезпечнішу. Про це свідчать події, які виникли неодноразово за короткий проміжок часу. Прикладами таких масштабних катастроф є бази під Новобогданівкою, Цвітохою, Лозовою та Балаклією. Основним фактором виникнення та швидке поширення таких пожеж на складах для зберігання боєприпасів є неправильне зберігання, а також неякісна вогнестійка обробка дерев'яної тари. Ліквідація пожежі на складах для зберігання боєприпасів, без масштабних наслідків, можлива лише у перші хвилини. Тому для запобігання таких наслідків виникає необхідність провести дослідження впливу вогнестійкої обробки на температурне поле по товщині стінки дерев'яної тари, в якій зберігаються боєприпаси.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним з найбільш поширених матеріалів для виготовлення тари є деревина та її модифікації, які за групою горючості відносяться до групи матеріалів середньої займистості. Так як вільний доступ кисню сприяє деструкції деревини і прискоренню процесу горіння, то для запобігання цього процесу обробляють тару вогнезахисним покриттям. Вогнезахисна обробка тари дозволяє надати деревині здатності протистояти дії полум'я та поширення його поверхнею. В залежності від

ефективності оброблення стінок тари, вогнезахисна деревина може класифікуватись як важкозаймиста або важкогорюча. Під дією теплового потоку виробу з деревини можуть займатися (при температурі близькій до 230 °С відбувається займання деревини сосни, а при значенні температури 420 °С – самозаймання). У працях [1,2,3] досліджується можливість вогнезахисту дерев'яної тари для зберігання боєприпасів за допомогою просочувальної суміші ДСА-2 та вогнезахисних покриттів “Фенікс-ДП” і “Фенікс-ДБ”. Але у зазначених працях не досліджено зміну інтенсивності теплового потоку в залежності від різниці температур факела полум'я пожежі і тари, а також не вказано, як впливає ступінь чорноти покриття стінок тари на тепловий потік в залежності від віддалі до пожежі. У роботі [4] відзначено, що гексоген ( $C_3H_6N_6O_6$ ) – вторинна вибухова речовина, що входить до складу найбільш небезпечних боєприпасів, має температуру спалаху 230 °С, а тротил ( $C_7H_5N_3O_6$ ) температуру спалаху – 290 °С. Тому, враховуючи фізико-хімічні характеристики та температуру плавлення гексогену 204,1 °С, критична температура для боєприпасів складає 190-200 °С.

### Формулювання мети статті

Основне місце пожежного навантаження становить деревина та виробу з неї. Так як деревина є одним з найбільш використовуваних матеріалів

для виготовлення тари для зберігання боєприпасів, то актуальним є дослідження вогнестійкості та запобігання виникнення вибухопожежонебезпеки. У випадку виникнення пожежі на складах для зберігання боєприпасів її поширення залежить від інтенсивності теплового потоку, який поглинається тарою. Тому досить важливим є дослідження температурного розподілу по товщині стінки тари в залежності від часу. Тобто потрібно встановити час, за який на внутрішній поверхні стінки тари досягнеться критична температура для вибуху боєприпасів. Температурне поле в стінці тари буде залежати від величини теплового потоку, відстані до факела полум'я пожежі, кутового коефіцієнта випромінювання та вогнестійкої обробки її поверхні.

### Виклад основного матеріалу

При дослідженні температурного поля по товщині стінки тари змодельовано її пластиною з товщиною  $2R$  і початковою температурою  $T_0$ . З деякого часу  $\tau = 0$ , який приймемо за початок відліку, пластина нагрівається тепловим потоком  $q$ . Потрібно визначити температурний розподіл по товщині стінки тари в будь-який момент часу.

Початок координат розмістимо в середній площині пластини, де вісь  $Ox$  лежить у площині перерізу пластини і перпендикулярна до площини стінки тари.

Для визначення температурного розподілу по товщині стінки тари розв'язано диференціальне рівняння [5]

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$(\tau > 0; -R < x < R);$$

з початковою умовою

$$T(x, 0) = T_0; \quad (2)$$

та граничними умовами другого роду

$$-\frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} + \frac{q_c}{\lambda} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

де  $T(x, \tau)$  – нестационарна температура в поперечному перерізі пластини,  $^{\circ}C$ ;

$T_0$  – початкова температура конструкції,  $^{\circ}C$ ;

$\pm R$  – бокові поверхні пластини,  $m$ ;

$q_c$  – тепловий потік, що поглинається бічною поверхнею конструкції  $x = R$ ,  $Bt/m^2$ ;

$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$  – коефіцієнт теплопроводності,

$m^2/c$ ;  $c_p$  – теплоємність,  $\frac{Дж}{кг \cdot K}$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопроводності,  $\frac{Вт}{м \cdot K}$ ;

$\rho$  – густина дерева,  $\frac{кг}{м^3}$ .

При дослідженні теплообміну випромінювання між факелом полум'я пожежі та стінкою тари потрібно визначити кількість енергії випромінювання факела, яка поглинається стінками тари. Для цього використаємо закон Стефана-Больцмана [6]

$$q_c = 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot \Psi_{1-2}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_{1-2} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}$  – зведений ступінь

чорноти системи “полум'я-тара”;  $\varepsilon_1$  – ступінь чорноти поверхні стінки тари;  $\varepsilon_2$  – ступінь чорноти факела полум'я;  $\Psi_{1-2}$  – кутовий коефіцієнт випромінювання;  $T_1$  – температура поверхні тари,  $K$ ;  $T_2$  – температура факела,  $K$ .

Для дослідження інтенсивності теплового потоку потрібно визначити кутовий коефіцієнт випромінювання.

Якщо ширина факела дорівнює  $c$ , ширина дерев'яної тари  $b$ , а віддаль між ними  $h$ , то кутовий коефіцієнт випромінювання визначається наступним чином [6]

$$\Psi_{1-2} = \frac{1}{2 \cdot \frac{c}{h}} \cdot \left( \sqrt{\left( \frac{b+c}{h} \right)^2 + 4} - \sqrt{\left( \frac{b-c}{h} \right)^2 + 4} \right) \quad (6)$$

За формулою (6) проведені розрахунки кутового коефіцієнта випромінювання. При розрахунках прийнято  $c = 2$  м,  $b = 1$  м. Графічні залежності кутового коефіцієнта випромінювання факела полум'я пожежі від відстані до тари досліджувались в роботах [7,8].

Використовуючи формулу (5), графічно досліджено зміну інтенсивності теплового потоку в залежності від віддалі між факелом полум'я та стінками тари з різними ступенями чорноти. При розрахунку приймалися такі вихідні дані: температура факела пожежі  $T_2 = 1300$  К, температура поверхні тари в початковий момент часу  $T_1 = 300$  К, ступінь чорноти факела полум'я  $\varepsilon_2 = 0.9$ .

Аналіз рис. 1 показує, що при зменшенні ступеня чорноти стінки тари відповідно зменшується тепловий потік, який поглинається поверхнею тари. Аналіз графічних досліджень показує, що найбільша інтенсивність теплового потоку між факелом полум'я і тарою спостерігається на віддалі  $h$  від 1 м до 8 м, а при віддалі більше 8 м інтенсивність теплового потоку значно зменшується.

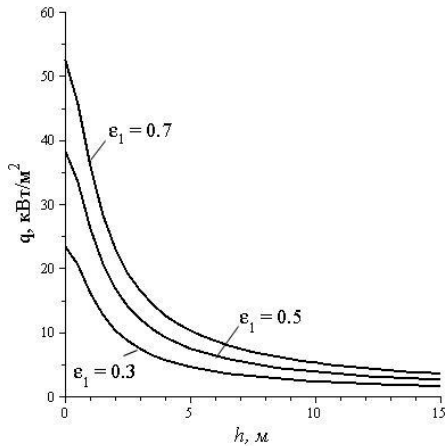


Рис. 1. Залежність інтенсивності теплового потоку від віддалі між факелом полум'я та стінками тари

Визначимо залежність теплового потоку від різниці температур факела пожежі і стінок тари.

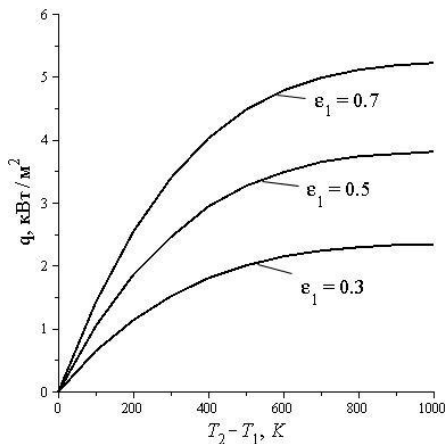


Рис. 2. Залежність інтенсивності теплового потоку від різниці температур між факелом полум'я та стінками тари при  $h=10$  м

Аналіз графічних залежностей на рис. 2 показує, що в початковий момент пожежі  $T_2 - T_1 = 1000$  К і для  $\epsilon_1 = 0.7$  тепловий потік рівний  $5.21$  кВт/м<sup>2</sup>, а при подальшому нагріванні тари тепловий потік зменшується до нуля, тобто встановлюється тепла рівновага.

Розв'язок диференціального рівняння (1) – (4) отримаємо методом інтегральних перетворень Лапласа

$$T(x, \tau) = T_0 + \frac{q_c}{\lambda} \cdot \left[ \frac{a\tau}{R} - \frac{R^2 - 3x^2}{6R} + R \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2} \cos\left(\mu_n \frac{x}{R}\right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} \right], \quad (7)$$

де  $\mu_n = \pi n$  – характеристичні числа,  $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$ .

Розрахунки проводились за формулами (5)–(7) при таких параметрах:

$$R = 0.03 \text{ м}, \quad T = 1300 \text{ К}, \quad T_0 = 300 \text{ К},$$

$$\lambda = 0.174 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad a = 0.113 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

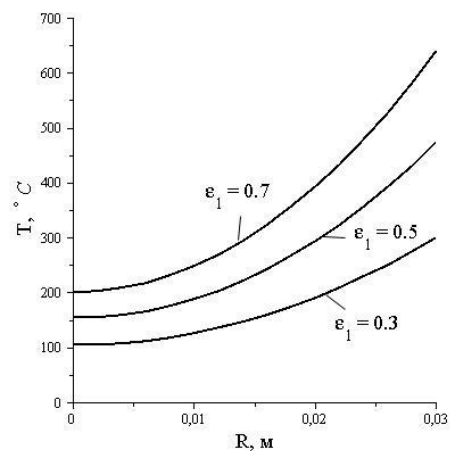


Рис. 3. Температурний розподіл по товщині стінки тари в залежності від ступеня чорноти поверхні  $\tau = 47$  хв,  $h = 10$  м

Результати дослідження температурного поля по товщині стінки тари при  $h = 10$  м зображені графічно на рис. 3.

Розглянемо вплив теплового потоку на температурний розподіл по товщині стінки тари на віддалі  $h = 7$  м.

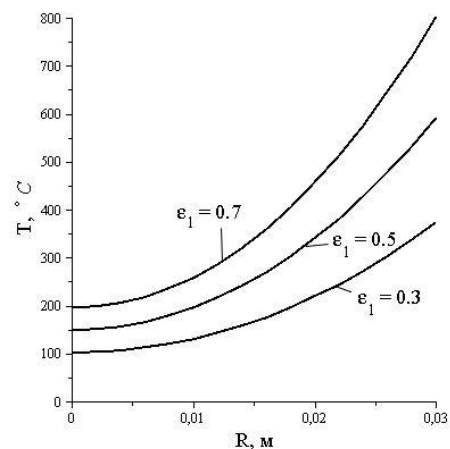


Рис. 4. Температурний розподіл по товщині стінки тари в залежності від ступеня чорноти поверхні  $\tau = 38$  хв,  $h = 7$  м

Як впливає з графічних залежностей рис. 3 і рис. 4, температурний розподіл по товщині стінки тари суттєво залежить від ступеня вогнезахисної обробки поверхні конструкції. Показано, що чим менший ступінь чорноти поверхні стінок тари, тим більший ступінь захисту має конструкція. Так, для  $\varepsilon_1 = 0.3$  температура на внутрішній поверхні стінки тари дорівнює  $104^\circ\text{C}$ , а на зовнішній поверхні  $300^\circ\text{C}$  при  $\tau = 47$  хв і  $h = 10$  м. В той же час при  $\varepsilon_1 = 0.7$  температура на внутрішній поверхні конструкції буде рівна  $200^\circ\text{C}$ , яка є критичною для спрацювання вибуху боєприпасів.

### Висновки

1) Враховуючи всі фактори та фізичні параметри тари і факела полум'я, проведені дослідження, які дають можливість визначити безпечну відстань тари до полум'я пожежі в залежності від інтенсивності теплового потоку та чорноти поверхні тари.

2) Знайдено температурний розподіл по товщині стінки тари в залежності від часу. Дослідження дають змогу визначити час, за який на внутрішній поверхні стінки тари досягнеться критична температура ( $200^\circ\text{C}$ ), що дає змогу запобігти вибухопожежонебезпеці.

3) Показано, що при віддалі  $h = 10$  м і  $\varepsilon_1 = 0.7$  критична температура для спрацювання боєприпасів  $200^\circ\text{C}$  досягається за 47 хв, а при  $h = 7$  м і  $\varepsilon_1 = 0.7$  – за 38 хв. В той же час при  $\varepsilon_1 = 0.3$  температура на внутрішній поверхні тари не перевищує  $105^\circ\text{C}$ .

### Список літератури

1. Цапко Ю. В. Дослідження умов займання деревини в залежності від параметрів нагрівання / Ю. В. Цапко, С. В. Жартовський // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. Львів: – ЛДУБЖД, 2007. – Вип. 10. – С. 144–149.
2. Цапко Ю. В. Дослідження процесів теплопровідності вогнезахисної дерев'яної тари для зберігання озброєння та боєприпасів / Ю. В. Цапко, В. М. Жартовський, М. Є. Карташов // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУБЖД, 2009. – Вип. 14. – С. 97–104.
3. Цапко Ю. В. Визначення параметрів вогнезахисту дерев'яної тари для зберігання елементів озброєння військової техніки / Ю. В. Цапко, Є. В. Нікітін, Ю. П. Мосейчук // Науковий вісник УкрНДПБ, 2010. – №1(21). – С. 103–107.
4. Савченко О. В. Обґрунтування використання гелеутворюючих систем для запобігання надзвичайних ситуацій на складах зберігання артилерійських боєприпасів / О. В. Савченко, Є. І. Стецюк, О. О. Острроверх, Г. В. Іванець // Збірник наукових праць, Випуск 22, 2015. – С. 106–112.
5. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
6. Зигель Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хуелл. – М.: Мир, 1975. – 936 с.
7. Глова Т. Я. Вогнестійкість спеціалізованої тари для зберігання боєприпасів / Т. Я. Глова // Військово-технічний збірник – Львів: НАСВ – №17, 2017. – С. 50–53.
8. Глова Т. Я. Моделювання та дослідження інтенсивності теплових потоків полум'я пожежі на дерев'яну тару для зберігання боєприпасів / Т. Я. Глова // Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ”. – Львів: НАСВ, 2017. – С. 262.

**Рецензент:** д.т.н., проф. М.М. Семерак, Національний університет «Львівська політехніка», Львів.

### Математическое моделирование и исследование температурного распределения по толщине стенки специализированной тары для хранения боеприпасов

Т.Я. Глова, Б.Н. Кузницкая

Исследовано распределение температуры по толщине стенки деревянной тары для хранения боеприпасов, обусловлено тепловым потоком. Рассмотрен случай, когда деревянная тара нагревается от факела пламени пожара. При моделировании процесса нагрева стенки деревянной тары учтены краевые условия второго рода. Используя преобразования Лапласа получены аналитические выражения для исследования температурного распределения по толщине стенки деревянной тары в зависимости от степени черноты ее поверхности. Показано, что степень черноты поверхности стенки деревянной тары значительно влияет на величину температурного поля.

**Ключевые слова:** тепловой поток, степень черноты, температура, боеприпасы, деревянная тара.

### Mathematical modeling and research of the temperature distribution of the wall thickness of specialized containers for the storage of ammunition

T. Hlova, B. Kuznitska

The main factor in the emergence and rapid spread of such fires in storage facilities for ammunition is improper storage, as well as poor-quality fire-resistant handling of wooden containers. Therefore, in order to prevent such effects, it is necessary to conduct a study of the effect of fire-resistant treatment on the temperature field on the thickness of the wall of the wooden container in which the ammunition is stored.

In this paper we research the intensity of the heat flux of a flame of fire, which is absorbed by the wooden container depending on the distance from the flame to the walls of the container, as well as the degree of blackness of its coating. Taking

into account all the factors and physical parameters of container and fire, the studies conducted allow to determine the safe distance of the container to the flame of the fire depending on the intensity of the heat flow and degree of blackness of its surface, and also the distribution of temperature of the thickness of the wooden container wall, depending from the time, is investigated. The studies provide an opportunity to determine the time at which the critical temperature for handling ammunition will reach the inner surface of the container wall, which will prevent the risk of explosion and fire.

The temperature distribution of the thickness of the wooden container wall for the storage of ammunition, caused by the heat flux of the fire, was investigated. It is shown that the degree of blackness of the surface of the wooden container wall greatly affects the value of the temperature field. To research the intensity of the heat flux used Stefan-Boltzmann law. We used the Laplace transformation to research the temperature distribution of the thickness of the wall of the wooden container, depending on the degree of blackness of its surface. When modeling the heating process of a wooden container wall we used the second boundary condition.

**Keywords:** heat flow, degree of blackness, temperature, ammunition, wooden container.

---

УДК 623.5

О.М.Дробан, Е.Ф.Жогальський

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

## ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СТРІЛЬБИ ЗІ СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ

У роботі авторами проводиться дослідження існуючих методів визначення ефективності стрільби зі стрілецької зброї. В умовах подальшого розвитку та переоснащення Збройних Сил України сучасними зразками озброєння постає питання щодо з'ясування параметрів оцінки ефективності застосування перспективних зразків стрілецької зброї як з використанням математичних моделей, так і в процесі полігонних випробувань з метою визначення доцільності прийняття їх на озброєння. Проведений аналіз існуючих методик дозволив визначити основні критерії, по яких можливе проведення оцінки ефективності стрільби зі стрілецької зброї.

**Ключові слова:** властивості зброї, критерії оцінки, параметри ефективності, ймовірність.

### Постановка проблеми

У процесі переоснащення підрозділів Сухопутних військ Збройних Сил України новітніми зразками стрілецької зброї відбувається модернізація існуючої та прийняття на озброєння нової зброї, що ставить завдання забезпечення підрозділів такою зброєю, властивості якої забезпечували б ураження заданих цілей в різних умовах бойового застосування. Властивості зброї тісно пов'язані з поняттям «вимоги до зброї». Вимоги виступають як бажані властивості, а властивості – як реалізовані вимоги. В свою чергу від властивостей зброї напряму залежить ефективність її застосування.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню дослідження ефективності стрільби зі стрілецької зброї присвячена велика кількість наукових праць. Теоретичні дослідження пов'язані з авторами Благодіровим А.А., Шерешевським М.С., Кириловим В.М. та багатьма іншими. У цих роботах детально розкривається порядок визначення ефективності стрільби зі стрілецької зброї. Однак

сьогодні виникла необхідність визначення бойової ефективності стрілецької зброї, оснащеної новітніми прицільними пристосуваннями (коліматорні та тепловізійні приціли), різноманітними додатковими пристосуваннями, а також при стрільбі по цілях у засобах індивідуального захисту.

### Формулювання мети статті

**Мета статті** – аналіз існуючих підходів щодо визначення ефективності стрільби та методів розрахунку показників ефективності. Узагальнення основних критеріїв оцінки ефективності стрільби зі стрілецької зброї.

### Виклад основного матеріалу

В деяких літературних джерелах автори поділяють всю сукупність властивостей зброї на дві групи: службово-експлуатаційні та виробничо-економічні. Але, на нашу думку, варто приєднатись до тих спеціалістів [5], які розподіляють властивості зброї на чотири групи: бойові, конструктивні, службово-експлуатаційні та виробничо-економічні.

Під бойовими властивостями розуміється сукупність таких властивостей зброї, які