

damping in the suspension system, which exerts an impact, reducing the probability of hitting the striking elements by ensuring high mobility, maneuverability and evasion of the hull, are considered.

The functional relationship between the improvement of the suspension system, the mutual agreement of its characteristics with the characteristics of the weapon complexes, power plant and transmission and the improvement of the indicators of the main groups of tactical and technical characteristics of armored fighting vehicles has been established. Based on the analysis of development trends, the potential was assessed and the main directions of the development of the suspension system were formulated, which will fundamentally affect the fulfillment of modern and promising operational and tactical requirements and will lead to a significant increase in the tactical and technical characteristics of armored fighting vehicles. These are: the use of hydropneumatic suspensions, the introduction of non-traditional control systems for the characteristics of suspension nodes based on the use of "intelligent" materials, in particular magnetorheological elastomers, the use of friction shock absorbers and new kinematic suspension schemes with significantly increased dynamic travel, as well as the use of energy recovery systems of suspension damping devices.

Keywords: armored combat vehicle, tactical and technical characteristics, suspension system, firepower, mobility, security.

УДК 355.4, 623.626

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.31.2024.20-26>

І.І. Танцюра¹, К.В. Коритченко², О.В. Стаховський³, А.О. Задорожний³

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

² Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків

³ Національний Університет Оборони, Київ

Article history: Received 01 September 2024; Revised 10 September 2024;

Accepted 04 November 2024

ОБҐРУНТУВАННЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ ДО МОДЕЛІ НАГРІВАННЯ ГРАФІТНОГО ПОРОШКУ У ВИПУСКНОМУ ГАЗОХОДІ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ТАНКА ТИПУ Т-64Б

Робота спрямована на розширення спектру маскувальної дії аерозольної завіси, що створюється термічною димовою апаратурою танка типу Т-64Б, з видимої до дальньої інфрачервоної області електромагнітного випромінювання. Удосконалення димової апаратури танка досягається почерговим введенням графітового порошку та дизельного палива у потік відпрацьованих газів силової установки танка. Для подальшого математичного моделювання нагрівання графітного порошку у випускному газоході з метою виявлення умов щодо термічного спучення часток графіту здійснено обґрунтування граничних умов до моделі. Визначено масову витрату, термодинамічні параметри та хімічний склад відпрацьованих газів танка. Обґрунтовано масову витрату та розмір часток графіту, що необхідно подавати термічною димовою апаратурою.

Ключові слова: Т-64Б, термічна димова апаратура, графіт, що спучується, аерозольне маскування, танк.

Постановка проблеми

Спорядження танків термічною димовою апаратурою (ТДА) значно підвищує живучість бойових машин шляхом їх швидкого та ефективного маскуванню у видимому діапазоні випромінювання. Але розвиток засобів прицілювання до бойових машин та активних головок самонаведення до ракетно-артилерійських боєприпасів, які працюють у інфрачервоної області випромінювання, призвів до суттєвого зниження ефективності існуючих засобів маскуванню. Актуальним є вирішення задачі розширення спектру маскуванню ТДА. Тому робота спрямована

на удосконалення ТДА бойових машин, зокрема танків типу Т-64. Водночас розширення спектру маскуванню аерозольного складу за допомогою ТДА не проведено.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Огляд літератури щодо засобів утворення маскувальної завіси у інфрачервоному спектрі випромінювання показав, що у роботі [1] запропоновано формування маскувальної завіси з води для маскуванню техніки від ракет з головками самонаведення в інфрачервоному діапазоні випромінювання, або

створення хибної теплової цілі. За розробкою передбачено формування маскувальної завіси з парогазової суміші в результаті пострілу водою з водометної гармати, внаслідок чого під дією опору повітря на водневий струмінь відбувається подрібнення струменя води на дрібнодисперсну парогазову суміш. Перевагою такого методу маскувannya є швидкодія у створенні маскувальної завіси, а також можливість створення такої завіси з верхньої проєкції бойові машини, де танк, як правило, є менш захищеним. Застосування маскувальної завіси за допомогою парогазової суміші робить дешевим процес маскувannya та не призводить до забруднення довкілля. У разі маскувannya у дальній інфрачервоній області випромінювання розмір крапель перевищує 14 мкм, що призводить до швидкого осідання крапель парогазової суміші під дією сили тяжіння. Також замерзання крапель води у холодну пору року не дозволяє використовувати її для маскувannya. Зниження температури замерзання рідини досягають шляхом додавання до води низькозамерзальної рідини, наприклад, триетиленгліколю [2].

У роботі [3] запропоновано встановлення системи маскувannya на автомобіль для імпульсного його покриття маскувальною завісою (рис. 1).

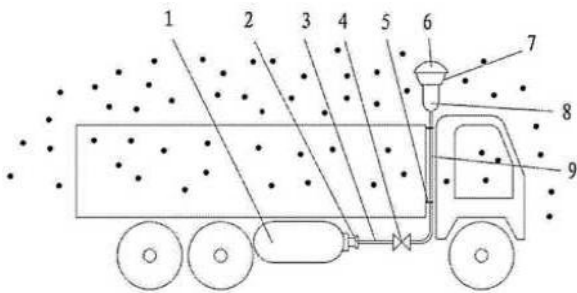


Рис. 1. Система аерозольного маскувannya автомобіля: за патентом [3]

Система працює наступним чином. Суміш, що має у своєму складі дрібнодисперсні частки, попередньо розміщують у герметичній ємності 8 з кришкою 6. За сигналом відкривається електромагнітний клапан 4, що призводить до подавання стисненого повітря з балона 1 через з'єднання 2 та трубопроводи 3 та 9 до розпилювача 7.

Перевага такої системи маскувannya полягає у використанні систем автомобіля, таких як балон зі стисненим повітрям та автомобільний компресор у системі маскувannya. Таким чином, зменшується вартість системи та спрощується її розміщення на автомобілі. Система передбачає застосування дрібнодисперсних часток парогазової суміші, які забезпечують маскувannya в інфрачервоному діапазоні. Разом з тим, запропонована система має обмеження у розмірі маскувальної завіси та можливість постановки лише однієї завіси за одне заряджання.

Формування мети статті

Полягає у подальшому удосконаленні димової апаратури танка типу Т-64Б, що досягається почерговим введенням графітового порошку та дизельного палива у потік відпрацьованих газів силової установки танка; у визначенні геометричного профілю каналу, через який протікають відпрацьовані гази силової установки двигуна, температури стінок газоходу, термодинамічних параметрів та хімічного складу відпрацьованих газів танка, масової витрати та розміру часток графіту, що нагнітається, термодинамічних параметрів газу на виході з газоходу.

Виклад основного матеріалу

Удосконалення будови тракту нагнітання термічної димової апаратури танка Т-64Б набуває вигляд, показаний на рис. 2.1.

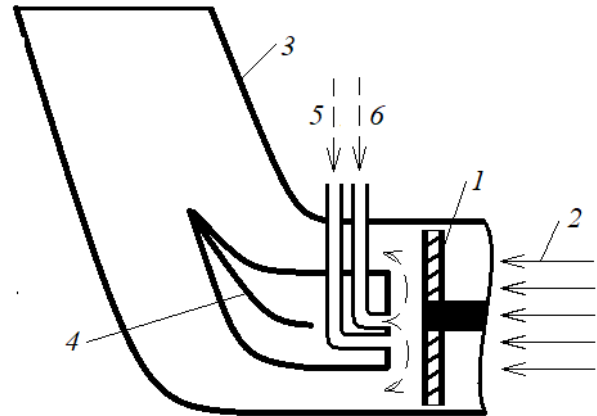


Рис. 2. Будова тракту нагнітання термічної димової апаратури танка:

1 – турбіна; 2 – гарячі гази; 3 – газохід; 4 – спрямовувач;
5 – канал нагнітання дизельного палива;
6 – канал нагнітання графіту

За цієї будови нагнітання графіту та дизельного палива відбувається у газохід 3, який з'єднаний з турбіною 1 двигуна типу 5ТДФ. Через турбіну у газохід спрямовуються гарячі гази 2. Переспрямування гарячого газового потоку у газохіді відбувається за допомогою спрямовувача 4. Нагнітання дизельного палива відбувається через канал 5, а графіту – через канал 6. Потоки дизельного палива та аерозольної завіси графіту є зустрічними до основного потоку гарячого відпрацьованого газу двигуна.

Тому потоки з аерозолеутворювальною рідиною розвертаються у напрямку основного потоку. Таке розвертання обумовлює затримку у часі перебування графіту у гарячих газах, чим підвищується час нагрівання графіту.

Формування аерозольної завіси відбувається наступним чином. Через канал 5 починається подавання дизельного палива. Це паливо потрапляє у

потік гарячих газів та випаровується. Далі пари палива виходять через ежекційну систему у зовнішнє середовище, де відбувається конденсація пари з формуванням аерозолі на основі крапель дизельного палива. Через декілька десятків секунд подача дизельного палива припиняється, а через канал б подається графіт. Потрапляння графіту у потік гарячих газів призводить до його спучення. Далі спучені частки через ежекційну систему потрапляють у зовнішнє середовище, де формують завісу у повітрі зі спучених часток графіту. Після декілька десятків секунд подача графіту припиняється, а подача дизельного пального розпочинається. І далі такий процес почергової подачі повторюється протягом декількох хвилин. В результаті, аерозольна завіса утворюється зі смугами різних складових завіси.

Для практичної реалізації є важливим доступність графіту в Україні. Наявні родовища графіту в Україні, що розглянуті в роботах [8–10, 13], свідчать про відсутність цієї проблеми в нашій державі.

Для здійснення моделювання нагрівання графітного порошку у випускному газозоді необхідно визначити: геометричний профіль каналу, через який протікають відпрацьовані гази силової установки двигуна, температуру стінок газозоду, масову витрату, термодинамічні параметри та хімічний склад відпрацьованих газів танка, масову витрату і розмір часток графіту, що нагнітається, термодинамічні параметри газу на виході з газозоду тощо.

Для визначення параметрів відпрацьованих газів силової установки двигуна типу 5ТДФ скористаємося роботами [4–7]. Параметри танкових двигунів, за якими можливо визначити розрахункові умови, наведено у табл. 1.

Температура газів на виході із двигуна залежить від умов його навантаження, обертів тощо. Як правило, температура газів вимірюється на номінальних обертах двигуна та навантаженні у 75% від максимальної вихідної потужності двигуна. Тому приймаємо, що встановлення завіси відбувається в умовах, наближених до розглянутих.

Таблиця 1

Параметри танкових двигунів для визначення розрахункових умов

Показники	Двигун	
	5ТДФ	6ТД-1
Коефіцієнт надлишку повітря	1,8	1,8
Дійсний ступінь стиску	16,5	15,0
Частота обертання, хв^{-1}	2800	2800
Температура газів на виході із двигуна, $^{\circ}\text{C}$	550	560
Коефіцієнт наповнення	0,73	0,75
Коефіцієнт продувки	1,37	1,31
Хід поршня, мм	2x120	2x120
Площа поршня, см^2	113	113
Кількість циліндрів	5	6

Розрахунок витрати повітря через двигун проведемо наступним чином. Об'єм V_u 1-го циліндра двигуна із зустрічно-рухомими поршнями визначимо за рівнянням

$$V_u = 2 \cdot h_n \cdot S_n \quad (1)$$

де h_n – хід поршня; S_n – площа поршня.

Застосувавши дані табл. 1, отримуємо об'єм 1-го циліндра $V_u = 2 \cdot 120 \cdot 10^{-3} \cdot 113 \cdot 10^{-4} = 2,712 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Враховуючи той факт, що двигун 5ТДФ є двотактним, то за один оберт двигуна відбувається як наповнення циліндра двигуна, так і його продувка після згорання. Застосовуючи параметри газообміну цього двигуна, об'єм повітря, що проходить через циліндр двигуна, визначимо за рівнянням

$$V_n = (k_n + k_{np}) \cdot V_u \quad (2)$$

де k_n – коефіцієнт наповнення; k_{np} – коефіцієнт продувки.

Скориставшись даними табл. 1, визначаємо об'єм повітря, що проходить через 1 циліндр двигуна типу 5ТДФ, який дорівнює

$$V_n = (0,73 + 1,37) \cdot 2,712 \cdot 10^{-3} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Масову витрату повітря через двигун визначимо за наступним виразом

$$q_m = n \cdot \rho_n \cdot V_n \cdot \frac{f}{60} \quad (3)$$

де n – кількість циліндрів; ρ_n – густина повітря; f – частота обертання двигуна у $[\text{хв}^{-1}]$.

Застосовуючи вищезазначені значення та дані табл. 1, отримуємо масову витрату повітря

$$q_m = 5 \cdot 1,29 \cdot 5,7 \cdot 10^{-3} \cdot 2800 / 60 = 1,717 \text{ кг/с.}$$

До витрати повітря слід додати витрату палива, яке вводиться у двигун. Масову витрату палива розрахуємо наступним чином. За визначенням, коефіцієнт надлишку повітря є відношення дійсної кількості повітря до теоретично необхідного. Звідси, масу повітря V_{cz} у циліндрі, яка реагує з паливом на експлуатаційному режимі роботи двигуна, визначимо за рівнянням

$$V_{cz} = \frac{V_u}{k_{nos}} \quad (4)$$

де k_{nos} – коефіцієнт надлишку повітря.

З виразу 4 отримуємо $V_{cz} = 2,712 \cdot 10^{-3} / 1,8 = 1,51 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Тоді масова витрата палива визначиться за рівнянням

$$q_n = n \cdot \frac{\rho_n \cdot V_{cz} \cdot f}{k_{cm}} \cdot \frac{f}{60} \quad (5)$$

де k_{cm} – стехіометричне співвідношення «повітря–дизельне пальне».

Відомо, що дизельне пальне є сумішшю парафінових, нафтонових і ароматичних вуглеводнів. Тому стехіометричне співвідношення може набувати

різних значень, але в певному діапазоні. Дослідження стехіометричного масового складу повітряно-паливної суміші алканів наведено в роботах [14–16]. Основними компонентами дизельного пального є такі алкани, як гексан, октан і декан. Тому в першому наближенні можна застосувати значення стехіометричного співвідношення для важких алканів, що наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Стехіометричне співвідношення повітряно-паливних сумішей за даними роботи

№	Паливо	Хімічна формула	Стехіометричне співвідношення
1	Октан	C_8H_{18}	15,10:1
2	Нонан	C_9H_{20}	15,06:1
3	Декан	$C_{10}H_{22}$	15,03:1

Скористаємось стехіометричним співвідношенням для суміші повітря з додеканом, за виразом 2.5 отримуємо

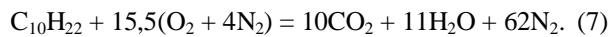
$$q_n = 5 \cdot (1,29 \cdot 1,51 \cdot 10^{-3} / 15,03) \cdot 2800 / 60 = 0,03 \text{ кг/с.}$$

Повну масову витрату газу через двигун визначаємо за рівнянням

$$q_{full} = q_m + q_n. \quad (6)$$

З рівняння 6 маємо $q_{full} = 1,717 + 0,03 = 1,72 \text{ кг/с}$. Порівняння значень масової витрати повітря та палива свідчать про незначний вплив витрати палива на повну витрату газу.

Визначимо хімічний склад відпрацьованих газів танка, припустивши, що переважно до складу дизельного палива входить декан. Тоді процес згорання дизельного палива у повітрі за стехіометричного співвідношення визначимо за рівнянням

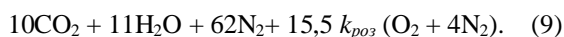


Якщо урахувати коефіцієнти надлишку повітря, наповнення та продувки, то коефіцієнт розбавлення продуктів згорання повітрям визначиться за виразом

$$k_{роз} = k_{нов} \cdot (k_n + k_{np}). \quad (8)$$

З урахуванням вищевказаних значень коефіцієнтів маємо $k_{роз} = 1,8 \cdot (0,73 + 1,37) = 3,78$.

На підставі цих розрахунків отримуємо склад продуктів згорання у вигляді



Для перерахунку об'ємної частки компонентів у їх масову частку використаємо значення молярної маси компонентів (табл. 3).

Таблиця 3

Молярна маса компонентів продуктів згорання танкового двигуна

Компонент	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
Молярна маса, г/моль	44	18	28	32

На підставі молярних коефіцієнтів рівняння 9 та молярної маси компонентів, що наведено в табл. 3, отримуємо наступне масове співвідношення компонентів у продуктах згорання на виході з турбіни двигуна, що наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Результати розрахунку масової частки компонентів у продуктах згорання танкового двигуна (на виході з турбіни)

Компонент	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
Масова частка	0,04	0,02	0,77	0,17

Наявність достатньо великої кількості кисню у продуктах згорання дозволяє, за потреби, здійснити додаткове підігрівання відпрацьованих газів двигуна за рахунок реалізації додаткового згорання у випускному газоході.

Масову витрату графіту, який подається в удосконаленій термічній димовій апаратурі танка Т-64Б, визначимо за витратами енергії на підігрівання графіту та теплової потужності відпрацьованих газів двигуна. Приймаємо, що в результаті розігрівання графіту його температура досягає температури відпрацьованих газів двигуна. За цим припущенням отримаємо рівняння у вигляді

$$C_{p_{гв}} \cdot q_{full} \cdot (T_{0_{гв}} - T_p) = C_{p_{гз}} \cdot q_{гз} \cdot (T_{0_{гз}} - T_p) \quad (10)$$

де $C_{p_{гв}}$ – питома теплоємність відпрацьованих газів за сталого тиску; $T_{0_{гв}}$ – початкова температура відпрацьованих газів; T_p – температура відпрацьованих газів та графіту в умовах температурної рівноваги; $C_{p_{гз}}$ – питома теплоємність графіту; $q_{гз}$ – витрата графіту; $T_{0_{гз}}$ – початкова температура графіту.

Відомо, що спучування графіту починається коли його температура досягає 200 °С. В той же час, найбільший коефіцієнт спучування досягається за температури 1100 °С. Для досягнення найбільшої продуктивності за найбільшого коефіцієнта спучування у прийнятих умовах роботи термічної димової апаратури танка, де $T_{0_{гв}} = 550$ °С, приймаємо $T_p = 450$ °С. У першому наближенні приймаємо, що $C_{p_{гв}} = 1,006$ кДж/(кг·К), бо основна частка відпрацьованих газів складається з повітря. Питома теплоємність графіту дорівнює $C_{p_{гз}} = 750$ Дж/(кг·К). Приймаємо, що початкова температура графіту дорівнює $T_{0_{гз}} = 20$ °С. За цих значень та раніше визначеної витрати відпрацьованих газів з рівняння 10 маємо витрату графіту, що дорівнює $q_{гз} = 0,537$ кг/с. Якщо припустити, що $T_p = 350$ °С, то маємо $q_{гз} = 1,398$ кг/с. За $T_p = 300$ °С, маємо $q_{гз} = 2,136$ кг/с. Виявлення найкращої витрати графіту потребує можливе за результатами експериментальних досліджень. В розрахунках приймалось $q_{гз} = 2$ кг/с.

Промисловість випускає порошок графіту з різним розміром часток графіту. В розрахунках приймалось, що розмір часток порошкового графіту дорівнює 5 мкм та 50 мкм.

Для здійснення моделювання створювалась модель газоходу у системі автоматизованого проектування «Компас». Далі здійснювалось перенесення геометрії внутрішніх каналів газоходу до програмного пакета кінцево-елементного аналізу ANSYS. Зовнішній вигляд газоходу та вигляд газоходу у перетині відображено на рис. 3.

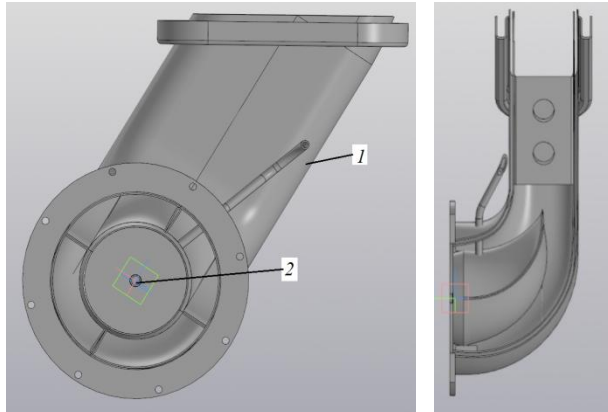


Рис. 3. Зовнішній вигляд газоходу (ліворуч) та вигляд газоходу у перетині (праворуч):

1 – газохід, 2 – канал нагнітання графіту

Виходячи з будови силової установки танка Т-64 відстань між торцем газоходу та турбіною дорівнює 100 мм. Тому в моделі приймалося, що нагнітання відпрацьованих газів відбувається у площині, що віддалена від торця газоходу на вказану відстань. Далі газ рухається по каналу круглого перетину до місця входу в газохід.

Температура стінок газоходу змінюється під час експлуатації машини. Перед початком пуску двигуна, коли машина перебувала тривалий час на стоянці, його температура дорівнює температурі довкілля. На працюючому двигуні температура стінок газоходу суттєво зростає з наближенням до температури відпрацьованих газів двигуна. Враховуючи не обхідність оцінки роботи термічно-димової апаратури за короткий час після пуску двигуна, в розрахунках температура стінок приймалась сталою, та дорівнювала 100 °С.

Висновки

Запропоновано напрям удосконалення термічної димової апаратури танка Т-64Б шляхом введення, окрім дизельного палива, графіту, що спучується, у потік гарячих відпрацьованих газів силової установки танка для розширення спектру маскувальної дії аерозольної завіси. Удосконалення полягає у почерговому імпульсно-періодичному введенні у потік гарячих відпрацьованих газів силової установки танка графіту та дизельного палива.

Обґрунтовано граничні умови до моделі нагрівання графітного порошку у випускному газоході силової установки танка типу Т-64Б. Визначено геометричний профіль каналу, через який протікають

відпрацьовані газу силової установки двигуна, температуру стінок газоходу, масову витрату, термодинамічні параметри та хімічний склад відпрацьованих газів танка, масову витрату та розмір часток графіту, що нагнітається, термодинамічні параметри газу на виході з газоходу. У розрахунках приймалась масова витрата відпрацьованих газів 1,72 кг/с з масовою часткою компонентів $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2/\text{O}_2$, що дорівнює 4:2:77:17. Масова витрата графіту дорівнювала 2 кг/с з розміром часток порошкового графіту 5 мкм та 50 мкм. Температура стінок газоходу приймалась сталою та дорівнювала 100 °С.

Список літератури

1. Method of generating a liquid mist: patent US 6,402,045 B1: Int.Cl. B05B17/00. Application Number 09/445463; Filing Date 12/20/1999; Publication Date 06/11/2002. 5 p.
2. Спосіб формування димової завіси: патент 2374214 РФ: МПК С06D 3/00, F41H 9/06, F42B 5/155. № 2007131605/12; заявл. 20.08.2007; опубл. 27.11.2009 Бюл. № 33. 5 с.
3. A kind of gas blowout formula camouflage with smoke device of transport vehicle: patent CN104111006B: Int.Cl. F41H 3/00. Application Number 201410213297.XA; Filing Date 05/21/2014; Publication Date 10/22/2014. 6 p.
4. Method and device for protecting a vehicle from a threat: patent DE102018110241A1: Int.Cl. F41H 11/02, G08G 1/16, G08B 21/02. Application Number 10 2018 110 241.0; Filing Date 27.04.2018; Publication Date 31.10.2019. 9 p.
5. Robert William Schaub. Development of a versatile man-portable obscurant aerosol generator: characterization of aerosols in laboratory and field environments : doctoral dissertations: Faculty of the graduate school of the missouri university of science and technology. No. 2070, 2011. 194 p. [in English].
6. Driver C., Ligothke M., Downs J., Tiller B., Poston T. Environmental and Health Effects Review for Obscurant Fog Oil. Edgewood Research, Development & Engineering Center, Aberdeen Proving Ground, MD. Sep. 1993. 75 p. [in English].
7. Flanigan V., Kapila S. Development and Evaluation of Biogenic Obscurants, Robotic Obscurant Projectors, and Obscurant Simulation Models. Edgewood Chemical Biological Center, Aberdeen Proving Ground, MD. Sep. 2004. 45 p. [in English].
8. Аерозолеутворюючий склад для формування маскувальної завіси: патент на корисну модель UA118118U Україна: МПК: С06D 3/00, F41H 9/06. № U 2017 00641; заявл. 23.01.2017; опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14. 4 с.
9. High expansion rate expandable graphite. URL: <http://www.sungraf.net/> (дата звернення: 01.02.2023).
10. Заваллівський графіт. URL: www.zvgraphit.com.ua (дата звернення: 01.02.2023).
11. Dennis P.N. Fire Pump Arrangements at Industrial Facilities. 3rd Edition. Gulf Professional Publishing, 2017, 256 p. ISBN: 9780128130438.
12. Vinay Kumar Domakonda, Ravi Kumar Puli. Coatings in Diesel Engines. Application of Thermal Barrier a Review. *Energy and Power*. 2012, № 2 (1). С. 9-17, DOI: <http://doi.org/10.5923/j.ep.20120201.02>

13. Суміш на основі графіту, що спучується при нагріванні: пат. на корисну модель UA 36018U Україну: МПК: C01B 31/04, C01B 31/00. № u200806244; заявл. 12.05.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19. 3 с.

14. Бондаренко С.Г., Рыкова Л.А., Статюха Г.А. Технологические аспекты интеркалирования графита серной кислотой. *Химия твердого топлива*. 1988. N 4. С.141-143.

15. Schwab G.M., Ulrich H. Verdichtete graphite. *Kolloid Z. und Z. fuer Polimere*. 1963. B.190. N 2. pp. 108-115. [in English].

16. Танцюра І.І., Коритченко К.В., Стаховський О.В., Клімов О.П., Шматков В.А., Лівинцев О.В. Експериментальне дослідження термічних умов формування аерозолу з графіту марки ГВ50/12 у силовій установці танка Т-64Б. *Військово-технічний збірник. НАСВ* : Львів, 2023. Вип. 28. С. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.53-60>.

Reference

1. Method of generating a liquid mist: patent US 6,402,045 B1: Int.Cl. B05B17/00. Application Number 09/445463; Filing Date 12.20.1999; Publication Date 06.11.2002. 5 p. [in English].

2. Patent of Ukraine (2007), “Sposib formuvannya dymovoyi zavisy” [The method of forming a smoke curtain] patent 2374214 of the RF: IPC C06D 3/00, F41H 9/06, F42B 5/155. No. 2007131605/12; statement 20.08.2007; published 27.11.2009 Bulletin No. 33. 5 p. [in Russian].

3. A kind of gas blowout formula camouflage with smoke device of transport vehicle: patent CN104111006B: Int. Cl. F41H 3/00. Application Number 201410213297.XA; Filing Date 05/21/2014; Publication Date 10.22.2014. 6 p. [in English].

4. Method and device for protecting a vehicle from a threat: patent DE102018110241A1: Int.Cl. F41H 11/02, G08G 1/16, G08B 21/02. Application Number 10 2018 110 241.0; Filing Date 27.04.2018; Publication Date 31.10.2019. 9 p. [in English].

5. Robert William Schaub. *Development of a versatile man-portable obscurant aerosol generator: characterization of aerosols in laboratory and field environments* / doctoral dissertations: Faculty of the graduate school of the missouri university of science and technology No. 2070, 2011. 194 p. [in English].

6. Driver C., Ligothe M., Downs J., Tiller B. and Poston T. (1993), Environmental and Health Effects Review for Obscurant Fog Oil. *Edgewood Research, Development & Engineering Center, Aberdeen Proving Ground, MD*. Sep. 1993. 75 p. [in English].

7. Flanigan V. and Kapila S. (2004), Development and Evaluation of Biogenic Obscurants, Robotic Obscurant Projectors, and Obscurant Simulation Models. *Edgewood Chemical Biological Center, Aberdeen Proving Ground, MD*. Sep. 2004. 45 p. [in English].

8. Patent of Ukraine (2017), “Aerozoleutvoryuyuchy sklad dlya formuvannya maskoval'noyi zavisy” [Aerosol-forming composition for forming a masking veil] / utility model patent UA118118U Ukraine: IPC: C06D 3/00, F41H 9/06. No. u 2017 00641; statement 23.01.2017; published 25.07.2017, Bul. No. 14. 4 p [in Ukrainian].

9. High expansion rate expandable graphite. URL: <http://www.sungraf.net/> (дата звернення: 01.02.2023) [in English].

10. Заваллівський графіт. URL: <http://www.zvgraphit.com.ua> (дата звернення: 01.02.2023) [in Ukrainian].

11. Dennis P.N. (2017), Fire Pump Arrangements at Industrial Facilities. 3rd Edition. Gulf Professional Publishing, 256 p. ISBN: 9780128130438 [in English].

12. Vinay Kumar Domakonda and Ravi Kumar Puli. (2012), Coatings in Diesel Engines. Application of Thermal Barrier a Review. *Energy and Power*. № 2 (1). С. 9-17, DOI: <http://doi.org/10.5923/j.ep.20120201.02> [in English].

13. Patent of Ukraine (2008), “Sumish na osnovi hrafitu, shcho spuchuyetsya pry nahrivanni” [Graphite-based mixture that swells when heated] / pat. for utility model UA 36018U Ukraine: IPC: C01B 31/04, C01B 31/00. No. u200806244; statement 12.05.2008; published 10.10.2008, Bulletin No. 19. 3 p [in Ukrainian].

14. Bondarenko S.G., Rykova L.A. and Statyukha G.A. (1988), “Tehnologicheskie aspekty interkalirovaniya grafita sernoy kislotoy” [Technological aspects of graphite intercalation with sulfuric acid]. *Chemistry of solid fuels*. N 4. pp. 141-143. [in Russian].

15. Schwab G.M. and Ulrich H. (1963), Verdichtete graphite. *Kolloid Z. und Z. fuer Polimere*. B.190. N 2. pp. 108-115. [in English].

16. Tansyura I.I., Korytchenko K.V., Stakhovskiy O.V., Klimov O.P., Shmatkov V.A. and Linivtsev O.V. (2023), “Eksperymentalne doslidzhennya termichnykh umov formuvannya aerezolyu z hrafitu marky HV50/12 u syloviy ustanovtsi tanka T-64B” [Experimental study of the thermal conditions of the formation of an aerosol from graphite of the GV50/12 grade in the power plant of the T-64B tank]. *Military and technical collection NASV*: Lviv. Issue 28. pp. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.53-60> [in Ukrainian].

JUSTIFICATION OF THE BOUNDARY CONDITIONS FOR THE GRAPHITE POWDER HEATING MODEL IN THE EXHAUST GAS PIPE OF THE T-64B TANK POWER PLANT

I.I. Tansyura, K.V. Korytchenko, O.V. Stakhovskiy, A.O. Zadorozhnyi

The method of improving the thermal smoke apparatus is disclosed, which consists in the introduction of graphite powder into the bypass gas ducts of the power plant of the T-64 tank, followed by the release of an aerosol cloud from the power plant of the tank. In expanding the spectrum of the masking action of the aerosol curtain, which is created by the thermal smoke apparatus of the T-64B tank by introducing, in addition to diesel fuel, intumescent graphite into the flow of hot exhaust gases of the tank's power plant. At the same time, the composition of the aerosol curtain formed from diesel fuel is mainly intended for masking in the visible range of radiation, and the composition of the aerosol curtain formed from graphite provides, mainly, masking in the infrared range of radiation. In the case of simultaneous feeding of diesel fuel and graphite, the conditions of graphite swelling are worsened, because the impact of diesel fuel droplets on the graphite particles will lead to a decrease in

the heating rate of the graphite. At a slow heating rate of graphite, the swelling coefficient sharply decreases, which sharply worsens the properties of the aerosol veil in terms of volatility. Therefore, the improvement consists in alternate pulse-periodic injection of hot exhaust gases of the power plant of the graphite tank and diesel fuel into the flow.

The direction of improving the thermal smoke apparatus of the T-64B tank by introducing, in addition to diesel fuel, expandable graphite into the flow of hot exhaust gases of the tank's power plant to expand the spectrum of the masking effect of the aerosol curtain is proposed. The improvement consists in alternate pulse-periodic introduction of hot exhaust gases of the power plant of the graphite tank and diesel fuel into the flow.

The boundary conditions for the graphite powder heating model in the exhaust gas path of the power plant of the T-64B tank are substantiated. The geometric profile of the channel through which the exhaust gases of the engine power plant flow, the temperature of the gas duct walls, the mass flow rate, the thermodynamic parameters and the chemical composition of the tank exhaust gases, the mass flow rate and the size of the injected graphite particles, the thermodynamic parameters of the gas at the outlet of the gas duct are determined. In the calculations, the mass flow of exhaust gases was assumed to be 1.72 kg/s with the mass fraction of CO₂/H₂O/N₂/O₂ components equal to 4:2:77:17. The mass consumption of graphite was equal to 2 kg/s with the particle size of powder graphite 5 μm and 50 μm. The temperature of the walls of the gas duct was assumed to be constant and equal to 100 °C.

Keywords: *T-64B, thermal smoke apparatus, intumescent graphite, aerosol masking, tank.*
