

**Людмила Миколаївна Пономарьова¹, Андрій Юрійович Довгополов²,
Володимир Васильович Лупирь³,
Артем Андрійович Лазаренко⁴, Богдан Вадимович Козлов⁵**

¹кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри теоретичної та прикладної хімії
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: l.ponomarova@chem.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1637-3229>

²кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологія машинобудування верстатів та інструменти (ТМВІ)
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: a.dovhopolov@tmvi.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9094-4923>

³генеральний директор

ТОВ Науково-виробнича компанія «Папірус», Суми, Україна

E-mail: vladimir@vcity.sumy.ua

⁴аспірант кафедри технологія машинобудування, верстатів та інструменти
Сумський державний університет (Суми, Україна);

член ГО «Сумський кластер інженерів механіків Індустрія 5.0UA» (Суми, Україна)

E-mail: y.nekrasov@tmvi.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-4681-383X>

⁵студент

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: kozlovbogdan95@gmail.com

РОЗРОБКА БЕЗПЕЧНИХ ПІРОТЕХНІЧНИХ ДИМОВИХ КОМПОЗИЦІЙ: ХІМІЧНИЙ АСПЕКТ ТА ТОКСИКОЛОГІЧНА ОЦІНКА

У статті виконано аналіз хімічного складу, механізмів реакції та токсичності основних типів піротехнічних димових сумішей. Представлено результати експериментального дослідження сигнальної димової суміші на основі калій нітрату, сахарози та парафіну. Було проведено тестування шести сумішей, в яких змінювали вміст окисника, палива та охолоджувача. Для визначення найкращого співвідношення суміші димового сигналу, спостерігали за виходом диму, часом запалювання та тривалістю горіння. Найкращий результат спостерігався при співвідношенні 37,5 мас.% KNO₃, 37,5 мас.% сахарози та 25% парафіну з часом запалювання 5 с та тривалістю горіння 90 с з повільною прозорістю кольору та густиною диму.

Ключові слова: піротехнічні димові шашки; метал-хлоридні суміші; сигнальний дим; хімічні реакції горіння; токсичність аерозолів; безпека.

Актуальність теми дослідження. Піротехнічні димові шашки систематично використовуються з часів Першої світової війни й до цього часу є ефективними засобами на сучасному полі бою та в цивільних застосуваннях. Вони використовуються у військових операціях та навчаннях для зменшення видимості противника, маскуванню об'єктів або сигналізації та позначення позицій; правоохоронними органами для забезпечення безпеки та захисту; цивільним населенням під час святкових, соціальних, культурних, політичних та спортивних заходів [1].

Горіння піротехнічних димів генерує велику кількість аерозольних частинок різної морфології та розміру, які надають диму характерних властивостей: кольору для сигнального диму або маскувальної здатності для темного диму [2-4].

Зв'язок між впливом частинок у повітрі та здоров'ям людини, зокрема з серцево-легеневими захворюваннями, добре задокументований у науковій літературі. Експериментальні дослідження демонструють, що менші частинки викликають сильніший вплив, ніж більші, завдяки більшому співвідношенню площі поверхні до маси. Однак необхідно враховувати також їхній хімічний склад і властивості [1; 5; 6].

Постановка проблеми. Військові та цивільні димові речовини, які використовуються для сигналізації та маскуванню, можуть становити ризик для здоров'я через токсичність їхніх компонентів та продуктів горіння. Різні типи диму мають різний рівень токсичності; деякі викликають подразнення дихальних шляхів та мають потенціал довгострокового впливу на організм. Це зумовлює необхідність розробки нових, менш токсичних димових композицій.

Метою роботи є аналіз сучасних піротехнічних димових сумішей, виявлення їх переваг та недоліків, розробка та експериментальна перевірка альтернативної сигнальної димової суміші на основі екологічно безпечних компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Піротехнічні димові суміші поділяються на два основні класи: метал-хлоридні та сигнальні (кольорові) суміші [7-11].

Метал-хлоридні суміші використовуються для маскуванню та утворення густого, непрозорого диму. Ці суміші здатні утворювати стійкі димові завіси протягом тривалого часу. Вони є основним компонентом військового арсеналу багатьох країн, зокрема є основою шашок РДГ-2, ДШ-157, УДШ, які традиційно застосовувались у Збройних Силах України [9].

Сигнальні (кольорові) суміші містять барвники та використовуються для маркування позицій, передачі сигналів та позначення об'єктів. Вони менш потужні за маскувальною дією, але забезпечують яскравий, впізнаваний колір. Основою є антраценові суміші (типи А-12 і А-13), які містять антрацен разом із компонентами-окисниками та інертними речовинами. Основна – повільного горіння (А-12), перехідна – швидкого горіння (А-13). Також, відомий ряд кольорових димових сумішей, в яких основним окисником є Калій хлорат ($KClO_3$) [10]. Під час горіння утворюється густий білий аерозоль, який фарбують додаванням барвників. Складом суміші та способами її формування регулюють швидкість горіння – оскільки, занадто швидке горіння провокує руйнування барвника або виділяє дим занадто короткочасно або неефективно. Повільне горіння, навпаки, призводить до мінімального виходу диму та має тенденцію до само згасання процесу горіння.

У табл. 1 представлено порівняльну характеристику типових рецептур метал-органічних сумішей, які використовуються у виробництві димових сумішей в Україні, США, Великобританії [9; 11; 12].

Таблиця 1 – Типові рецептури метал-хлоридних сумішей України, США, Великої Британії, % [9; 11; 12]

Компонент	Україна		США	Велика Британія
	Основна суміш (повільного горіння)	Перехідна суміш (швидкого горіння)		
Гексахлоретан			46,66	35–37
Гексахлоретан/гексахлорбензол	20–25	15–20	-	-
Порошок алюмінію	10–15	15–20	-	-
Гранульований алюміній	-	-	6,68	-
Цинк оксид	60-70		46,66	40–42
Цинк	-	-	-	12

Метал-хлоридні суміші складаються з таких основних компонентів [7-14]:

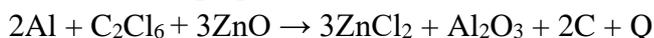
1. Полігалогеновані органічні сполуки – донори хлору: гексахлоретан (C_2Cl_6) – біла або безбарвна речовина з характерним камфорним запахом та гексахлоробензен (C_6Cl_6) – альтернативна полігалогенована сполука.

2. Цинк оксид (ZnO) – основний окисник, який забезпечує горіння та утворення хлоридів металів, що формують дим

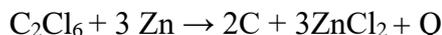
3. Металеве паливо створює необхідну температуру реакції: порошок або гранули алюмінію (Al), рідше, як альтернатива, порошки магнію або цинку.

4. Додаткові компоненти – флегматизатори (парафіни, віск, церезин, вазелін, карбамід) для забезпечення контрольованого, рівномірного горіння, або Кальцій силіцид ($CaSi_2$) для підвищення температури горіння та його прискорення.

Основні термохімічні реакції, які відбуваються під час горіння метал-хлоридних сумішей можуть бути представлені як [13]:



або з цинком:



Утворений дим метал-хлоридної суміші складається з:

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

- Цинк хлориду ($ZnCl_2$) – 62,5 % (основний компонент, відповідальний за видимість диму);
- Цинк оксихлориду ($Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$) – 9,6 % (частинки білого кольору, здатні до сублімації);
- 10,8 % хлору (Cl_2) та парів хлор-вмісних сполук (фосгену ($COCl_2$), хлороводню (HCl), тетрахлорметану (CCl_4), тетрахлоретилену (C_2Cl_4));
- Цинк оксиду (ZnO) – залишки початкових матеріалів;
- слідових кількостей оксидів заліза, алюмінію, свинцю;
- чадного газу (CO);
- частинки сажі (C), які надають диму сірого або темного кольору.

Метал-хлоридні димові суміші визнані токсичними та становлять серйозні ризики для здоров'я [13-15]:

- хлороводень (HCl) викликає гостре подразнення дихальних шляхів, опіки слизової оболонки;
- Цинк хлорид під час конденсації викликає термічні ураження легень;
- фосген та хлорорганічні сполуки характеризуються системною токсичністю навіть у слідових кількостях;
- свинець та його сполуки – токсини з довгостроковими ефектами;

Через високу потенційну легеневу токсичність димові гранати на основі цинк хлориду виведені з арсеналу більшості західних країн та замінені на менш токсичні альтернативи. США та інші держави активно розробляють альтернативні композиції без цинку (НХ-композиції) [8].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Альтернативні сигнальні димові суміші – суміші на основі менш токсичних компонентів. Типова рецептура містить: окисник – традиційно калій хлорат або, як альтернатива, калій нітрат; паливо – крохмаль, лактоза або сахароза; охолоджуючий агент або флегматизатор – парафіни, воски; барвники – індиго, антрацен або інші органічні барвники (для специфічних кольорових варіантів) [7; 8; 14; 15]. Основна перевага цих сумішей – значно менша токсичність продуктів горіння та отримання контрольованого температурного режиму, а виробу на основі такої композиції належать до відносно малотоксичних піротехнічних засобів для короткострокового застосування (табл. 2).

Головною потенційною небезпекою є ризик термічних опіків від відкритого полум'я або можливого розбрикування розжареного матеріалу. Також слід пам'ятати, що при неправильному застосуванні, зокрема в закритих приміщеннях, утворений дим може викликати задуху, подразнення дихальних шляхів, кашель, першіння, сльозотечу [16].

Таблиця 2 – Токсикологічні характеристики компонентів суміші на основі Калій нітрату

Токсичність	Хронічні ефекти	Статус
Калій нітрат		
Низька	Немає даних про проблеми при нормальному використанні	GRAS (Generally Recognized As Safe)
Сахароза		
Відсутня	Немає токсичних ефектів	Харчова добавка
Парафін		
Дуже низька	Інертна при контакті зі шкірою	Безпечна
Продукти горіння (CO_2, H_2O, N_2)		
Немає	Природні речовини	Безпечні

Вклад основного матеріалу. Основним компонентом сигнальної димової суміші є окисник – Калій нітрат (KNO_3) або калієва селітра – сильний окисник, особливо під час нагрівання. При температурі вище $400\text{ }^\circ\text{C}$ розкладається з виділенням кисню:



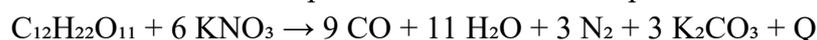
Під час цієї реакції утворюється достатньо тепла для ініціації окиснення парафіну та сахарози, а утворені продукти розпаду (Калій нітрит, Карбон (IV) оксид, азот, вода) є значно менш токсичними порівняно з хлор-органічними продуктами метал-хлоридних сумішей.

Паливом цієї суміші є сахароза ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$), яка інтенсивно згорає у присутності окисника, особливо при нагріванні. При спалюванні утворює основні продукти горіння: Карбон(IV) оксид (CO_2) та воду (H_2O).

Парафін ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) в цій суміші виконує функцію охолоджувача (може поглинати частину теплової енергії, знижуючи загальну температуру горіння з 1300°C до $900\text{--}1200^\circ\text{C}$) та флегматизатора (знижує температуру плавлення та робить суміш більш пластичною). Під час горіння генерує дрібні крапельки та частинки, що формують видимий білий дим, утворює ізольовані органічні фази, які регулюють швидкість реакції.

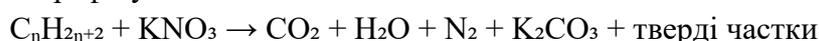
Запропонована композиція (Калій нітрат, сахароза, парафін) утворює керований реакційний матеріал, що робить шашку безпечнішою і активно застосовується в сучасній піротехніці.

Усі процеси можна узагальнити так – цукор і парафін вступають в реакцію з Калій нітратом при нагріванні. Відбувається розклад цукру та парафіну з виділенням газів (CO , CO_2 , H_2O , N_2), твердих частинок (K_2CO_3), аерозолів та сажі. Суміш димить завдяки конденсації продуктів та неповному згорянню органіки. Хімічні реакції при цьому можна описати наступним чином. Основна реакція окиснення сахарози Калій нітратом:



У реальних умовах неповного горіння продукти можуть містити: CO (Карбон(II) оксид), H_2O (водяна пара), газоподібні оксиди NO та NO_2 , тверді частинки (K_2CO_3 , K_2O)

Окиснення парафіну схематично можна записати як:



При неповному горінні можуть утворюватися: сажа (C) – мікроскопічні чорні частинки; аерозолі органічних сполук; дрібні крапельки рідкого парафіну; незначні кількості CO та інших недоокиснених вуглеводнів.

Під час виконання всіх робіт враховували практичні параметри роботи з сумішшю, представлені в табл. 3.

Для приготування суміші всі компоненти перетиралися, зважувалися, з'єднувалися між собою при нагріванні. З суміші м'якої консистенції формували та пресували таблетку масою 10 г. Через 8 годин проводили експериментальні дослідження з горіння.

Таблиця 3 – Практичні параметри роботи з сумішшю

Процес	Температура, $^\circ\text{C}$
Плавлення парафіну для утворення пасти	50–55
Температура займання парафіну	300
Розклад Калій нітрату (виділення O_2)	400
Температура горіння суміші (оптимум)	900–1200

Результати та обговорення. Випробування проводилися для шести різних складів у трьох випробуваннях, у кожному з яких змінювалися вміст окисника, палива та охолоджувальної рідини. Спостерігалися за виходом диму, часом займання та часом горіння димового сигналу, щоб визначити найкраще співвідношення суміші димового сигналу. Кожен експеримент повторювали по 3 рази і обраховували середнє арифметичне для показників: час займання, с; час горіння, с; маса сухого залишку, г – отримані результати наведені в табл. 4.

Результати демонструють, що найяскравіший білий димовий сигнал спостерігався при співвідношенні 37,5 мас.% KNO_3 , 37,5 мас.% сахарози та 25 % парафіну з часом займання 5 с та часом горіння 90 с з постійною непрозорістю кольору та густотою диму.

Зафіксовано, що під час горіння такої суміші розвивається температура близько 900–1200 °С, що відмінно корелює з даними наведеними у [17]. Таке співвідношення складу димового сигналу забезпечує найкращу димову вихідну здатність, найменший час займання та найдовший час горіння. Це відбувається через екзотермічну реакцію між калій нітратом як окисником та органічним паливом (сахароза та парафін).

Таблиця 4 – Результати експериментальних досліджень

Склад димового сигналу, мас. %			час займання, с	час горіння, с	маса сухого залишку, г
KNO ₃	сахароза	парафін			
30	45	25	7	87	0,9951
35	40	25	6	85	2,7290
37,5	37,5	25	5	92	1,5314
40	35	25	4	80	0,9357
45	30	25	3	72	0,4609
47,9	32,9	19,2	2	60	1,2365

Отриманий склад був використаний для наповнення димових шашок (рисунок 1), використаних у розробці напівавтоматичної системи аерозольного маскування («Туман-2М»), яка має можливість встановлення на будь-яку техніку, що використовується на полі бою.

Основною перевагою цієї системи є її низька токсичність, невисока собівартість виготовлення, простота конструкції та можливість її встановлення на військову техніку чи будь-який інший транспортний засіб, який використовується військовими протягом однієї доби [18; 19].



Рис. 1 – Димова шашка на основі KNO₃ як один з елементів запропонованої авторами [18; 19] напівавтоматичної системи аерозольного маскування

Висновок. У роботі проаналізовано склад димових сумішей. Продемонстровано, що метал-хлоридні димові суміші, які традиційно використовувалися у військовій справі, мають значну загрозу для здоров'я через високу токсичність компонентів та продуктів горіння. Як альтернативу запропоновано використання сахарозо-селітрової суміші з парафіном, яка демонструє прекрасні практичні характеристики (достатній час горіння, якісний дим, контрольованість) при мінімальній токсичності. Безпека такої композиції значно вища за метал-хлоридні аналоги при умові використання на відкритому повітрі та дотримання правил безпеки.

Подальший розвиток дослідження буде полягати в оптимізації складу суміші з барвниками для кольорових варіантів (антрацен, індиго та інші); стандартизації методів виробництва для забезпечення якості готового продукту.

Подяка. Дослідження виконано в межах проекту молодих вчених «Розроблення автоматизованого комплексу керування системою димового захисту евакуаційного автотранспорту та мобільних вогневих точок» (ДР № 0124U000538, 2024–2025 рр.), який фінансується Міністерством освіти та науки України. Стаття була підготовлена за технічного сприяння ГО «СКІМ Індустрія 5. ЮА».

Список використаних джерел

1. Martin de Lagarde, V., Rogez-Florent, T., Cazier, F., Dewaele, D., Cazier-Dennin, F., & Ollivier, A. (2022). Oxidative potential and in vitro toxicity of particles generated by pyrotechnic smokes in human small airway epithelial cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 239, 113637. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113637>.
2. Hemmilä, M., Hihkiö, M., Kasanen, J.-P., Turunen, M., Järvelä, M., & Suhonen, S. et al. (2010). Cytotoxicity and genotoxicity in vitro and irritation potency in vivo of two red phosphorus-based pyrotechnic smokes. *Mutation Research*, 701(2), 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2010.06.007>.
3. Hemmilä, M., Hihkiö, M., Kasanen, J.-P., Turunen, M., Hautamäki, M., & Pasanen, A.-L. et al. (2007). In vivo and in vitro evaluation of the acute toxicity, the genotoxicity, and the irritation potency of two hexachloroethane-based pyrotechnic smokes. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 70(14), 1167–1181. <https://doi.org/10.1080/15287390701252691>.
4. Koch, E.-C. (2008). Special materials in pyrotechnics: V. Military applications of phosphorus and its compounds. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 33(3), 165–176. <https://doi.org/10.1002/prep.200700212>.
5. Nachman, K. E., & Parker, J. D. (2012). Exposures to fine particulate air pollution and respiratory outcomes in adults using two national datasets: A cross-sectional study. *Environmental Health*, 11(1), 25. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-25>.
6. Oberdörster, G., Oberdörster, E., & Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 823–839. <https://doi.org/10.1289/ehp.7339>.
7. Dilger, J. M., Martin, T. M., Wilkins, B. P., Bohrer, B. C., Thoreson, K. M., & Fedick, P. W. (2022). Detection and toxicity modeling of anthraquinone dyes and chlorinated side products from a colored smoke pyrotechnic reaction. *Chemosphere*, 287(1), 131845. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131845>.
8. von Stackelberg, K., Amos, C., Thomas, S., Crokek, D., & MacAllister, B. (2004). *Military smokes and obscurants fate and effects: A literature review relative to threatened and endangered species* (ERDC/CERL TR-04-29). Engineer Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory.
9. Національний університет цивільного захисту України. Кафедра військової підготовки. (б.р.). *Теоретичні основи застосування аерозолів: Методична розробка щодо проведення групового заняття*. https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/kafedry/kafedra-viiskovoi-pidhotovky/distant-content/RHBZ_2_17.pdf
10. Шидловский, А. А. (1973). *Основы пиротехники*. Машиностроение.
11. Ellern, H. (1968). *Military and civilian pyrotechnics*. Chemical Publishing Company.
12. Eaton, J. C., Lopinto, R. J., & Palmer, W. G. (1994). *Health effects of hexachloroethane (HC) smoke* (Technical Report No. 9402). <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA277838.pdf>
13. Loh, C. H., Chang, Y. W., Liou, S. H., Chang, J. H., & Chen, H. I. (2006). *Hexachloroethane smoke inhalation: A rare cause of severe hepatic injuries*. *Environmental Health Perspectives*, 114(5), 763–765. <https://doi.org/10.1289/ehp.8635>
14. Ellern, H. (1968). *Military and civilian pyrotechnics* (Softcover ed.). Chemical Publishing Company.
15. El Idrissi, A., van Berkel, L., Bonekamp, N. E., Dalemans, D. J. Z., & van der Heyden, M. A. G. (2017). The toxicology of zinc chloride smoke producing bombs and screens. *Clinical Toxicology*, 55(3), 167–174. <https://doi.org/10.1080/15563650.2016.1271125>.
16. Landry, J. (2025, August 22). *Are smoke bombs safe to breathe?* Respiratory Therapy Zone. <https://www.respiratorytherapyzone.com/smoke-bombs-safe-breathe>.
17. Спорягін, Е. О., & Варлан, К. Є. (2011). *Навчальний посібник до вивчення курсу «Фізико-хімічні та експлуатаційні властивості спецматеріалів»*. РВВ ДНУ. <http://repository.dnu.dp.ua:1100/upload/ab59a56fcd58655d53ca0d38ed57b13F-x.-ta-eksluat.-vlastiv.-specmaterialiv.pdf>.
18. Довгополов, А. Ю., Некрасов, С. С., Колесник, В. О., Дегтярьов, І. М., & Лупирь, В. В. (2024). Розробка напівавтоматичної системи аерозольного маскування для не спеціалізованого військового та евакуаційного транспорту. *Методи та прилади контролю якості*, 2, 94–104. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-94-104](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-94-104).

19. Довгополов, А. Ю., Колесник, В. О., Некрасов, С. С., Фадєєв, В. М., & Проскурня, С. І. (2025). *Комплекс для постановки комбінованої димової завіси для неспеціалізованого військового транспорту* (Пат. № u202502844). Україна.

References

1. Violaine Martin de Lagarde, Tiphaine Rogez-Florent, Fabrice Cazier, Dorothée Dewaele, Francine Cazier-Dennin, Alexane Ollivier, et al. (2022). Oxidative potential and in vitro toxicity of particles generated by pyrotechnic smokes in human small airway epithelial cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 239, 113637. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113637>.
2. Hemmilä, M., Hihkiö, M., Kasanen, J.-P., Turunen, M., Järvelä, M., Suhonen, S. et al. (2010). Cytotoxicity and genotoxicity in vitro and irritation potency in vivo of two red phosphorus-based pyrotechnic smokes. *Mutat. Res.*, 701 (2), 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2010.06.007>.
3. Hemmilä, M., Hihkiö, M., Kasanen, J.-P., Turunen, M., Hautamäki, M., Pasanen, A.-L., Linnainmaa, K. (2007). In vivo and in vitro evaluation of the acute toxicity, the genotoxicity, and the irritation potency of two hexachloroethane-based pyrotechnic smokes. *J. Toxicol. Environ. Health Part A.*, 70(14), 1167-1181, <https://doi.org/10.1080/15287390701252691>.
4. Koch, E.-C. (2008). Special materials in pyrotechnics: V. Military applications of phosphorus and its compounds. *Propellants Explos. Pyrotech.*, 33(3), 165-176. <https://doi.org/10.1002/prep.200700212>.
5. Nachman, K.E., Parker, J.D. (2012). Exposures to fine particulate air pollution and respiratory outcomes in adults using two national datasets: a cross-sectional study. *Environ. Health*, 11(1), 25. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-25>
6. G. Oberdörster, E. Oberdörster, J. Oberdörster. (2005). Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ. Health Perspect.* 113(7), 823-839. <https://doi.org/10.1289/ehp.7339>
7. Jonathan, M. Dilger, Todd, M. Martin, Benjamin, P. Wilkins, Brian, C. Bohrer, Kelly M. Thoreson, Patrick W. Fedick. (2022). Detection and toxicity modeling of anthraquinone dyes and chlorinated side products from a colored smoke pyrotechnic reaction. *Chemosphere*, 287(1), 131845. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131845>.
8. Von Stackleberg, K., Amos, C., Thomas, S., Cropek, D., MacAllister, B. (2004). Military Smokes and Obscurants Fate and Effects: A Literature Review Relative to Threatened and Endangered Species; 2004. ERDC/CERL TR-04-29 IL 61826-9005 Final Report.
9. Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy. Kafedra viiskovoi pidhotovky [National University of Civil Defence of Ukraine. Department of Military Training]. (n.d.). *Teoretychni osnovy zastosuvannia aeroliziv. Metodychna rozrobka shchodo provedennia hrupovoho zaniattia – Theoretical foundations of aerosol application: Methodological guidelines for conducting group classes*. https://nu-czu.edu.ua/images/topmenu/kafedry/kafedra-viiskovoi-pidhotovky/distant-content/RHBZ_2_17.pdf.
10. Shydlovskiy, A. A. (1973). *Osnovy pyrotekhniki [Machine-building]*. Mashynostroenye.
11. Herbert Ellern. (1968). *Military and Civilian Pyrotechnics*. Chemical Publishing Company INC. New York.
12. James C. Eaton, Richard J. Lopinto, Winifred G. Palmer health effects of hexachloroltrhane (HC) smoke - Technical report 9402 – 1994. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA277838.pdf>.
13. Loh, C.H., Chang, Y.W., Liou, S.H., Chang, J.H., Chen, H.I. (2006). Case report: hexachloroethane smoke inhalation: a rare cause of severe hepatic injuries. *Environ Health Perspect.*, 114(5), 763-5. <https://doi.org/10.1289/ehp.8635>.
14. Ellern Herbert. (1968). *Military and Civilian Pyrotechnics – Softcover Publisher: Chemical Publishing Company*.
15. El Idrissi, A., van Berkel, L., Bonekamp, N. E., Dalemans, D. J. Z., van der Heyden, M. A. G. (2017) The toxicology of zinc chloride smoke producing bombs and screens. *Clinical Toxicology*, 55(3), 167–174. <https://doi.org/10.1080/15563650.2016.1271125>.
16. John Landry. Are Smoke Bombs Safe to Breathe? BS, RRT. 2025.Updated: Aug 22, 2025 <https://www.respiratorytherapyzone.com/smoke-bombs-safe-breathe>.
17. Sporiahin, E. O., Varlan, K. Ie. (2011). Navchalnyi posibnyk do vyvchennia kursu «Fizyko-khimichni ta ekspluatatsiini vlastyosti spetsmaterialiv» [Study guide for the course “Physical, chemical and operational properties of special materials”]. <http://repository.dnu.dp.ua:1100/upload/ab59a56fced58655d53ca0d38ed57b13F.-x.-ta-eks luat.-vlastiv.-specmaterialiv.pdf>.

18. Dovhopolov, A.Yu., Nekrasov, S.S., Kolesnyk, V.O., Dehtiarov, I.M., Lupyr, V.V. (2024). Rozrobka naprivavtomatychnoi systemy aerazolnoho maskuvannia dlia ne spetsializovanoho viiskovoho ta evakuatsiinoho transportu [Development of a semi-automatic aerosol camouflage system for non-specialised military and evacuation transport]. *Metody ta prylady kontroliu yakosti – Quality control methods and instruments*, 2, 94-104. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-94-104](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-94-104).

19. Dovhopolov, A.Yu., Kolesnyk, V.O., Nekrasov, S.S., Fadieiev, V. M., Proskurnia, S. I. (2025). Kompleks dlia postanovky kombinovanoi dymovoi zavisy dlia nespetsializovanoho viiskovoho transportu [Complex for setting up a combined smoke screen for non-specialised military transport]. Pat. 160673 Ukraina: MPKF41H9/06; F42B3/10; F42C19/00; F42D3/00; №u202502844; zaiavl. 2025-06-13; opubl. 2025-09-24, Biul. № 39.

Дата першого надходження статті до видання: 25.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.12.2025

UDC 544.02+662.1+66.03

**Lyudmila Ponomarova¹, Andrii Dovhopolov²,
Volodymyr Lupyr³, Artem Lazarenko⁴, Bohdan Kozlov⁵**

¹PhD in Chemical Sciences, Associate Professor, Head of Theoretical and Applied Chemistry Department
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: l.ponomarova@chem.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1637-3229>

²PhD in Technical Sciences, Senior lecturer of Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: a.dovhopolov@tmvi.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9094-4923>

³General Director of LLC Scientific and Production Company “Papyrus”
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: vladimir@vcity.sumy.ua

⁴PhD student of Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools
Sumy State University (Sumy, Ukraine);
member of NGO Industry 5.UA

E-mail: y.nekrasov@tmvi.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-4681-383X>

⁵student

Theoretical and Applied Chemistry Department Sumy State University, Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: kozlovbogdan95@gmail.com

DEVELOPMENT OF SAFE PYROTECHNIC SMOKE COMPOSITIONS: CHEMICAL ASPECT AND TOXICOLOGICAL ASSESSMENT

This article presents a thorough investigation into the chemical composition, reaction mechanisms, and toxicological effects of various pyrotechnic smoke mixtures, with an emphasis on developing safer and environmentally friendlier formulations. Traditional pyrotechnic smokes, frequently composed of hexachloroethane, zinc chloride, and red phosphorus mixtures, generate hazardous combustion products such as hydrochloric acid, phosgene, and chlorinated hydrocarbons. These toxic agents pose significant health risks including respiratory irritation, cytotoxicity, genotoxicity, and liver damage, confirmed by both in vitro and in vivo studies.

To address these concerns, the researchers focused on formulating signal smoke compositions using potassium nitrate as an oxidizer, sucrose as fuel, and paraffin as a coolant/moderator. This tri-component system decomposes predominantly into less harmful compounds like carbon dioxide, water vapor, nitrogen, and potassium carbonate, aligning with green chemistry principles and reducing toxic emissions. The results of an experimental study of a signal smoke mixture based on potassium nitrate (as an oxidant), sucrose (as a fuel) and paraffin (as a coolant) are presented. Six mixtures were tested, in which the content of the oxidant, fuel and coolant was sequentially changed. To determine the best ratio of the smoke signal mixture, the smoke yield, ignition time and burning duration were observed. The best ratio of the smoke signal composition provides the best color yield, the shortest ignition time and the longest burning duration. The best result was observed at a ratio of 37,5 wt.% KNO₃, 37,5 wt.% sucrose and 25% paraffin with an ignition time of 5 s and a burning duration of 90 s with consistent color transparency and smoke density. These findings support eco-friendly pyrotechnics for signaling and obscuration, with applications in military and civilian uses, backed by Ukrainian patents and toxicity literature.

Keywords: pyrotechnic smoke bombs; metal-chloride mixtures; signal smoke; chemical combustion reactions; aerosol toxicity; safety.

Fig.: 1. References: 19.