

## УДК 614.84

*М. А. Куценко, к.е.н., доцент, докторант (ORCID 0000-0001-6879-9187)*  
*О. М. Нуянзін, д.т.н., професор, нач. лаб. (ORCID 0000-0003-2527-6073)*  
*Г. І. Єлагін, к.х.н., с.н.с., с.н.с. лаб. (ORCID 0000-0003-2577-6430)*  
*Д. О. Кришталь, к.держ.упр., с.н.с. лаб. (ORCID 0000-0003-3254-4574)*  
*А. Г. Алексєєв, к.х.н., доцент, н.с. лаб. (ORCID 0000-0003-4114-5807)*  
*Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ГЕНЕРАТОРАМИ ВОГНЕГАСНОГО АЕРОЗОЛЮ НА ОСНОВІ МІНЕРАЛЬНИХ НОСІЇВ

Проблемою, що вирішувалася, є низька ефективність традиційних вогнегасних порошків при гасінні пожеж розлитих горючих рідин на поверхні води та при попередженні поширення пожеж на торфовищах, а також відсутність обґрунтованого фізико-хімічного механізму дії та оптимального складу таких засобів. Об'єктом дослідження є процес гасіння пожеж генераторами вогнегасного аерозолю на основі високопористих мінеральних носіїв. Метою роботи є встановлення механізму інгібування горіння аерозольною хмарою, визначення факторів ефективності застосування генераторів у різних умовах та обґрунтування оптимального складу генератора. У роботі проведено аналіз топохімії взаємодії вогнегасної аерозольної хмари з активними центрами ланцюгових реакцій горіння і тління, визначено фактори, що впливають на ефективність застосування генераторів при гасінні пожеж на поверхні води та при попередженні поширення пожеж на торфовищах, а також виконано розрахунок об'єму аерозольної хмари, що утворюється під час роботи генератора. Встановлено, що інгібування горіння відбувається шляхом взаємодії активних радикалів з молекулами інгібітору з утворенням малоактивних радикалів. Показано, що для гасіння пожеж на поверхні води вирішальним фактором є плавучість гранул, а для попередження поширення пожеж на торфовищах – проникнення аерозолю у пористе середовище та створення інертного газового середовища. Розрахунками встановлено, що 1 см<sup>3</sup> гранул генератора утворює близько 364 см<sup>3</sup> газоаерозольної суміші при нормальних умовах, що при температурі близько 1000 К відповідає приблизно 1300 см<sup>3</sup> аерозольної хмари. Визначено оптимальне масове співвідношення компонентів «спучений вермікуліт : полівініловий спирт : калію нітрат» як 1:2:8,7. Отримані результати дозволяють обґрунтовано проектувати генератори вогнегасного аерозолю для різних умов застосування.

**Ключові слова:** гасіння, пожежа, морські перевезення, нафта, торф, інгібування, генератори, аерозоль, іммобілізація, вогнегасний

### 1. Вступ

Одними з наймасштабніших пожеж з найбільш тяжкими наслідками для довкілля є пожежі горючих рідин на поверхні водойм і пожежі торфовищ. Перші з них виникають під час аварій великотоннажних танкерів, які за один раз беруть на борт дедалі більший об'єм нафти і продуктів її переробки. Все частіше такі аварії пов'язані з військовими діями в Україні та в світі, а також з російським тіньювим флотом, основні шляхи якого пролягають Чорним морем. І дуже велика вірогідність того, що найближчим часом рятувальникам подібну пожежу доведеться гасити біля своїх берегів. Пожежі же на торфовищах в основному є наслідком бездумного осушення боліт, яке проводилося і проводиться у всьому світі. Для України ця проблема набула стратегічного значення і через мілітарний чинник, оскільки вогневе ураження та обмежений доступ до замінованих торф'яних масивів унеможливають стандартну локалізацію таких пожеж. Кожного року рятувальникам доводиться гасити пожежі на торфовищах різних регіонів України. Крім масштабів і значної шкоди для довкілля, спільною рисою цих двох типів пожеж є складність боротьби з ними. Для гасіння пожеж на морі із звичайних засобів умовно придатні лише повітряно-механічні піни. Та й вони в цьому випадку

Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2026-43-15

малоефективні і самі отруюють і води моря і узбережжя. Складність гасіння пожеж на торфовищах пов'язана з особливостями горіння торфу. Торф частіше за все не горить з полум'ям, а тліє з виділенням отруйного і канцерогенного диму. Початок такого тління помітити дуже важко. Коли стає зрозумілим, що торфовище горить, тління вже охопило великі площі і поширилося на метри в глибину. Гасіння цих пожеж, як правило, здійснюють водою, якої треба дуже багато, і яку доводиться доставляти на великі відстані. Частіше такі пожежі не гасять, а запобігають їх поширенню різного роду ровами, що дуже дорого. Спеціально для гасіння пожеж рідин на поверхні водойми і для запобігання поширенню пожеж на торфовищах розробляються засоби на основі високопористого мінерального носія, найбільш вдалим з яких є генератори вогнегасного аерозолю.

У цих генераторах гранули спученого вермікуліту іммобілізовано сумішшю полівинілового спирту з калію нітратом. Метою даної роботи було дослідження основних факторів, від яких залежить ефективність застосування таких засобів. Визначено, що для ефективного їх використання важливими є фізико-хімічний механізм інгібування, плавучість засобу і співвідношення його компонентів. Наведене трактування топохімії фізико-хімічного механізму дії інгібіторів горіння базується на уявленні про дезактивацію активних частинок горіння не з розкладеним інгібітором, а з цілими його молекулами. Показано, що для успішного застосування таких генераторів необхідно забезпечити їх плавучість. Обчислено оптимальне співвідношення компонентів і розраховано приблизний об'єм хмари аерозолю, який вона матиме при нормальних умовах і при температурі горіння нафти та температурі тління торфу.

Вогнегасні порошкові композиції є найбільш ефективними засобами гасіння більшості пожеж. Але і ці засоби малоефективні при гасінні пожеж горючих рідин (бензину, нафти) на поверхні моря та взагалі непридатні для попередження поширення пожеж на торфовищах. Крім того, виготовлення дуже дрібного порошку пов'язано з певними технологічними труднощами, обумовленими необхідністю висушування порошку в потоці нагрітого повітря і наступного відділення його від цього повітря. Розширити область застосування і зменшити труднощі при виготовленні дозволяють засоби, в яких вогнегасні солі іммобілізовані внутрішньою поверхнею пор високопористого мінерального носія, зокрема спученого вермікуліту. Застосування достатньо грубих (з ефективним діаметром 3-5 мм) і одночасно легких (з насипною масою меншою  $0,8 \text{ г/см}^3$ ) гранул носія дозволяє розв'язати відразу дві задачі: зменшити труднощі при виготовленні і забезпечити плавучість засобу, тобто постійне знаходження його в зоні горіння рідини. Подальше вдосконалення таких засобів вимагає аналізу всіх аспектів їх застосування і виготовлення, зокрема визначення оптимального складу та виявлення фізико-хімічного механізму дії.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [1] наведено статистичні дані щодо пожеж та їх наслідків в Україні, що дозволяє оцінити масштаби пожеж у природних екосистемах, зокрема на торфовищах, а також пожеж, пов'язаних з горючими рідинами. Проте в роботі не розглянуто питання застосування спеціалізованих засобів гасіння пожеж на поверхні води та засобів попередження поширення пожеж на торфовищах, зокрема засобів на основі високопористих мінеральних носіїв.

У роботі [2] розглянуто аварії під час морських перевезень нафти та нафтопродуктів і показано, що пожежі на поверхні води є складними для ліквідації та

мають значні екологічні наслідки. Однак у роботі не розглянуто спеціальні технічні засоби для гасіння пожеж на поверхні води та не проаналізовано механізм дії вогнегасних речовин у таких умовах.

У роботі [3] досліджено пожежну небезпеку торфовищ та методи і засоби підвищення ефективності їх гасіння. Показано, що торф'яні пожежі характеризуються тривалим тлінням і складністю їх ліквідації. Проте у роботі основну увагу приділено традиційним методам гасіння і не розглянуто застосування аерозольних інгібіторів для попередження поширення пожеж на торфовищах.

У роботі [4] розглянуто теоретичні основи виникнення, розвитку та припинення горіння, у тому числі механізми інгібування ланцюгових реакцій горіння. Проте у роботі не розглянуто особливості інгібування горіння продуктами, що утворюються при роботі генераторів вогнегасного аерозолу на основі мінеральних носіїв. У роботі [5] розглянуто властивості вогнегасних порошків та умови їх застосування. Показано їх високу ефективність при гасінні більшості пожеж. Однак не розглянуто питання забезпечення тривалого перебування вогнегасної речовини в зоні горіння рідин на поверхні води та у пористому середовищі торфу.

У роботі [6] та патентах [7–10] розглянуто способи створення генераторів вогнегасного аерозолу та вогнегасних засобів на основі мінеральних носіїв. Проте у зазначених роботах не розглянуто питання оптимального співвідношення компонентів системи «мінеральний носій – відновник – окисник», а також не проведено розрахунок кількості та об'єму аерозолу, що утворюється при роботі таких генераторів.

У роботі [11] досліджено гранулометричні характеристики порошкових матеріалів та пористість засипок залежно від форми і розміру частинок. Проте у роботі не розглянуто використання пористих матеріалів як носіїв вогнегасних речовин та не досліджено вплив пористості на процес генерації вогнегасного аерозолу.

У роботі [12] розглянуто установки імпульсної подачі вогнегасної речовини для гасіння пожеж. Проте не розглянуто використання генераторів вогнегасного аерозолу та особливості їх застосування для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні води. У роботі [13] показано ефективність використання дисперсних систем для пригнічення процесів горіння та вибуху. Проте не розглянуто механізм інгібування горіння твердими аерозольними частинками, що утворюються безпосередньо у зоні горіння. У роботі [14] розглянуто механізми інгібування хімічних процесів у водних середовищах. Проте не розглянуто інгібування радикальних реакцій горіння в газовій фазі.

У роботі [15] розроблено модель теплового впливу пожежі розлитих нафтопродуктів. Проте не розглянуто процес припинення горіння та вплив вогнегасних речовин на процес горіння. У роботі [16] розглянуто питання екологічної безпеки водного середовища при надзвичайних ситуаціях. Проте не розглянуто застосування екологічно безпечних вогнегасних засобів для гасіння пожеж на воді. У роботі [17] досліджено поверхневі процеси у гетерогенних системах. Проте не розглянуто гетерогенні процеси інгібування горіння на поверхні частинок вогнегасного аерозолу.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що існуючі дослідження присвячені окремо механізмам горіння та його інгібування, властивостям вогнегасних порошків, створенню генераторів вогнегасного аерозолу, пористим матеріалам та методам гасіння пожеж горючих рідин і торфовищ. Проте відсутні дослідження, у яких одночасно розглянуто фізико-хімічний механізм інгібування горіння аерозолями, що утворюються при роботі генераторів на основі високопористих

мінеральних носіїв, визначено оптимальні співвідношення компонентів таких систем та оцінено кількість і об'єм аерозолі, що утворюється при їх застосуванні для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні води і для попередження поширення пожеж на торфовищах.

Отже, невирішеною частиною проблеми є встановлення фізико-хімічного механізму інгібування горіння аерозольними продуктами, визначення оптимального складу генератора на основі високопористого мінерального носія та оцінка ефективності його застосування для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні води і для попередження поширення пожеж на торфовищах.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є аналіз фізико-хімічного механізму дії генераторів вогнегасного аерозолі на основі високопористого мінерального носія при застосуванні їх для гасіння пожеж розлитих горючих рідин на поверхні моря і при застосуванні для попередження поширення пожеж на торфовищах; аналіз факторів, які впливають на ефективність їх застосування в кожному з цих двох випадків і розробка рекомендацій щодо оптимального складу для кожного з цих двох випадків.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

1. Провести аналіз фізико-хімічного механізму інгібування горіння та тління аерозольною хмарою, що генерується засобом на основі високопористого мінерального носія.

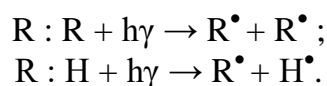
2. Визначити фактори, які впливають на ефективність застосування генераторів вогнегасного аерозолі при гасінні пожеж горючих рідин на поверхні води та при попередженні поширення пожеж на торфовищах.

3. Визначити оптимальний склад генератора та розрахувати об'єм аерозольної хмари, що утворюється при його роботі.

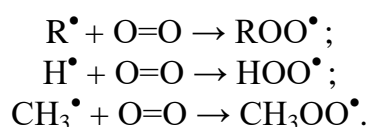
### 4. Дослідження процесів гасіння пожеж генераторами вогнегасного аерозолі

#### 4.1. Фізико-хімічний механізм інгібування горіння аерозольними генераторами

Фізико-хімічний механізм припинення горіння генераторами вогнегасного аерозолі в усіх випадках є однаковим – взаємодія інгібітору з активними частинками горіння. Ці частинки, згідно сучасних уявлень, виникають при появі в системі надлишкової енергії. Молекули горючої речовини з найбільш слабкими зв'язками зазнають гомолітичного розкладу: пара електронів, яка утворювала цей зв'язок, розривається, продукуючи фрагменти, кожен з яких містить в своїй структурі неспарений електрон:



Ці фрагменти – вільні радикали – в подальшому активно реагують з молекулами кисню і утворюють за ланцюговим механізмом нові вільні радикали:



Кожен з утворених радикалів настільки активний, що існувати у вільному ви-

гляді може не більше  $10^{-8}$  частки секунди. Він швидко знаходить і гомолітично руйнує новий слабкий зв'язок, розбиваючи нову електронну пару. Але це теж утворює вільний радикал. Таким чином один вільний радикал за секунду забезпечує перетворення мільярду молекул горючої речовини в молекули продуктів горіння.

#### **4.2. Фактори, що визначають ефективність застосування генераторів вогнегасного аерозолю**

Ефективність вогнегасної дії засобів порошкових вогнегасних засобів, у тому числі генераторів вогнегасячого аерозолю, звичайно пояснюють їх здатністю знешкоджувати активні частинки горіння шляхом дезактивації цих частинок. Так як інгібітор вводиться у зону горіння у малих кількостях (2–3 % від об'єму цієї зони), ясно, що помітно охолодити зону він не може. Для ізоляції зони горіння від окисника чи горючих парів, як і для флегматизації суміші – такої кількості теж явно недостатньо. Так що положення про хімічне, в цьому випадку, інгібірування процесу горіння, – заперечень не викликає. Топохімія цього процесу є предметом дискусії.

Деякі з існуючих теорій пояснюють дію інгібітору його розкладом в зоні горіння. Утворені при розкладі вільні радикали з інгібітору реагують з вільними радикалами горіння, спарюючи свій вільний електрон з вільним електроном активної частинки горіння і ліквідуючи таким чином обидві вільні валентності. Але активних частинок горіння кожної миті утворюється дуже мало – одна-дві на мільярди цілих молекул. А інгібітор – це сіль, гомоліз же солей, навіть при високих температурах, відбувається у дуже малій степені. Так що в системі і цих вільних радикалів кожної миті утворюється 1–2 на мільйони цілих молекул. Решта ж системи – це цілі молекули горючих парів, кисню, азоту і інгібітору. Вірогідність зустрічі двох активних частинок в натовпі з мільярдів інших молекул, – практично дорівнює нулю.

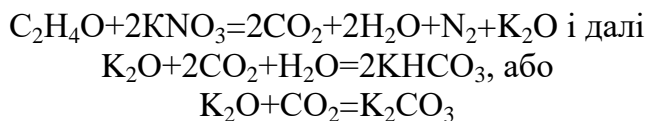
Не витримує критики і інший погляд. Взаємна дезактивація активних частинок при адсорбції їх на поверхні інгібітору, яка приводить до концентрування їх на цій поверхні; і далі, по законах кінетики хімічних реакцій, до різкого збільшення швидкості взаємодії між ними. Виключно висока селективність поверхні інгібітору саме до активних частинок горіння (а виловити їх треба з мільярдів інших) – пояснення не має. Крім того, горіння припиняють не лише тверді інгібітори, а й газоподібні та рідкі.

Більш вірогідним видається пояснення, запозичене в суміжній галузі, хімії високомолекулярних сполук, де інгібітори широко застосовуються в процесах ланцюгової радикальної полімеризації в розчинах. Варіюючи кількість інгібітору (як правило сполук хінонового ряду), можна регулювати ступінь полімеризації, або й зовсім припинити цей процес. Таке гальмування не може бути пов'язаним з дезактивацією ланцюгів, що ростуть, взаємодією їх між собою, оскільки навіть просторово ці ланцюги віддалені один від одного. Зникаюче мала і вірогідність зустрічі їх з продуктами розкладу інгібітору, який при температурах проведення процесів полімеризації в розчинах взагалі не розкладається. Лишається тільки взаємодія ланцюга, що росте, з цілими молекулами інгібітору, концентрація яких в розчині досягає грамів на літр. Інгібітор просто приєднується до вільного радикалу. Вільна валентність не пропадає, утворені нові молекули зберігають неспарений електрон. Але, на відміну від полімерного радикалу, що росте і має на кінці ланцюга групу  $\text{CH}_2$  з невеликою кількістю електронних пар на зовнішніх орбіталах, на кінці нової молекули розташована система, яка має на зовнішніх орбіталах



співвідношення сумарної маси в суміші окисника і відновника та маси носія.

Елементарна ланка полівинилового спирту має склад  $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{OH})-$ , або  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ . За рівнянням хімічної реакції для стехіометричного окислення полівинилового спирту:



Яка саме з двох останніх реакцій має місце – суті справи не змінює, так як калію карбонат і калію бікарбонат володіють практично однаковими інгібуючими властивостями. Але для утворення бікарбонату необхідна реакція відразу між чотирма молекулами, а для утворення карбонату – лише між двома, що кінетично значно вірогідніше. До того ж, при підвищених температурах поташ більш стійкий. Тому для подальших розрахунків до уваги брався саме другий варіант. Сумарна реакція в цьому випадку має вигляд:



На 44 г полівинилового спирту необхідно 202 г калію нітрату, тобто на 1 г полівинилового спирту – 4,5 г калію нітрату. Як носій використовується спучений вермікуліт фракцій 0,5–5 мм з питомою поверхнею 50–100 м<sup>2</sup>/г. Густина мінеральної частини цього матеріалу складає 2,50 г/см<sup>3</sup>, насипна густина спученого вермікуліту – 0,065 г/см<sup>3</sup>. Значить, кожен 1 мл частинок містить 0,065 г мінеральної речовини з густиною 2,50 г/см<sup>3</sup>, об'ємом 0,026 мл.

Густина полівинилового спирту – 1,25 г/см<sup>3</sup>, густина калію нітрату – 2,11 г/см<sup>3</sup>. Густина суміші 1 г полівинилового спирту з 4,5 г калію нітрату – 1,66 г/см<sup>3</sup>. 1 см<sup>3</sup> спученого вермікуліту вже містить 0,065 г речовини, отже, для збереження плавучості, для забезпечення насипної густини не більшої 0,8 г/см<sup>3</sup>, до одного мл носія можна іммобілізувати не більше 0,75 г потрібної суміші, або за мінусом об'єму, який займає мінеральна частина носія (0,026 см<sup>3</sup>), 0,414 мл її.

Таким чином 1 мл генератору вогнегасного аерозолю, призначеного для гасіння пожеж на поверхні водойми, буде містити в порах 0,56 см<sup>3</sup> повітря і 0,42 мл (0,70 г) суміші полівинилового спирту з калію нітратом, з яких 0,13 г полівинилового спирту і 0,57 г калію нітрату. В результаті окисно-відновної реакції ця суміш утворить 0,41 г  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , 0,11 г  $\text{H}_2\text{O}$ , 0,08 г  $\text{N}_2$  і 0,13 г  $\text{CO}_2$ . Це означає, що, в перерахунку на нормальні умови, з порожнин 1 см<sup>3</sup> гранул генератору повинно бути викинуто в оточуюче середовище 0,41 г дрібнодисперсного порошку поташу та газову фазу, яка складатиметься з 0,56 см<sup>3</sup> повітря, 64 см<sup>3</sup> новоутвореного азоту, 138 см<sup>3</sup> парів води і 162 см<sup>3</sup> вуглекислого газу. Загальний об'єм суміші 364 см<sup>3</sup>. При горінні нафти або тлінні торфу досягається температура, не менша за 1000 К. Тож дійсний об'єм хмари аерозолю, який може викинути 1 см<sup>3</sup> даного генератору, складатиме біля

$$364 \times 1000 / 273 \approx 1300 \text{ см}^3.$$

При застосуванні для попередження поширення пожеж на торфовищах плавучість засобу особливого значення не має. Хоча і тут занадто важкі гранули під

час дощів або весняних паводків можуть перемішатися з поверхневими шарами ґрунту і опинитися поза зоною виникнення горіння. Так що і в цьому випадку краще використовувати обчислене масове співвідношення:

спучений вермікуліт : ПВС :  $\text{KNO}_3=0,065:0,13:0,57$ , або 1:2:8,7.

### **5. Обговорення результатів дослідження процесів гасіння пожеж генераторами вогнегасного аерозолю**

Отримані результати підтверджують, що ефективність генераторів вогнегасного аерозолю на основі мінеральних носіїв визначається не одним окремим чинником, а поєднанням фізико-хімічного механізму інгібування, умов перебування засобу в зоні горіння та співвідношення компонентів системи «носій – відновник – окисник». Саме така комплексна постановка задачі дозволила перейти від загального уявлення про вогнегасну дію порошків і аерозолів до обґрунтування умов, за яких засіб може бути ефективним при гасінні пожеж розлитих горючих рідин на поверхні води та при попередженні поширення пожеж на торфовищах.

Результати, наведені у підрозділі 4.1, свідчать, що найбільш вірогідним механізмом інгібування є взаємодія активних радикалів горіння з цілими молекулами інгібітору з утворенням малоактивних радикальних комплексів. Таке трактування дозволяє пояснити вогнегасну дію аерозолю без припущення про визначальну роль гомолітичного розкладу солей або про селективну адсорбцію активних частинок на поверхні порошку. Перевагою цього підходу є те, що він узгоджується з малою ймовірністю зустрічі двох активних частинок у газовій фазі та з уявленням про делокалізацію неспареного електрона в новоутворених комплексах. Отже, запропонований механізм не лише пояснює припинення ланцюгових реакцій горіння, а й конкретизує вимоги до складу генератора: продукти його роботи повинні містити речовини, здатні формувати стабілізовані малоактивні радикали.

Результати підрозділу 4.2 показують, що одна й та сама аерозольна система повинна розглядатися по-різному залежно від умов застосування. Для пожеж горючих рідин на поверхні води вирішальним є забезпечення плавучості гранул, оскільки лише за цієї умови генератор залишається безпосередньо в зоні горіння і подає аерозоль саме туди, де відбувається найбільш інтенсивна взаємодія з активними частинками полум'я. Таким чином, на відміну від звичайних порошків, що можуть швидко втрачати контакт із зоною реакції, гранульований засіб на основі спученого вермікуліту здатен підтримувати просторово стабільне положення на межі поділу фаз. Для торфовищ, навпаки, ключового значення набуває не плавучість як така, а здатність аерозолю проникати в пористе середовище, створювати інертне газове оточення та реалізовувати тривалішу локальну вогнегасну дію. Це означає, що ефективність засобу визначається не лише складом аерозолю, але й особливостями середовища, у якому він застосовується.

Розрахунки, виконані у підрозділі 4.3, дозволили перейти від якісних міркувань до кількісної оцінки придатності системи. Встановлено, що оптимальне масове співвідношення «спучений вермікуліт : полівиніловий спирт : калію нітрат» становить 1:2:8,7. Саме таке співвідношення забезпечує компроміс між двома взаємно пов'язаними вимогами: з одного боку, необхідно ввести до пор носія достатню кількість активної суміші для генерації значного об'єму аерозолю, а з іншого – не перевищити густину, за якої гранули втрачають плавучість. Отриманий результат свідчить, що мінеральний носій у даній системі виконує не лише транспортну функцію, а є повноцінним елементом, який визначає умови реалізації вогнегасної дії.

Практично важливим є й те, що з 1 см<sup>3</sup> гранул може бути утворено близько 364 см<sup>3</sup> газоаерозольної суміші при нормальних умовах і близько 1300 см<sup>3</sup> при температурі порядку 1000 К. Це підтверджує, що навіть відносно невеликий об'єм гранульованого засобу здатний генерувати значну хмару інгібуючого аерозоллю безпосередньо в зоні горіння або тління. У контексті пожеж на воді це означає можливість локального швидкого впливу на полум'я без застосування великих мас традиційних вогнегасних речовин. У контексті торфових пожеж це вказує на перспективність формування локальних бар'єрних зон, у межах яких пригнічується розвиток тління та зменшується ймовірність поширення процесу вглиб і вбік.

Разом з тим результати дослідження мають певні обмеження. Насамперед запропоновані висновки щодо механізму інгібування мають теоретико-розрахунковий характер і потребують подальшої експериментальної перевірки на модельних осередках горіння та тління. Крім того, розрахунок об'єму аерозольної хмари виконано для прийнятих значень температури й стехіометричного складу системи, тоді як у реальних умовах пожежі ці параметри можуть змінюватися залежно від типу пального, швидкості тепловиділення, вологості торфу, вітрових умов і характеру розливу горючої рідини. Окремого вивчення потребує також поведінка гранул у динамічних умовах морської поверхні та в неоднорідному ґрунтово-торф'яному середовищі.

Таким чином, отримані результати показують, що застосування генераторів вогнегасного аерозоллю на основі високопористих мінеральних носіїв є науково обґрунтованим і практично перспективним напрямом для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні води та для попередження поширення пожеж на торфовищах. Наукова цінність отриманих результатів полягає в узгодженні механізму інгібування з вимогами до складу й будови засобу, а практична – у визначенні параметрів, які можуть бути використані під час подальшого конструювання та вдосконалення гранульованих аерозольних генераторів.

## 6. Висновки

1. Проведено аналіз фізико-хімічного механізму інгібування горіння та тління аерозольною хмарою. Встановлено, що інгібування відбувається шляхом взаємодії активних радикалів горіння з молекулами інгібітору з утворенням малоактивних радикалів з делокалізованим електроном, що призводить до обриву ланцюгових реакцій горіння на поверхні дрібнодисперсних частинок аерозоллю.

2. Визначено фактори, що впливають на ефективність застосування генераторів. Встановлено, що при гасінні пожеж горючих рідин на поверхні води основним фактором є плавучість гранул (насіпна густина не більше 0,8 г/см<sup>3</sup>), що забезпечує перебування засобу в зоні горіння, а при попередженні поширення пожеж на торфовищах ефективність забезпечується проникненням аерозоллю у пористу структуру торфу та створенням інертного газового середовища (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O).

3. Визначено оптимальний склад генератора та розраховано об'єм аерозольної хмари. Встановлено, що оптимальне масове співвідношення компонентів «спучений вермікуліт : полівініловий спирт : калію нітрат» становить 1:2:8,7; при якому 1 см<sup>3</sup> гранул утворює близько 364 см<sup>3</sup> газоаерозольної суміші при нормальних умовах, що відповідає приблизно 1300 см<sup>3</sup> аерозольної хмари при температурі близько 1000 К.

## Література

1. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2025

року. ДСНС України, 2026. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-2025.pdf>

2. Заблоцький В. Морські катастрофи. Неісторичний контекст. Defense Express, 2019. URL: <https://tyzhden.ua/morski-katastrofy-neistorychnyj-kontekst>

3. Кирилів Я. Б., Ковалишин В. В., Сукач Р. Ю. Пожежна небезпека торф'яників, торфорозробок та методи і засоби підвищення ефективності їх гасіння. Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2019. С. 59–65. URL: <https://chipb.dsns.gov.ua>

4. Єлагін Г. І., Тищенко О. М., Алексєєв А. Г., Нуянзін В. М., Майборода А. О. Виникнення і розвиток горіння та вибуху. Припинення горіння: підручник. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. 444 с. URL: <https://chipb.dsns.gov.ua>

5. Жартовський С. В., Мирошник О. М., Тищенко Є. О. Вогнегасні порошки та умови їх застосування: навч. посібник. Черкаси: Третьяков О. М., 2020. 250 с. URL: <https://chipb.dsns.gov.ua>

6. Патент України №147259. Спосіб виготовлення генератора вогнегасного аерозолі. Опубл. 21.04.2021. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1589449/>

7. Патент України №104989. Спосіб профілактики пожежонебезпечної площі торф'яного родовища. Опубл. 25.02.2016. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/849684/>

8. Патент України №135418. Спосіб обмеження розповсюдження пожеж на торф'яниках. Опубл. 25.06.2019. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php>

9. Патент України №91400. Вогнегасний засіб. Опубл. 10.07.2014. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1365886/>

10. Патент України №136531. Спосіб виготовлення вогнегасного засобу. Опубл. 27.08.2019. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1374117/>

11. Pasternak V., Samchuk L., Huliieva N., Andrushchak I., Ruban A. Investigation of the properties of powder materials using computer modeling. Materials Science Forum. 2021. Vol. 1038. P. 33–39. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.33

12. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko Y., Slepuzhnikov E., Nikorchuk A., Tsebriuk I. Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gas-detonation charge for fluid acceleration. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 3/5(93). P. 47–54. doi: 10.15587/1729-4061.2018.134193

13. Vambol S., Vambol V., Abees Hmood Al-Khalidy K. Experimental study of the effectiveness of water-air suspension to prevent an explosion. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1294. 072009. doi: 10.1088/1742-6596/1294/7/072009

14. Pilipenko A., Pancheva H., Reznichenko A., Myrgorod O., Miroschnichenko N., Sincheskul A. The study of inhibiting structural material corrosion in water recycling systems by sodium hydroxide. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 2/1(85). P. 21–28. doi: 10.15587/1729-4061.2017.95989

15. Abramov Y., Basmanov O., Salamov J., Mikhayluk A. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2018. № 2. P. 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12

16. Loboichenko V., Strelec V. The natural waters and aqueous solutions express-identification as element of determination of possible emergency situation. Water and Energy International. 2018. Vol. 61. Issue 9. P. 43–50. URL: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:wei&volume=61r&issue=9&article=008>

17. Vambol S., Bohdanov I., Vambol V., Suchikova Y., Kondratenko O., Nestorenko T., Onyschenko S. Formation of filamentary structures of oxide on the surface of monocrystalline gallium arsenide. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2017. Vol. 9(6). 06016. doi: 10.21272/jnep.9(6).06016

*M. Kutsenko, PhD, Associate Professor, Doctoral Student*

*O. Nuianzin, Dsc, Professor, Head of Laboratory*

*G. Yelagin, PhD, Senior Researcher, Senior Researcher of the Laboratory*

*D. Kryshstal, PhD, Senior Researcher of the Laboratory*

*A. Alekseyev, PhD, Associate Professor, Researcher of the Laboratory*

*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

## INVESTIGATION OF THE FIRE SUPPRESSION MECHANISM OF AEROSOL GENERATORS BASED ON MINERAL CARRIERS

The problem addressed in this work is the low efficiency of traditional fire extinguishing powders when extinguishing fires of spilled flammable liquids on water surfaces and when preventing the spread of peat fires, as well as the lack of a substantiated physicochemical mechanism of action and an optimal composition of such agents. The object of this study is the process of fire extinguishing using aerosol fire extinguishing generators based on highly porous mineral carriers. The aim of the study was to determine the mechanism of combustion inhibition by an aerosol cloud, to identify the factors affecting the efficiency of aerosol generators under different application conditions, and to substantiate the optimal composition of the generator. The topochemistry of the interaction between the fire extinguishing aerosol cloud and the active centers of chain reactions of combustion and smoldering was analyzed, the factors influencing the effectiveness of generators when extinguishing fires on water surfaces and when preventing the spread of peat fires were determined, and the volume of the aerosol cloud generated during the operation of the generator was calculated. It was established that combustion inhibition occurs due to the interaction of active radicals with inhibitor molecules resulting in the formation of low-reactive radicals with a delocalized electron, which leads to the termination of chain combustion reactions. It was shown that buoyancy of the granules is the determining factor for extinguishing fires on water surfaces, while the ability of the aerosol to penetrate into the porous structure and create an inert gas environment is important for preventing the spread of peat fires. Calculations showed that 1 cm<sup>3</sup> of generator granules produces about 364 cm<sup>3</sup> of gas-aerosol mixture under normal conditions, which corresponds to approximately 1300 cm<sup>3</sup> of aerosol cloud at a temperature of about 1000 K. The optimal mass ratio of the components “expanded vermiculite : polyvinyl alcohol : potassium nitrate” was determined to be 1:2:8.7. The obtained results make it possible to reasonably design aerosol fire extinguishing generators for various application conditions.

**Keywords:** fire extinguishing, fire, maritime transport, oil, peat, inhibition, aerosol generators, aerosol, immobilization, fire-extinguishing agent

### References

1. Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 12 months of 2025. State Emergency Service of Ukraine, 2026. Available at: <https://dsns.gov.ua/upload/2/5/5/1/7/8/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-2025.pdf>
2. Zablotskyi, V. (2019). Maritime disasters. Non-historical context. *Defense Express*. Available at: <https://tyzhden.ua/morski-katastrofy-neistorychnyj-kontekst>
3. Kyryliv, Ya. B., Kovalyshyn, V. V., Sukach, R. Yu. (2019). Fire hazard of peatlands and methods and means of improving the efficiency of their extinguishing. *Emergency situations: safety and protection*. Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes, 59–65. Available at: <https://chipb.dsns.gov.ua>
4. Yelagin, G. I., Tyshchenko, O. M., Alekseyev, A. G., Nuianzin, O. M., Maiboroda, A. O. (2020). Occurrence and development of combustion and explosion. *Combustion termination: textbook*. Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes, 444. Available at: <https://chipb.dsns.gov.ua>
5. Zhartovskyi, S. V., Myroshnyk, O. M., Tyshchenko, Ye. O. (2020). *Fire*

extinguishing powders and conditions of their application: учебник. Cherkasy: Tretiakov O. M., 250. Available at: <https://chipb.dsns.gov.ua>

6. Patent of Ukraine No. 147259. Method for manufacturing an aerosol fire extinguishing generator. Published 21.04.2021. Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1589449/>

7. Patent of Ukraine No. 104989. Method for prevention of fire-hazardous peat field areas. Published 25.02.2016. Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/849684/>

8. Patent of Ukraine No. 135418. Method for limiting the spread of peat fires. Published 25.06.2019. Available at: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php>

9. Patent of Ukraine No. 91400. Fire extinguishing agent. Published 10.07.2014. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1365886/>

10. Patent of Ukraine No. 136531. Method for manufacturing a fire extinguishing agent. Published 27.08.2019. Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1374117/>

11. Pasternak, V., Samchuk, L., Huliieva, N., Andrushchak, I., Ruban, A. (2021). Investigation of the properties of powder materials using computer modeling. Materials Science Forum, 1038, 33–39. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.33

12. Korytchenko, K., Sakun, O., Dubinin, D., Khilko, Y., Slepuzhnikov, E., Nikorchuk, A., Tsebriuk, I. (2018). Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gas-detonation charge for fluid acceleration. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/5(93), 47–54. doi: 10.15587/1729-4061.2018.134193

13. Vambol, S., Vambol, V. (2019). Abees Hmood Al-Khalidy K. Experimental study of the effectiveness of water-air suspension to prevent an explosion. Journal of Physics: Conference Series, 1294, 072009. doi: 10.1088/1742-6596/1294/7/072009

14. Pilipenko, A., Pancheva, H., Reznichenko, A., Myrgorod, O., Miroshnichenko, N., Sincheskul, A. (2017). The study of inhibiting structural material corrosion in water recycling systems by sodium hydroxide. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/1(85), 21–28. doi: 10.15587/1729-4061.2017.95989

15. Abramov, Y., Basmanov, O., Salamov, J., Mikhayluk, A. (2018). Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2, 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12

16. Loboichenko, V., Strelec, V. (2018). The natural waters and aqueous solutions express-identification as element of determination of possible emergency situation. Water and Energy International, 61, 9, 43–50. Available at: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:wei&volume=61r&issue=9&article=008>

17. Vambol, S., Bohdanov, I., Vambol, V., Suchikova, Y., Kondratenko, O., Nestorenko, T., Onyschenko, S. (2017). Formation of filamentary structures of oxide on the surface of monocrystalline gallium arsenide. Journal of Nano- and Electronic Physics, 9(6), 06016. doi: 10.21272/jnep.9(6).06016

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 31.05.2026