

DOI 10.33099/2618-1614-2026-32-1-55-63

УДК: 355.424.4:623.77:004.94

М. М. Хомік,*доктор технічних наук, професор,
Національний університет оборони,***А. А. Нікітін,***доктор філософії, доцент,
Національний університет оборони,***В. П. Романюк,***кандидат технічних наук, доцент,
Національний університет оборони,***І. С. Мещеряков,***доктор філософії, Національний університет оборони,***Р. М. Возняк,***доктор філософії, Національний університет оборони*

Методичний підхід до розроблення імітаційної моделі організації аерозольного маскування за стандартами НАТО

У статті запропоновано методичний підхід до розроблення імітаційної моделі організації аерозольного маскування, адаптованої до стандартів НАТО і процесу прийняття військових рішень. Результатом застосування зазначеної моделі є оптимізація планування застосування аерозольного маскування шляхом синхронізації ресурсних можливостей з тактичними часовими обмеженнями. Модель інтегрує два ключові компоненти: організаційний блок, що імітує часові витрати штабу на координацію та прийняття рішень, та фізико-тактичний блок, який розраховує потребу в засобах на основі метеоумов і фізики розсіювання аерозолів. Описано алгоритм оптимізації планування застосування аерозольного маскування, результати використання якого доводять, що успіх маскування критично залежить від швидкості координації штабних процедур і точності врахування погодних факторів.

Ключові слова: аерозольне маскування, імітаційне моделювання, процес прийняття військових рішень, оптимізація планування, аерозольні завіси, штабні процедури, бойові дії, метеорологічні умови, підтримка прийняття рішень.

© М. М. Хомік, А. А. Нікітін, В. П. Романюк, І. С. Мещеряков,
Р. М. Возняк, 2026

В умовах ескалації сучасних збройних конфліктів високої інтенсивності і технологічного домінування засобів інструментальної розвідки проблема підвищення живучості військ набуває першочергового значення. Аерозольне маскування позиціонується як критичний компонент системи протидії засобам ураження противника, що забезпечує нівелювання переваг ворога в електромагнітному спектрі. Водночас імплементація стандартів НАТО у Збройних Силах України актуалізує необхідність трансформації парадигми оперативного планування та процесу прийняття військових рішень (MDMP) з урахуванням аерозольного маскування.

Ефективність застосування аерозольних завіс детермінується не лише тактико-технічними характеристиками засобів аерозольного маскування, а й спроможністю органів управління до синхронізації процесів аерозольного маскування з динамікою бойової обстановки. Тож розробка науково-методичного інструментарію для оптимізації процесів організації аерозольного маскування, який враховував би стохастичність зовнішнього середовища і регламентовані часові обмеження, є нагальним науково-практичним завданням.

Теоретико-методологічний базис організації аерозольного маскування та функціонування штабів закладений у доктринальних документах країн-членів Альянсу. Зокрема, процедурні аспекти управління регламентовані в польовій настанові FM 6-0 «Commander and Staff Organization and Operations» [1], тактичні нормативи – в настановах, починаючи з FM 3-50 «Smoke Operations» [2] та FM 3-101-1 «Smoke Squad/Platoon Operations» [3], положення яких знайшли свою реалізацію в тактичній публікації АТР 3-11.50 «Battlefield Obscuration» [4]. Стандартизація атмосферних параметрів для моделювання захисту визначена у STANAG 6013 [5]. Фундаментальні дослідження фізико-хімічних властивостей аерозолів та їхньої взаємодії з електромагнітним випромінюванням висвітлені в багатьох наукових працях. На сьогодні проаналізований вплив аерозолеутворюючих речовин на електромагнітні хвилі [6, 7], обґрунтована величина порогу контрастної чутливості ока для умов аерозольної протидії, досліджена динаміка видимості об'єктів через флюктуючі аерозольні завіси, розроблені методи розрахунку дальності видимості об'єктів через аерозольні завіси з урахуванням необхідної якості бачення [8], розглянуті питання моделювання поширення лазерного випромінювання в дисперсійних середовищах [9], розглянута проблематика аерозольного маскування в аспекті порівняння застосування технічних засобів аерозольного маскування [10] та проведені дослідження ефективності аерозолів проти високоточної зброї [11].

Попри наявність значного масиву досліджень щодо технічних характеристик засобів і тактики їхнього застосування, невирішеною залишається проблема математичної формалізації організаційних процесів планування аерозольного маскуванню. Існуючі підходи характеризуються розривом між детермінованими методами розрахунку сил і засобів та ймовірнісним характером часових витрат на цикли управління. Відсутність інтегрованих моделей, що поєднують ресурсні обмеження із часовими параметрами процесу прийняття військових рішень, унеможливує оперативну оптимізацію рішень в умовах невизначеності.

Метою дослідження є формування методичного підходу до розроблення імітаційної моделі організації аерозольного маскуванню для оптимізації планування застосування аерозольного маскуванню шляхом синхронізації ресурсних можливостей із тактичними часовими обмеженнями.

Для досягнення мети статті визначенні часткові завдання, які полягають в обґрунтуванні, розробці та верифікації імітаційної моделі організації аерозольного маскуванню за стандартами НАТО, яка дасть змогу оптимізувати процес планування шляхом узгодження фізико-тактичних потреб із часовими обмеженнями роботи штабу за стандартами Альянсу. Головним питанням дослідження є формалізація процесу організації аерозольного маскуванню для забезпечення адаптивного управління обмеженими ресурсами маскуванню в умовах жорстких часових рамок прийняття рішень.

Дослідження базується на припущенні, що імплементація імітаційної моделі, яка структурно об'єднує організаційний блок (стохастичні часові параметри координації) та фізико-тактичний блок (залежність ефективності аерозольного маскуванню від метеоумов), дасть можливість мінімізувати час реакції системи управління та забезпечити досягнення критерію ефективності маскуванню при раціональному використанні наявного ресурсу.

Методологічну основу дослідження складає системний аналіз процесу аерозольного маскуванню як складної динамічної системи, що функціонує в умовах невизначеності бойової обстановки, який дав можливість формалізувати взаємозв'язки між організаційними процедурами роботи штабу та фізичними процесами поширення аерозолів в атмосфері.

Дослідження проводилось у два етапи: розробка математичного апарату для опису часових (організаційних) і ресурсних (фізико-тактичних) параметрів та експериментальна верифікація.

Абстрагованою метою дослідження є створення інструменту (моделі), що дасть можливість узгодити й раціоналізувати планування застосування обмеже-

них ресурсів маскуванню для забезпечення максимального бойового ефекту. Ключовими факторами планування можна визначити взаємозв'язки елементів, критичних для аерозольного маскуванню (табл. 1) [2–5].

Таблиця 1

Взаємозв'язки елементів, критичних для аерозольного маскуванню

Категорія	Взаємозв'язок
Тип застосування	Заплановане (довге, велика площа, синхронізоване). Позаплановане (коротке, мала площа, нагальне)
Фактори середовища	Погодні умови (вітер, стабільність) і місцевість (рельєф) безпосередньо впливають на ефективність аерозолу
Цілевизначення	Процес ВИРІШИТИ (атакувати), ВИЯВИТИ (здобути), ДОСТАВИТИ (засоби) є основою для розподілу ресурсів маскуванню
Критерії оцінювання	Синхронізація постановки аерозолів з ключовими подіями чи факторами прийняття рішень командира

Як абстрагований ефект можна прийняти перетворення фактору візуальної видимості як ключового фактору виявлення й ураження на контрольований параметр бойової обстановки. Абстрагований процес можна розглядати як синхронізоване планування та інтеграцію аерозольного маскуванню в загальний тактичний план командира (табл. 2) [1].

Таблиця 2

Інтеграція аерозольного маскуванню в загальний тактичний план

Суб'єкт (роль)	Ключове завдання
Командир	Визначення мети та обмежень (видимість, мобільність, власні можливості цілевизначення)
G3/S3 (Оперативне планування)	Інтеграція маскуванню в загальний план. Основна відповідальність за планування
Офіцер ХБРЯ захисту	Оцінювання аерозольного маскуванню та розробка проекту плану (виходячи з тактико-технічних можливостей)
G2/S2 (Розвідка)	Оцінювання обстановки та аналіз загроз (електронно-оптичних систем противника, місцевості, погоди)
FSO (Вогнева підтримка)	Координація димових боеприпасів та узгодження розподілу цілей із засобами маскуванню

Для досягнення узгодженості й ефективності (як на спільних навчаннях, так і в бою) імітаційна модель організації аерозольного маскуванню за стандартами НАТО є незамінною для вивчення впливу як процедурних затримок, так і зовнішніх факторів на загальний успіх аерозольного маскуванню.

Проведення формалізації імітаційної моделі вимагає перетворення концептуальних елементів (процедур, відповідальних осіб, фізичних факторів) на взаємопов'язану систему математичних, логічних та часових залежностей.

Структурно імітаційна модель декомпонована на два взаємопов'язані блоки (табл. 3).

Таблиця 3

Складові імітаційної моделі організації аерозольного маскуванню за стандартами НАТО

Блок моделі	Елемент імітації	Змінні та параметри
А. Організаційний блок (процесний)	Час, необхідний для узгодження та затвердження плану маскуванню штабними елементами	Час роботи штабів (G2/S2, G3/S3, офіцер ХБРЯ захисту), координаційні цикли (узгодження з FSO), синхронізація з ключовими подіями на полі бою
Б. Фізичний блок (тактико-технічний)	Взаємодія димової завіси із зовнішнім середовищем і противником	Погода (V_w, S), ефективність маскуванню (τ), залежність від типу аерозольної завіси, кількість необхідних засобів (N), обмеження на мобільність власних військ

Формалізація імітаційної моделі організації аерозольного маскуванню за стандартами НАТО, структурована навколо двох основних блоків: процесно-організаційного (планування) та фізико-тактичного (виконання). У блоці формалізації процесно-організаційних етапів (часових залежностей) моделюється процес прийняття військових рішень у контексті аерозольного маскуванню, метою якого є мінімізація часу роботи (ΔT_{react}) штабу (табл. 4).

Відповідно до процесу планування [2] загальний час, необхідний штабу для розробки й затвердження плану запланованого аерозольного маскуванню, можна розрахувати за формулою:

$$\Delta T_{plan} = T_{G2} + T_{ChOp} + T_{Coord} + T_{Cmdr} \quad (1)$$

Для позапланового аерозольного маскуванню [2], час роботи залежить від досягнення ключового критерію прийняття рішення:

$$\Delta T_{react} = T_{DP} + T_{Fire} \quad (2)$$

Таблиця 4

Формалізація процесно-організаційних етапів

Змінна	Позначення	Опис
Час на розвідку (G2/S2)	T_{G2}	Час на аналіз противника, місцевості та погоди
Час на оцінку (офіцер ХБРЯ захисту)	T_{ChOp}	Час на проведення оцінювання маскуванню та розробку проекту плану
Час на узгодження (G3/FSO)	T_{Coord}	Час на погодження плану маскуванню з вогневою підтримкою та оперативним штабом
Час на рішення командира	T_{Cmdr}	Час на затвердження критеріїв оцінювання та способу дій

де: T_{DP} – час прийняття рішення (наприклад «ворог у межах 1500 м») до запиту на аерозоль;

T_{Fire} – час доставки аерозольної завіси на ціль (залежить від типу засобу доставки: міномет/арт. снаряд чи генератор).

Оптимізація процесу організації аерозольного маскуванню за стандартами НАТО полягає в мінімізації часу планування та роботи за рахунок паралелізації процесів і чіткої координації між штабами.

У блоці формалізації фізико-тактичних етапів здійснюється моделювання фізичного впливу аерозольного маскуванню на ефективність дій противника, виходячи з метеорологічних і технічних факторів (табл. 5) [2, 5].

Таблиця 5

Метеорологічні та технічні фактори

Змінна	Позначення	Опис
Необхідна мінімальна оптична глибина	τ_{min}	Критерій командира для послаблення (наприклад, видимість < 50 м)
Швидкість вітру	V_w	Горизонтальна швидкість вітру (м/с)
Коефіцієнт стабільності атмосфери	S	Визначає ступінь розсіювання диму (1 – стабільна, 6 – нестабільна)
Коефіцієнт послаблення світлового потоку	$K_{ext}(\lambda)$	Ефективність обраного типу аерозолю проти сенсора противника λ

Спираючись на закон Бугера – Ламберта – Бера [12, с. 174], можна розрахувати необхідну концентрацію аерозольної завіси (C_{req}) з необхідного рівня маскуванню (τ_{min}) та ширини ділянки аерозольного маскуванню (L):

$$C_{req} = \frac{\tau_{min}}{K_{ext}(\lambda)L}. \quad (3)$$

Розрахунок необхідної швидкості генерації (Q_{reg}) аерозолю, який потрібний для підтримки необхідної концентрації аерозольної завіси (C_{req}) можна розрахувати зі швидкості вітру (V_w) за заданих погодних умов ($F_{Disp}(S)$):

$$Q_{reg} = C_{req}V_wF_{Disp}(S), \quad (4)$$

Емпірична функція ($F_{Disp}(S)$) описує залежність ефективного розсіювання аерозолю від стабільності атмосфери S (чим вище S , тим більше аерозоль розсіюється).

Кількість одиниць технічних засобів аерозольного маскування (N) можна розрахувати, виходячи з відношення необхідної швидкості генерації (4) до швидкості генерації аерозолю (Q_{unit}) однією одиницею (генератором або пострілом) за виразом:

$$N = \frac{Q_{reg}}{Q_{unit}}. \quad (5)$$

Успіх організації аерозольного маскування ($M_{Success}$) визначається логічним виразом, який вимагає дотримання всіх критеріїв:

$$M_{Success} = (\tau_{actual} \geq \tau_{min}) \wedge (\Delta T_{react} \leq T_{max\ react}) \wedge (N \leq N_{avail}), \quad (6)$$

де: τ_{actual} – фактично досягнуте оптичне послаблення;
 $T_{max\ react}$ – максимально допустимий час роботи штабу;
 N_{avail} – наявна кількість засобів аерозольного маскування.

Імітаційна модель організації аерозольного маскування за стандартами НАТО працює як циклічний алгоритм, що відображає процес планування та виконання:

- введення даних: введення L , R , V_w , S , λ , τ_{min} , N_{avail} ;
- процесний цикл: розрахунок ΔT_{plan} та ΔT_{react} (Блок 1);
- фізичний цикл: розрахунок C_{req} , Q_{reg} та N (Блок 2).

Рішення (оптимізація): якщо $N > N_{avail}$ (недостатньо ресурсів) або $\Delta T_{react} > T_{max\ react}$ (запізно) – процес організації аерозольного маскування повертається на етап T_{ChOp} (Блок 1), з пропозицією: змінити тип аерозолю (змінити $K_{ext}(\lambda)$); зменшити ширину фронту ділянки аерозольного маскування (зменшити L); змінити спосіб постановки аерозольної завіси (мобільний/ стаціонарний) для мінімізації ΔT_{react} . Результат: виведення $M_{Success}$ та оптимального плану (час, місце, N_{reg}).

Для імітаційної моделі, що поєднує логіку штабно-го планування та фізичні закони розсіювання аеро-

золю, необхідний структурований алгоритм, призначений для комп'ютерної моделі, яка прагне оптимізувати організацію аерозольного маскування шляхом ітеративного розрахунку ресурсів та часу.

Алгоритм оптимізації організації аерозольного маскування можна представити у вигляді п'яти кроків.

Крок 1. Ініціалізація та введення даних.

Вхідні дані (змінні):

- тактичні вимоги: L – ширина ділянки аерозольного маскування (м); R – відстань до цілі (м); $TypeTarget$ – спектральний діапазон сенсора противника (λ); $T_{Mission}$ – необхідна тривалість аерозольного маскування (хв); τ_{min} – мінімальна необхідна оптична глибина (критерій командира);

- ресурси та технології: N_{avail} – наявна кількість засобів аерозольного маскування (генератори/боєприпаси); Q_{unit} – швидкість генерації аерозолю однією одиницею (кг/хв); $K_{ext}(\lambda)$ – коефіцієнт прозорості аерозольної завіси проти сенсора противника λ ; $F_{Disp}(S)$ – коефіцієнт дисперсії (емпірична функція від стабільності атмосфери S);

- метеорологічні дані: V_w – швидкість вітру (м/с); S – стабільність атмосфери (шкала Пасквілла, 1–6);

- організаційні параметри (час): $T_{max\ react}$ – максимально допустимий час роботи штабу по організації позапланового маскування (хв); T_{G2} , T_{ChOp} , T_{Coord} , T_{Cmdr} – середній час на виконання штабних процедур.

Крок 2. Фізико-тактичний розрахунок ресурсів (визначення потреби).

Цей етап визначає, скільки аерозолю потрібно для проведення успішного аерозольного маскування: розрахунок необхідної концентрації аерозольної завіси (3); розрахунок необхідної швидкості генерації (4); розрахунок необхідної кількості одиниць технічних засобів аерозольного маскування (5).

Розрахунок загальної маси аерозольної завіси (M_{total}) можна здійснити, виходячи з необхідної швидкості генерації аерозолю впродовж загального часу аерозольного маскування:

$$M_{total} = Q_{reg} T_{total}, \quad (7)$$

де T_{total} – загальний час аерозольного маскування:

$$T_{total} = T_{Mission} + R/V_w, \quad (8)$$

де R/V_w – час наростання аерозольної завіси $T_{Buildup}$.

Крок 3. Перевірка та оптимізація ресурсів (цикл ітерації). Здійснюється перевірка, чи є необхідні ресурси в наявності.

Перевірка ресурсу (наявність одиниць) проводиться за виразом:

$$R_{Check} = (N_{reg} \leq N_{avail}), \quad (9)$$

якщо $R_{Check} = TRUE$, тоді перехід до кроку 4. Якщо $R_{Check} = FALSE$, недостатньо одиниць, тоді відбувається

ініціація циклу оптимізації планування (проводиться робота штабу) – офіцер ХБРЯ захисту рекомендує N_{reg} та повернутися до кроку 1 для: варіант 1 – зменшення L (скорочення ширини ділянки аерозольного маскування); варіант 2 – збільшення $K_{ext}(\lambda)$ (перехід на ефективніший, але дорожчий аерозоль); варіант 3 – перенесення часу аерозольного маскування на період зі сприятливішими V_w або S .

В імітаційній моделі організації аерозольного маскування за стандартами НАТО продовжується ітерація, поки R_{Check} не стане $TRUE$ або не буде досягнуто ліміту ітерацій (показник неможливості проведення аерозольного маскування).

Крок 4. Розрахунок часу роботи штабу (організаційна ефективність). На цьому етапі здійснюється моделювання ефективності штабних процедур:

- розрахунок часу для запланованого аерозольного маскування (1);
- розрахунок часу для позапланового аерозольного маскування (2);
- перевірка часу роботи штабу (для позапланового аерозольного маскування):

$$T_{Check} = (T_{React} \leq T_{max_react}), \quad (10)$$

якщо $T_{Check} = FALSE$, тоді ініціювати цикл оптимізації організації: зменшити T_{DP} та/або T_{Fire} (наприклад використати швидші засоби доставки: артилерія замість генераторів).

Крок 5. Відпрацювання рекомендацій і результату. Отримуємо вихідні дані (оптимізований план):

- успіх організації аерозольного маскування ($M_{Success}$) можливо описати виразом, який описує виконання умов:

$$M_{Success} = (R_{Check} = TRUE) \wedge (T_{Check} = TRUE); \quad (11)$$

- оптимальна конфігурація: кількість одиниць засобів аерозольного маскування (N_{reg}); загальна маса аерозольної завіси (M_{total}); час початку (синхронізація: $T_{Start} = T_{Mission} - T_{Buldup}$);

- організаційні висновки (оптимізація): прогнозована затримка планування (ΔT_{Plan}); рекомендації для штабу щодо скорочення T_{G2} , T_{ChOp} (наприклад паралелізація процесів);

- рекомендації для командира щодо критеріїв прийняття рішення [1].

Оскільки військові публікації [2–4] є доктринальними, а не технічними посібниками, точні значення фізичних коефіцієнтів ($K_{ext}(\lambda)$, $F_{Disp}(S)$) є емпіричними припущеннями. Виходячи з вимог до імітаційної моделі організації аерозольного маскування за стандартами НАТО, яка повинна оптимізувати організаційні процеси та враховувати фізичні фактори (погоду, спеціальну техніку), виконано налаштування ключових параметрів.

Для проведення чисельного моделювання та валідації моделі був сформований сценарій тактичної обстановки, характерний для дій механізованої бригади в наступі. Вхідні дані були уніфіковані відповідно до доктринальних вимог НАТО і фізичних стандартів. Організаційні часові параметри, які моделюють тривалість етапів процесу прийняття військового рішення у штабі, наведені в таблиці 6.

Таблиця 6

Організаційні часові параметри, які моделюють тривалість етапів процесу прийняття військового рішення у штабі

Змінна	Позначення	Значення (Хв)	Обґрунтування (штабна процедура)
Час на розвідку (G2/S2)	T_{G2}	180	Детальний аналіз противника (електронно-оптичної системи), місцевості та прогноз погоди
Час на оцінку (офіцер ХБРЯ захисту)	T_{ChOp}	60	Розрахунки Q_{reg} , N_{reg} та розробка проекту плану маскування
Час на узгодження (G3/FSO)	T_{Coord}	60	Координація вогню, розподіл цілей та узгодження ліній безпеки з оперативним штабом
Час на рішення командира	T_{Cmdr}	30	Затвердження критеріїв оцінювання та кінцевого плану маскування
Максимально допустимий час роботи штабу	T_{max_react}	15	Критичний час для позапланового маскування (від запиту до формування завіси)

Фізичні й тактичні параметри, які задаються командиром та розвідкою для конкретного завдання (наприклад прорив оборони на рівні бригади), наведені в таблиці 7.

Технічні та емпіричні коефіцієнти (табл. 8) є основою для фізичних розрахунків. Вони визначають, як ефективно ресурси справляються із зовнішнім середовищем.

Використовуючи наведені параметри, імітаційна модель організації аерозольного маскування за стандартами НАТО може виконати початковий розрахунок необхідних ресурсів:

Таблиця 7

Фізичні й тактичні параметри (приклад сценарію)

Змінна	Позначення	Значення	Одиниця	Обґрунтування
Ширина ділянки АМ	L	1000	м	Типова ділянка фронту для маскування
Відстань до цілі	R	2000	м	Відстань від генераторів до цільової лінії маскування
Необхідна тривалість АМ	$T_{Mission}$	30	хв	Необхідна тривалість прикриття маневру
Мінімальна необхідна оптична глибина	τ_{min}	5,0	безрозмірний	Доктринальне значення, що забезпечує >99% послаблення світла, знижуючи видимість до 50 м
Швидкість вітру	V_w	3,0	м/с	Оптимальна швидкість вітру (приблизно 10,8 км/год) для перенесення аерозолу без його надмірного розсіювання
Стабільність атмосфери	S	3	безрозмірний	Нейтральні умови атмосфери (типово для денного часу)

Таблиця 8

Технічні та емпіричні коефіцієнти

Змінна	Позначення	Значення	Одиниця	Обґрунтування
Наявна кількість засобів АМ	N_{avail}	12	од.	Типовий штатний склад роти АМ
Швидкість генерації	Q_{unit}	2,5	кг/с	Еквівалентна швидкість для генератора (приблизно 150 кг/хв, типова для потужних аерозолегенераторів типу М157)
Коефіцієнт прозорості аерозольної зависи	$K_{ext}(\lambda)$	20	м ² /кг	Емпіричне значення для високоякісної біспектральної аерозольної зависи (наприклад графіт/фосфор), ефективніше порівняно з монохроматичними, для послаблення видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів спектру
Коефіцієнт дисперсії	$F_{Disp}(S)$	$f(S) = 1,0$ $S^{0,5}$	м ² /с	Емпірична функція для моделювання впливу стабільності S. Чим менше S (більш стабільна атмосфера), тим менший $F_{Disp}(S)$ і тим менше аерозолу потрібно

1. Необхідна концентрація (3): $C_{reg} = 5,0/20/1000 = 0,00025$ кг/м³;

2. Коефіцієнт дисперсії ($F_{Disp}(S)$): $F_{Disp}(3) = 1,0 \cdot 3^{0,5} \approx 1,73$ м²/с;

3. Необхідна швидкість генерації аерозолу (4): $Q_{reg} = 0,00025 \cdot 3,0 \cdot 1,73 = 0,0013$ кг/с.

Це означає, що 1,3 грама аерозолу потрібно виділяти за секунду на метр лінії фронту, на якому слід скрити дії підрозділів, або $0,0013 \times 1000 \approx 1,3$ кг/с для всієї лінії фронту довжиною 1000 м, якщо ми припускаємо в імітаційній моделі одиницю ширини лінії фронту, на якому слід скрити дії підрозділів, – 1 м.

4. Необхідна кількість одиниць технічних засобів аерозольного маскування (5): $N_{reg} = 1,3 / 2,5 = 0,52 = 1$ одиниця.

У даному прикладі імітаційна модель показує, що 12 доступних одиниць є надлишковими для цього сценарію, і штаб може перерозподілити 11 одиниць на інші завдання, що є прямим результатом оптимізації.

Для прогнозування результатів запланованого аерозольного маскування до його початку офіцери штабу (G2/S2, ХБРЯ захисту, G3/S3) можуть використати імітаційну модель організації аерозольного маскування за стандартами НАТО (табл. 9).

Таблиця 9

Прогнозування результатів запланованого аерозольного маскування до його початку

Прогнозований результат	Налаштування моделі	Висновки для штабу
Потреба у ресурсах (N_{reg})	Введення τ_{min} , L , V_w , S та $K_{ext}(\lambda)$	Точне визначення кількості генераторів чи димових боеприпасів, необхідних для досягнення τ_{min} . Прогнозування надлишку або дефіциту наявних ресурсів (N_{avail})
Час роботи (ΔT_{react})	Введення T_{DP} , T_{Fire} та T_{max_react}	Прогнозування, чи буде АМ вчасним для підтримки маневру. Якщо ΔT_{plan} перевищує критичний час, АМ буде заздалегідь визнано неуспішним через організаційні затримки
Стійкість зависи	Введення $T_{Mission}$ та V_w	Прогноз того, як довго зависа утримуватиметься над цільовою ділянкою, даючи командуванню змогу планувати резервні засоби чи коригувати час маневру

Використання зазначеної моделі дає штабу можливість проводити ітерації («що, якщо...») для оцінювання різних варіантів дій, що є основою для оптимізації процесів організації аерозольного маскування (табл. 10).

Таблиця 10

Оптимізація процесу організації аерозольного маскування

Експеримент	Тестовані змінні	Мета оптимізації (висновок)
Чутливість до погоди	Зміна V_w (від 1 м/с до 5 м/с) та S	Визначення критичного порогу погоди, при якому N_{reg} перевищує N_{avail} . Це допомагає розробити плани на випадок раптової зміни обстановки, які передбачають використання альтернативних засобів (авіації, артилерії) за несприятливих умов
Оптимізація ресурсу	Ітеративне зменшення L та зміна $K_{ext}(\lambda)$	Якщо $N_{reg} > N_{avail}$, модель організації автоматично пропонує: зменшити ширину маскуванню L чи використати ефективніший аерозоль (що, згідно з доктриною, є функцією офіцера ХБРЯ захисту). Це оптимізує розподіл дефіцитного ресурсу
Оптимізація штабних процесів	Зменшення T_{G2} , T_{ChOp} , T_{Coord} (наприклад від 60 до 30 хв)	Визначення, який саме часовий елемент найбільше впливає на ΔT_{plan} . Модель організації підтверджує необхідність паралелізації оцінки (ХБРЯ захист розпочинає роботу до повного завершення T_{G2}), що є прямим удосконаленням організації

Кінцевий результат, отриманий за допомогою моделі, – це не лише набір чисел, а структурований висновок, який інтегрується в схему підтримання рішень командира.

Імітаційна модель організації аерозольного маскуванню за стандартами НАТО формалізує критерії, за якими відбувається перехід від запланованого до позапланового маскуванню (табл. 11).

Таким чином, результат використання імітаційної моделі або підтверджує адекватність планування, або змушує штаб оптимізувати організацію аерозольного маскуванню і тактику підрозділів аерозольного маскуванню.

Для підвищення точності та практичної цінності імітаційної моделі організації аерозольного маскуванню за стандартами НАТО уточнені початкові припущення, особливо ті, що стосуються емпіричних коефі-

Таблиця 11

Підтримка рішення командира на організацію аерозольного маскуванню

Рішення командира	Умова (вихідний критерій моделі)	Дія підрозділу маскуванню
Провести аерозольне маскуванню	Якщо рішення командира на АМ прийняте ($DP = TRUE$) (наприклад, ворог у 1500 м) та $V_w > 5$ м/с (погода сприятлива)	Почати аерозольне маскуванню (50% аерозоль, 50% уламково-фугасні боеприпаси)
Задіяти резерв (позапланово)	Якщо $T_{Check} = FALSE$ (поточна ΔT_{react} перевищує T_{max_react}) та виникла непередбачувана загроза.	Командир переводить підрозділи ХБРЯ захисту в режим негайної підтримки «позапланово» із зосередженням на критичній цілі
Припинити аерозольне маскуванню	Якщо $V_w > V_{критич}$ або власний маневр завершений	Перехід до плану «Виведення підрозділів маскуванню» (FM 3–50)

цієнтів, та здійснене вдосконалення самої моделі шляхом інтеграції більш детальних тактичних факторів.

З метою емпіричного коригування імітаційної моделі організації аерозольного маскуванню за стандартами НАТО введені ключові припущення, які потребують уточнення на основі військових стандартів і реальних даних (табл. 12).

Для інтеграції уточнених припущень та підвищення реалістичності до зазначеної моделі можна додати три блоки:

1) блок інтеграції рельєфу та місцевості (G2/S2). Додавання до фізичного блоку впливу згаданих у тексті факторів рельєфу та місцевості уточнить необхідну швидкість генерації аерозолю:

$$Q'_{reg} = Q_{reg} F_{Relief} F_{Terrain} \tag{12}$$

де F_{Relief} – коефіцієнт рельєфу. Якщо маскуванню відбувається в долині або на схилі, де аерозоль накопичується (інверсія), $F_{Relief} < 1,0$. Якщо на вершині пагорба, де дим швидко розсіюється, $F_{Relief} > 1,0$;

$F_{Terrain}$ – коефіцієнт типу місцевості. Для міської забудови або густого лісу дим довше затримується $F_{Terrain} < 1,0$. Для відкритої рівнини $F_{Terrain} \approx 1,0$;

2) блок моделювання часових витрат з ризиком (організаційний блок). Замінити пряме підсумовування часу на імітацію з урахуванням організаційного ризику:

Коригування моделі організації аерозольного маскування за стандартами НАТО

Змінна	Попереднє припущення	Коригування
Організаційні параметри		
Час на штабні процедури (T_{G2} , T_{Coord} тощо)	Фіксовані значення (180 хв., 60 хв. тощо)	Уточнити: замінити фіксовані значення на розподіли ймовірностей (наприклад $T_{Coord} \sim N(\mu = 60, \sigma = 15)$). Це дасть можливість моделювати ризик організаційних затримок при Монте-Карло симуляціях (комп'ютерних експериментах)
Максимально допустимий час роботи штабу (T_{max_react})	15 хв.	Уточнити: зробити T_{max_react} залежним від тактичного етапу. Для прикриття висування T_{max_react} може бути 30 хв., для контрбатареїної боротьби – 5 хв.
Фізичні коефіцієнти		
Необхідна мінімальна оптична глибина (τ_{min})	5,0	Залишити $\tau_{min} \geq 5,0$ як стандарт для досягнення ефективного екранування (зниження видимості до 50 м). Уточнити: ввести $\tau_{min} = 1,0$ для маскування осліпленням (виведення з ладу сенсорів) або введення в оману
Коефіцієнт прозорості аерозольної зависи проти сенсора противника ($K_{ext}(\lambda)$)	20 м ² /кг	Уточнити: ввести базу даних аерозолів: $K_{ext}(\lambda)_{IR}$ (проти тепловізорів) та $K_{ext}(\lambda)_{VIS}$ (проти оптичних систем). Використовувати $K_{ext}(\lambda)$ як вектор для біспектральних засобів
Коефіцієнт розсіювання аерозолу ($F_{Disp}(S)$)	$f(S) = 1,0 \cdot S^{0,5}$	Уточнити: використовувати класи Пасквілла-Гіффорда, де $F_{Disp}(S)$ – це складна функція, яка залежить від S (клас стабільності А–F) та відстані перенесення аерозолу

- процедура ітерації (Монте-Карло): провести N ітерацій, де на кожній ітерації T_{Coord} та T_{ChOp} вибираються випадково із заданого розподілу ймовірностей;

- розрахунок організаційного ризику (P_{Fail}):

$$P_{Fail} = \frac{\text{Кількість ітерацій, де } \Delta T_{react} > T_{max_react}}{N}; \quad (13)$$

- результат оптимізації. Імітаційна модель має видавати не лише середній час $\overline{\Delta T_{Plan}}$, а й імовірність успіху (наприклад «при цьому план має 25% ризику організаційного провалу через затримки»);

3) блок інтеграції циклу рішення: забезпечити, щоб у моделі проводилась інтеграція вимог щодо цілевизначення: вхідний критерій (чи є ціль виявленою?); оцінка (чи необхідно ціль засліпити?); вихідний критерій (чи є засоби доставки (артилерія, аерозолегенератори) ефективними?).

Якщо засоби доставки не відповідають умові $N_{reg} \leq N_{avail}$, цикл повертається на етап T_{ChOp} з пропозицією змінити тип аерозолу (змінити $K_{np}(\lambda)$).

Висновки

1. У процесі дослідження надано методичний підхід до розроблення імітаційної моделі організації аерозольного маскування, адаптованої до процесу прийняття військових рішень і стандартів НАТО.

2. Удалося знайти максимально повну та, що головне, кількісну відповідь на запитання, як оптимізувати планування застосування аерозольного маскування шляхом синхронізації ресурсних можливостей з тактичними часовими обмеженнями. Дослідження перетворило якісні (описові) вимоги статутів на вимірні показники. Це дає командирів можливість отримати не лише опис, а й прогноз ефективності аерозольного маскування.

3. Методичний підхід дає змогу розробити імітаційну модель організації аерозольного маскування, яка має критичну важливість для Збройних Сил України, оскільки вона:

- поєднує доктрини, в яких визначені вимоги до аерозольного маскування, тактики застосування підрозділів аерозольного маскування та процесу прийняття військових рішень у єдиний алгоритм;

- надає механізм для боротьби з високоточними розвідувально-ударними комплексами противника, які покладаються на швидке виявлення та ураження;

- дає змогу планувати раціональне використання дорогих біспектральних аерозолеутворюючих речовин шляхом точного розрахунку засобів аерозольного маскування та автоматичного переходу в режим економії (логістична оптимізація).

4. Порівняно з іншими дослідженнями, які фокусуються виключно на фізичному моделюванні, проведене дослідження спрямоване на оптимізацію

планування застосування аерозольного маскуванню шляхом синхронізації ресурсних можливостей з тактичними часовими обмеженнями. Уперше надано методичний підхід до розроблення імітаційної моделі організації аерозольного маскуванню за стандартами НАТО, що дає можливість інтегрувати три ключові фактори впливу на успіх аерозольного маскуванню: фізичні (метеорологія, рельєф), організаційні (час штабних процедур) і доктринальні вимоги в єдиний комплексний критерій оцінювання ефективності. Сформульовано та кількісно обґрунтовано комплексний критерій успіху, який забезпечує командуванню можливість балансувати між стійкістю аерозольного маскуванню та часовою синхронізацією при виборі оптимального способу дії.

5. Проведення подальших досліджень за цим напрямом, а саме створення програмного забезпечення на базі запропонованого алгоритму для інтеграції в штабні системи управління Збройних Сил України та проведення повномасштабної польової валідації, можуть перетворити імітаційну модель організації аерозольного маскуванню за стандартами НАТО зі статичного калькулятора ресурсів на динамічний інструмент підтримання рішень, здатний оцінювати ризики та пропонувати оптимальні організаційні коригування в реальному часі.

Перелік літератури

1. Command and Staff Organization and Operations [Електронний ресурс] : FM 6-0 / Headquarters, Department of the Army. – [Washington, DC : Headquarters, Department of the Army], 2022. – 224 p. // Army Publishing Directorate. – Режим доступу : https://armypubs.army.mil/epubs/DR_pubs/DR_a/ARN35404-FM_6-0-000-WEB-1.pdf.
2. Smoke Operations : FM 3-50 : [Incorporating Change 1, 11 September 1996] / Headquarters, Department of the Army. – [Washington, DC : Headquarters, Department of the Army], 1990. – 115 p.
3. Smoke Squad/Platoon Operations : Tactics, Techniques, and Procedures : FM 3-101-1 / Headquarters, Department of the Army. – [Washington, DC : Headquarters, Department of the Army, 1994]. – 150 p.
4. Battlefield Obscuration [Електронний ресурс] : ATP 3-11.50 / Headquarters, Department of the Army. – [Washington, DC : Headquarters, Department of the Army], 2014 – 128 p. // Army Publishing Directorate. – Режим доступу : https://armypubs.army.mil/epubs/DR_pubs/DR_c/ARN16124-ATP_3-11.50-001-WEB-2.pdf.
5. NATO Meteorological Support Manual [Електронний ресурс] : AMETOSP-2 : NATO Standard / Meteorological and Oceanographic Military Committee Working Group. – Edition A, Version 1. – [Brussels] : NSO, 2016 // NATO Standardization Office. – Режим доступу : <https://nso.nato.int/nso/nsdd/main/standards/ap-details/1829/EN>.
6. Дослідження динаміки концентрацій атмосферних аерозолів, пилу та аероіонів [Електронний ресурс] / В. А. Глива, О. М. Тихенко, Г. Ю. Краснянський, С. В. Зозуля // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2024. – № 1(75). – С. 174–176. – Режим доступу : <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.174>.
7. Бовчалюк В. П. Фотометричні та лідарні дослідження аерозолів в атмосфері над Україною [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук : 05.07.12 / Бовчалюк Валентин Павлович ; Головна астрономічна обсерваторія НАН України. – К., 2019. – 25 с. // ГАО. – Режим доступу : https://www.mao.kiev.ua/biblio/docs/special/2019-11-15_Bovchaliuk_aref.pdf.
8. Аналіз факторів, що впливають на визначення дальності видимості об'єктів крізь аерозольну завісу / А. В. Писарев, А. Ф. Лазутський, С. А. Тузіков, С. А. Писарев // Зб. наук. праць Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил. – 2019. – № 3(61). – С. 18–23.
9. Дослідження розповсюдження лазерного випромінювання в атмосферному середовищі [Електронний ресурс] / В. Г. Петрук, С. Кватернюк, І. Васильківський та ін. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – Т. 16, № 2. – С. 114–125. – Режим доступу : <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/50>.
10. Порівняльний аналіз засобів аерозольного маскуванню, які знаходяться на озброєнні у Збройних Силах України та армій західних країн – партнерів [Електронний ресурс] / І. Танцюра, О. Клімов, О. Стаховський, С. Гузенко // Військово-технічний збірник. – 2024. – № 30. – С. 8–13. – Режим доступу : <https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.8-13>.
11. Аналіз використання аерозольних (димових) засобів у сучасних бойових діях [Електронний ресурс] / С. С. Брянкін, Г. П. Озеран, О. В. Скиба та ін. // Зб. наук. праць Держ. наук.-досл. ін-ту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2024. – № 4(22). – С. 14–22. Режим доступу : <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.02>.
12. Глосарій термінів з хімії [Електронний ресурс] / укладачі Й. Опейда, О. Швайка. – Вид. 2-е, електронне. – К. : [б. в.], 2017. – 738 с. // Науково-видавнича діяльність Національної академії наук України. – Режим доступу : <https://nvd-nanu.org.ua/bec546f3-9756-0d7a-b014-7483603ebec3>.

Надійшла до редакції: 05.12.2025

Прийнята для опублікування: 23.02.2026