

*М.А. Куценко¹, І.П. Романюк², О.В. Кириченко¹, О.В. Ніконішин³,
Є.В. Школяр¹, Р.Б. Мотрічук¹, С. О. Хряпак¹, І.І. Іщенко¹*

*¹Національного університету цивільного захисту України,
м. Черкаси, Україна*

*²Головне управління ДСНС України в Полтавській області
м. Полтава, Україна*

*³Міністерство внутрішніх справ України,
м. Київ, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-9187> – М.А. Куценко
<https://orcid.org/0000-0003-0427-5645> – І.П. Романюк
<https://orcid.org/0000-0002-0240-1807> – О. В. Кириченко
<https://orcid.org/0009-0007-4657-4949> – О.В. Ніконішин
<https://orcid.org/0000-0002-7304-1677> – Є.В. Школяр
<https://orcid.org/0000-0002-5670-6788> – Р.Б. Мотрічук
<https://orcid.org/0000-0001-9078-976X> – С.О. Хряпак
<https://orcid.org/0009-0000-5050-4926> – І.І. Іщенко
shkoliar_yevhenii@nuczu.edu.ua

ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ ПОРОШКОВИХ ЗАСОБІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЦИХ ЗАСОБІВ

Проблема. Порошкові засоби гасіння пожеж, незважаючи на їхню високу ефективність та екологічну безпеку, мають низку обмежень, що ускладнюють їх застосування в умовах технологічних процесів та на об'єктах з підвищеним рівнем техногенної небезпеки. Серед основних недоліків — короткочасна дія, утворення щільної хмари пилу, що різко погіршує видимість, схильність до комкування при зберіганні, а також низька ефективність при гасінні розливів горючих рідин на великій площі (особливо на поверхні водойм), оскільки порошок не створює стійкого ізолюючого шару і не запобігає повторному займанню.

Мета. Обґрунтування шляхів удосконалення вогнегасних порошкових засобів шляхом іммобілізації вогнегасних солей на високопористих носіях (мінеральних та рослинних), що дозволяє усунути їх ключові експлуатаційні недоліки та розширити сферу застосування, зокрема для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойм та для попередження поширення пожеж на торфовищах.

Методи дослідження. У роботі використано порівняльний аналіз механізмів дії порошкових засобів, впливу дисперсності на вогнегасну ефективність порошкових сумішей, а також експертну оцінку технологічних обмежень при виготовленні та зберіганні. Запропоновано інженерні рішення на основі іммобілізації вогнегасячих солей на природних носіях.

Основні результати дослідження. Встановлено, що порошки мікронного розміру мають високу гасильну здатність, але є нестабільними при зберіганні. Як альтернативний підхід, що вирішує проблеми зберігання та комкування традиційних ВГП, розглядаються **системи аерозольного пожежогасіння**. У них вогнегасна речовина – **дрібнодисперсний аерозоль** – генерується безпосередньо в захищуваному приміщенні під час спрацювання генератора вогнегасного аерозолю. Розроблено метод іммобілізації активних компонентів на внутрішній поверхні капілярів високопористих мінералів або деревної тирси, що дозволяє стабілізувати властивості порошку та розширити сферу його застосування.

Висновки та конкретні пропозиції автора. Порошкові засоби гасіння можуть бути ефективно адаптовані для використання на складних об'єктах, зокрема для гасіння пожеж на водній поверхні та торфовищах, за умови вдосконалення їх фізико-хімічних характеристик. В статті пропонується впровадження технології іммобілізації вогнегасних солей на природних носіях як перспективний напрям для підвищення стабільності та функціональності порошкових рецептур.

Ключові слова: порошкові засоби, техногенна безпека, носії, іммобілізація, гасіння пожеж.

*M. A. Kutsenko¹, I. P. Romaniuk², O. V. Kyrychenko¹, O. V. Nikonishyn³,
Ie. V. Shkoliar¹, R. B. Motrichuk¹, S. O. Khriapak¹, I. I. Ishchenko¹*

¹National University of Civil Protection of Ukraine,

²State Emergency Service of Ukraine in Poltava region,

³Ministry of Internal Affairs of Ukraine

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF POWDER FIRE EXTINGUISHING AGENTS AND WAYS OF IMPROVING THESE AGENTS

Problem. Powder fire extinguishing agents, despite their high efficiency and environmental safety, have a number of limitations that complicate their use in technological processes and at facilities with an increased level of technogenic hazard. Among the main disadvantages we may mention short-term action, high specific density, tendency to clump during storage, and unsuitability for extinguishing fires of flammable liquids on the surface of water bodies and peatlands.

Purpose. Substantiation of the methods for improving dry powder extinguishing agents by immobilizing extinguishing salts onto highly porous carriers (mineral and plant-based), which allows for the elimination of their key operational drawbacks and the expansion of their scope of application, specifically for extinguishing flammable liquid fires on water surfaces and for preventing fire spread on peatlands.

Research methods. The work uses a comparative analysis of the mechanisms of action of powder agents, modeling of the influence of particle size on extinguishing efficiency, as well as an expert assessment of technological limitations in manufacturing and storage. Engineering solutions based on the immobilization of fire-extinguishing salts on natural carriers are proposed.

Main results of the study. It was found that micron-sized powders have high extinguishing capacity, but are unstable during storage. An alternative approach is proposed - the formation of the powder directly during the operation of the fire-

extinguishing aerosol generator. A method of immobilizing active components on the inner surface of the capillaries of highly porous minerals or wood sawdust has been developed, which allows stabilizing the properties of the powder and expanding the scope of its application.

Author's conclusions and specific suggestions. Powder extinguishing agents can be effectively adapted for use on complex objects, in particular for extinguishing fires on water surfaces and peatlands, provided that their physicochemical characteristics are improved. The article proposes the implementation of the technology of immobilization of fire extinguishing salts on natural carriers as a promising direction for increasing the stability and functionality of powder compositions in fire prevention systems of technological processes.

Key words: fire prevention, powder products, technological processes, technogenic safety, immobilization, fire extinguishing.

Постановка проблеми. Порівняно з охолоджуючими (водою та її розчинами), флегматизуючими (інертні гази) і ізолюючими (вогнегасні піни), засоби, що діють за фізико-хімічним механізмом інгібування (хладони та вогнегасячі порошкові композиції), при гасінні однакових за площею і за потужністю пожеж, вимагають значно менших кількостей і припиняють горіння в коротші терміни. При цьому, з точки зору екології порошки мають суттєві переваги. Суттєвою перевагою вогнегасних порошоків є їхня відносна екологічна безпечність порівняно з іншими вогнегасними речовинами. На відміну від хладонів, використання яких обмежене через високий озоноруйнівний потенціал, та фторвмісних піноутворювачів, які спричиняють довгострокове токсичне забруднення ґрунтів та вод стійкими сполуками, вогнегасні порошки не мають такого критичного впливу на довкілля.

До експлуатаційних переваг порошоків також належить зручність зберігання, оскільки вони не вимагають значних площ чи особливих умов (окрім захисту від вологи), а також простота застосування, що не потребує складного і габаритного обладнання.

Недоліки – відносно короткочасна дія і обмежена область застосування та деякі технологічні труднощі при виготовленні. Саме на вдосконалення цих показників порошкових вогнегасних засобів повинні спрямовуватися дослідження з їх модернізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При горінні органічних речовин основними проміжними частинками є вільні радикали. Ці частинки дуже активні, за короткий проміжок часу (за 10^{-8} – 10^{-9} частки секунди) вони встигають перетворитися у нові сполуки самі і ініціювати утворення нових вільних радикалів. Кожен з вільних радикалів здатен започаткувати до мільярда перетворень за одну секунду. Вилучення з процесу більшості таких частинок веде до уповільнення розвитку горіння і до повного його припинення [1]. Кожної миті в горючій суміші їх досить мало, тому введення в зону горіння 2-3 % від об'єму цієї зони хімічно активного інгібітору звичайно є достатнім для дезактивації наявних вільних радикалів і для придушення вогню. Для порівняння, для гасіння такої ж пожежі флегматизуючого агенту (інертного газу) треба ввести в 20-30 разів більше.

Типовими інгібуючими засобами є галогеновуглеводні (фреони або хладони) і порошкові вогнегасячі композиції. При цьому, фреони більш ефективні ніж порошкові композиції. Але галогеновуглеводні шкідливі для оточуючого середовища і персоналу, який з ними працює. До того ж, вважається, що фреони відповідальні за появу дірок в захисному озоновому шарі Землі, і наприкінці 80-х років минулого століття Монреальським протоколом про речовини, що руйнують озоновий шар було рекомендовано заборонити застосування і навіть виробництво галогеновуглеводнів, особливо найбільш летючих з них, хладонів: 14 (CCl_4), 13 (CF_3Cl), 13B1 (CF_3Br), 115 ($\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$), 12 (CF_2Cl_2) та 12B1 (CF_2ClBr). Порошкові вогнегасячі композиції цього недоліку позбавлені. Їх головні компоненти – фосфати, карбонати і бікарбонати амонію, калію та натрію, тобто солі, які звичайно застосовуються в якості мінеральних добрив [2]. Для зниження комкування при збереженні за рахунок злипання окремих частинок в агломерати, до суміші додають

компоненти, які гідрофобізують композицію і забезпечують сипучість порошку. Ці добавки також являють собою солі, нешкідливі для оточуючого середовища.

Невирішені раніше частини загальної проблеми. Основною перевагою порошкових вогнегасячих композицій є невелика, порівняно з іншими засобами, витрата засобу для гасіння однакових пожеж, що пояснюється інгібуючим ефектом. Цей ефект є основним фізико-хімічним механізмом дії таких композицій [1, 2]. Але деякий вплив мають і додаткові фактори. Висока теплоємність мінеральних солей, а також значні витрати тепла на їх плавлення, випаровування та розклад, призводять до інтенсивного поглинання енергії із зони горіння, спричиняючи її помітне охолодження [1, 2]. До переваг порошків відносяться також відсутність необхідності в створенні якихось особливих умов при їх зберіганні і простота доставки до місця пожежі. Недоліки цих засобів пов'язані в-основному з їх питомою густиною. Доволі швидко осідаючи на поверхню, вони залишають зону горіння. Покрити всю поверхню порошок не здатний, тому можливим є залишення окремих тліючих осередків, що може викликати повторне загорання [1, 2]. Питома густина будь-якої солі вдвічі-втричі більша за густину води. Крім того, практично всі солі, які входять до складу порошкових вогнегасячих композицій, водорозчинні. Це звужує область застосування порошків. Зокрема, унеможливорює ефективне застосування порошків при гасінні значних розливів горючих рідин (бензину, нафти) на поверхні водойм. На відміну від спеціалізованих пін, вогнегасний порошок не здатен утворювати на поверхні води стійкий ізолюючий шар. Частинки порошку швидко осідають (тонуть), що не запобігає повторному займанню рідини від нагрітих конструкцій чи прилеглих осередків горіння.

Мета статті – обґрунтування шляхів удосконалення вогнегасних порошкових засобів шляхом іммобілізації вогнегасних солей на високопористих носіях (мінеральних та рослинних), що дозволяє усунути їх ключові експлуатаційні недоліки та розширити сферу застосування, зокрема

для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойм та для попередження поширення пожеж на торфовищах.

Виклад основного матеріалу. При визначенні оптимальних розмірів частинок звичайного порошкового засобу виникають протиріччя. При застосуванні порошку, чим менші розміри мають ці частинки, тим вони ефективніші, так як мають більшу сумарну поверхню. Але, виробництво занадто дрібних порошоків викликає деякі технологічні труднощі. Кінцева операція при їх виготовленні – сушка, яка проводиться у повітряному потоці з наступним відділенням від повітря. А дуже дрібний порошок схильний проскакувати крізь усі фільтри. Усуненням цього недоліку було створення генераторів вогнегасного аерозолі. В них вогнегасний порошок мікронних розмірів утворюється під час роботи генератора і, тому на злежування у нього немає часу. Це дозволяє підвищити вогнегасну здатність порошку, однак він починає рухатись разом з повітрям, як і газуваті вогнегасні засоби: вуглекислий газ, азот та фреони, і може використовуватися переважно в закритих приміщеннях.

Пожежі горючих рідин на поверхні водойми виникають при аварії танкерів, які у великих кількостях перевозять нафту і продукти її переробки. В зв'язку з тим, що всі ці вуглеводні легші за воду, водою припинити їх горіння неможливо. Вода навіть збільшує площу пожежі, сприяючи розтіканню вуглеводнів. Для гасіння флегматизуючими засобами (інертними газами) або хладами треба створити значну концентрацію гасячого агента, що на відкритому просторі практично недосяжно. Звичайні порошкові засоби бажаного ефекту при гасінні таких пожеж теж не дають. Питома густина солей, що входять до складу порошкових композицій, більша за 3 г/см^3 . Це значно перевищує питому густину і води і вуглеводневих рідин. Будь-який порошок відразу після нанесення занурюється під поверхню і залишає зону горіння, яка в рідинах знаходиться над поверхнею. На практиці, з різним успіхом для припинення горіння нафтопродуктів на поверхні водойми застосовують повітряно-механічні піни. В умовах моря чи океану це дуже складно і дорого.

До того ж, переважна більшість піноутворювачів має синтетичне походження і несе непоправну шкоду флорі та фауні водойми і прибережжя. Більшість відомих на сьогодні пожеж горючих рідин на поверхні водойми ліквідовувалися, як правило, лише після повного вигорання розлитої речовини. Наслідками таких інцидентів ставали прямі економічні збитки (через знищення цінного продукту) та масштабне екологічне забруднення атмосфери і водного басейну продуктами горіння та залишками речовини.

Дуже складно гасити пожежі і на торфовищах, що обумовлено декількома факторами. Ці пожежі поширюються і поверхнею і під нею. Ізоляційні засоби гасіння, у тому числі повітряно-механічні піни, тут непридатні, оскільки пористий торф має у своїй структурі повітря у кількості, достатній для підтримання стійкого горіння, так що наявність зовнішнього повітря для горіння торфу не критична. Створити значну концентрацію флегматизатору чи хладону тут, як і на морі, теж неможливо. Пожежу, яка поширюється торфовищем, неможливо загасити і вогнегасячим порошком. Цей засіб можна розпилити лише на поверхню. Під поверхню ж, де в основному горіння поширюється тлінням, він не проникає. Єдиним засобом, який використовується для гасіння пожеж торфовищ сьогодні, є засіб охолоджуючий – вода. На жаль, задовільних результатів це не дає. При подаванні води на поверхню, вона або на поверхні ж і лишається, або стікає струмочками в окремі порожнини і тління не припиняє. Для ліквідації тління використовують спеціальне складне обладнання, зокрема довгі стволи, які занурюють на десятки метрів [3, 4]. Крізь ці стволи подають дуже велику кількість холодної води, в середньому використовують тонну води для припинення тління 1 кубометру торфу. А цю воду треба ще й доставляти, і найчастіше за десятки кілометрів. В більшості випадків пожежі на торфовищах продовжуються тижнями, а то й місяцями.

Не менших зусиль вимагає і попередження поширення таких пожеж. Мета, яка тут звичайно ставиться, – обмежити район пожежі, не дати їй поширюватися за певні межі. Сучасні рекомендації з досягнення цієї мети

включають три моменти: профілактична робота з населенням, обладнання протипожежних розривів і заводнення торф'яників. Робота з населенням здебільшого має чисто формальне значення. Інші два методи базуються на зниженні навколо потенційної зони горіння кількості горючих речовин.

Заводнення осушених торф'яників полягає у створенні комплексу з мережі каналів зі спеціальними засувками для затримання води. Щоб створити необхідний обсяг води в каналах, прокладають тимчасові багатокілометрові трубопроводи, якими воду переміщують з великих відстаней, або, в кращому випадку, перекачують її з довколишніх водойм. Канали доводиться часто поповнювати, особливо спекотнім літом. Все це вимагає великої кількості техніки і значних працевтрат.

Для обладнання протипожежних розривів певні площі обмежують широкими канавами і викопаними ровами. Копають до ґрунтових вод або до мінерального ґрунту. Для попередження запливання і наступного заповнення каналів торфом, рови заповнюють негорючим фільтруючим матеріалом, набивними палями у ґрунтоцементній оболонці, або встановлюють в ровах азбоцементні труби, заповнені вогнетривким штучним (шамот, шлак) чи природним (кварцовий пісок, каолін) матеріалом [5]. За іншим методом для заповнення ровів використовують суспензією з води та бентонітової глини або сумішшю речовин, здатних при підвищенні температури розкладатися з виділенням вуглекислого газу [6]. Усі ці методи вимагають дуже великих витрат і праці, яку можна назвати титанічною. І спрямовані вони на захист від пожежі, яка вже виникла і поширюється всією глибиною торф'яника. Вихідним постулатом є пануюча гіпотеза про виникнення загорання саме в глибині торфовища за тепловим або мікробіологічним механізмом самозагорання. Між тим, в останні роки більшість провідних вчених цієї галузі вказують на дуже малу вірогідність реалізації такого механізму в масі торф'яника. Адже цей механізм передбачає попередній прогрів маси до температури самозаймання, що в умовах поверхневого зеленого світло- і теплоізолюючого шару неможливо навіть у дуже спекотну погоду. Самозаймання торфу може відбутися лише в

місцях його видобутку, де висушений продукт чорного кольору лежить великими штабелями і поглинає сонячне випромінювання.

Згідно сучасним поглядам, полум'я на торфовищах виникає за примусовим фізико-хімічним механізмом. Практично це завжди пов'язано з підпалом. Причому найчастіше з навмисною або випадковою дією людини (з кинутими не загашеними недопалками та сірниками, вогнищами, залишеними без нагляду, іскрами з глушників автомашин та мотоциклів). В дуже рідких випадках підпал може викликати блискавка. Але у будь-якому випадку виникає вогонь не в глибині, а на поверхні. Вже потім, крім поверхні, іде поширення і в глибину. Це означає, що захищати слід саме поверхневі шари. Звичайно краще всього було б постійно тримати всю поверхню торфовища зволоженою. Практично ж це неможливо, особливо у найбільш пожежонебезпечний період, у літні місяці. Вода буде за лічені години, а то й хвилини, випаровуватись. На певний період, зважаючи на ефективність дії і екологічність, в якості профілактичного засобу можна було б розсіяти по потенційно небезпечній поверхні розраховану кількість вогнегасного порошку. Зрозуміло, що це дорого, але не дорожче ніж гасити таку пожежу, або огорожувати потенційно небезпечні ділянки багатокілометровими глибокими ровами. На жаль, саме для застосування з цією метою, як і для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойми, сучасні вогнегасні порошки непридатні. Головні їх компоненти – водорозчинні солі. Отже, перший же дощ, або навіть роса, вимийть порошок у нижчі шари.

Таким чином, головним шляхом вдосконалення вогнегасних порошкових засобів можна вважати модифікацію їх у напрямку розширення сфери застосування з тим, щоб зробити ці засоби придатними для гасіння найбільш складних пожеж – горіння вуглеводневих рідин на поверхні водойми, та для попередження поширення пожеж на торфовищах, що дотепер вимагає великої кількості техніки і значних працевтрат. В обох випадках бажано, щоб ці засоби були відносно недорогими і екологічно безпечними. Для припинення горіння вуглеводневих рідин на поверхні водойми треба забезпечити їх певну плавучість, тобто постійне знаходження у зоні горіння рідини. Для

попередження поширення пожежі на торфовищі її треба придушити в самому початку. А, так як виникає ця пожежа на поверхні, необхідно захищати саме поверхню, Причому засіб повинен бути таким, який вимагатиме не постійної участі обслуговуючого персоналу, а лише періодичного, раз на два-три роки, поповнення нанесеного шару. В обох випадках засоби повинні довго лишатися неушкодженими на поверхні моря чи торфовища, зберігаючи вогнегасні властивості. Запускатися ж власне механізм гасіння повинен при підвищенні температури, тобто при виникненні полум'я.

Одним з можливих шляхів розробки вогнегасних засобів, які б відповідали перерахованим вимогам, є виготовлення і використання вогнегасних солей, нанесених на внутрішню поверхню порожнин високопористих носіїв. Такі засоби в останні роки розробляються в Національному університеті цивільного захисту України [7 - 18]. Розроблено два основних різновиди: з використанням в якості носія мінеральної основи – спученого вермикуліту або спученого перліту [7] та з використанням тирси деревини [8]. В обох випадках в дуже вузькі пори носія іммобілізуються водні розчини вогнегасних солей, переважно фосфатів амонію. Наступне висушування залишає шар солі, адсорбований на внутрішніх стінках капілярів носія. Малий діаметр капілярів і значний поверхневий натяг водних розчинів перешкоджають прямому введенню розчинів, тому доводиться застосовувати спеціальну процедуру.

У випадку мінеральних носіїв з їх жорсткою структурою використовується вакуумна техніка. Гранули вермикуліту розміщуються під поверхнею розчину і утримуються сіткою з розміром вічка, меншим, ніж розмір гранули. Під дією невеликого вакууму з капілярів відсмоктується повітря. Після ж наступного з'єднання простору над сіткою з атмосферним тиском, повітря в капілярах заміщається розчином вогнегасної солі. Висушування залишає легкі гранули, капіляри в яких заповнені адсорбованою вогнегасною сіллю. Співвідношення носій:сіль регулюється так, щоб насипна маса висушеного продукту була не більшою за $0,7-0,8 \text{ г/см}^3$, що при застосуванні дозволяє засобу завжди плавати на поверхні горючої рідини, тобто саме в зоні горіння.

Тирса ж деревини, завдяки еластичності стінок капілярів, дозволяє заповнювати ці капіляри без вакууму, просто декілька разів стискаючи і відпускаючи масу тирси у розчині, який ця маса вбирає подібно губці.

Кожен з носіїв має свої переваги. Гранули вермикуліту відрізняються достатньо великими розмірами (від 0,5 мм до 5 мм) при дуже низькій насипній масі ($0,065-0,150 \text{ г/см}^3$). Підприємствами спучених матеріалів вони випускаються розсіяними по фракціях. Це дозволяє варіювати розміри частинок вогнегасного засобу, підбирати гранули так, щоб вони мали оптимальну величину. Були достатньо малими, щоб забезпечити покриття якомога більшої поверхні, але достатньо великими, щоб не виноситись із зони горіння конвективними потоками відразу після введення. Основний недолік засобу на основі мінерального носія – необхідність застосування при виготовленні вакуумної техніки. Хоча потрібне тут розрідження і невелике ($P_{\text{залишкове}} = 400-500 \text{ мм рт. ст.}$), все ж його необхідність збільшує собівартість.

Тирса деревини з цієї точки зору виглядає більш привабливою. Її недолік – більша насипна маса. Це, з огляду на необхідність забезпечення потрібної плавучості засобу, дещо обмежує можливості введення значної кількості вогнегасної солі.

При застосуванні для гасіння пожеж вуглеводневих рідин на поверхні водойми, гранули на основі спученого вермикуліту розташовуються на поверхні рідини та під дією вогню поступово віддають адсорбовані солі, які і придушують горіння.

Просочена вогнегасними солями тирса (використовуючи її як носій) при такому застосуванні залишається в зоні горіння, але не підтримує його. Горінню перешкоджає процес інгібування, який забезпечують солі, що є активними компонентами вогнегасних порошків, – найчастіше фосфати або бікарбонати. Натомість, поверхневі шари деревини швидко піролізуються, перетворюючись у газоподібні речовини і вивільняючи вогнегасні солі.

Головним фізико-хімічним механізмом гасіння пожежі в обох випадках є механізм інгібування, тобто дезактивації активних частинок горіння. Але,

розташовуючись на поверхні горючої рідини, вони додатково ще й зменшують поверхню випаровування цієї рідини, що знижує кількість горючого матеріалу, який надходить у зону горіння, адже горить не сама рідина, а її пари після того, як вони у зоні горіння перемішаються з повітрям.

Виготовлення засобів на основі високопористих носіїв, іммобілізованих вогнегасними солями, для використання в якості попереджувачів поширення пожеж навіть простіше, ніж призначених для гасіння рідин: не треба піклуватися про плавучість, тобто не треба приймати заходи для регулювання насипної маси, можна ввести максимальну кількість вогнегасної компоненти.

Проте, ключовим недоліком такого підходу є висока розчинність вогнегасних солей у воді. Це призводить до їх неминучого вимивання (вилуговування) з пористого носія під дією атмосферних опадів, що зводить нанівець довгостроковий ефект просочення.

Твердження про те, що поверхневий натяг води завадить їй проникнути в пори, не витримує критики, оскільки воно ігнорує гігроскопічність самих солей та капілярні ефекти.

Саме тому шлях вдосконалення цього методу лежить у додатковій іммобілізації солі. Цього можна досягти шляхом гідрофобізації просоченого носія, наприклад, обробкою кремнійорганічними (силіконовими) рідинами або іншими водовідштовхувальними зв'язуючими речовинами, які створять захисний бар'єр без погіршення вогнегасних властивостей.

При підвищенні ж температури, як і у випадку горіння рідин, засоби на основі спученого вермикуліту віддаватимуть вогнегасні компоненти за рахунок десорбції, а засоби на основі тирси – після піролізу носія. Вказані особливості дозволять вносити такий засіб один раз на три-чотири роки.

Однією з переваг таких засобів є і їх абсолютна нешкідливість для оточуючого середовища. Спучений вермикуліт в сільському господарстві застосовується для структурування ґрунтів, солі амонію – в якості мінеральних добрив, а тирса деревини – натуральна речовина.

Запропонований метод принципово змінює технологічний ланцюг, усуваючи необхідність роботи з дрібнодисперсним пилом на етапах виробництва. Основні технологічні операції проводяться з водними розчинами солей, що кардинально покращує умови та гігієну праці, усуваючи ризики для органів дихання.

Хоча технологія включає енергозатратну стадію висушування просочених гранул, кінцевий продукт (з ефективним діаметром 2-4 мм) значно легше відділяти стандартними промисловими методами (циклони, вібросита), ніж мікронний пил традиційних ВГП. Це також спрощує процеси фасування та знижує втрати готового продукту.

Проведені техніко-економічні розрахунки [9, 11] показали, що, навіть при організації випуску на пілотних установках, очікувана собівартість виготовлених даним методом засобів є конкурентоспроможною. Вона нижча, ніж ринкова ціна найбільш поширених сьогодні вогнегасних порошків загального призначення (класу А, В, С).

Висновки. Розглянуто переваги і недоліки порошкових засобів гасіння пожежі. Відмічено, що на сьогоднішній день з вогнегасних засобів по системі «ефективність-екологічність» найкращими є саме порошкові композиції. Показані недоліки цих засобів, які обмежують область їх застосування, зокрема непридатність їх для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойм і для попередження поширення пожеж на торфовищах, а також наявність деяких труднощів при виготовленні. При гасінні пожеж горючих рідин на поверхні водойм показано необхідність застосування вогнегасного засобу, який здатен довгий час залишатися на поверхні рідини, тобто в зоні горіння її парів. Наголошується, що на торфовищі пожежа у переважній більшості випадків виникає не за механізмом самозагорання в його товщі, а на поверхні - за механізмом примусового загорання, в зв'язку з чим попередження поширення цих пожеж доцільно організовувати шляхом придушення вогню в момент його виникнення і саме на поверхні.

Запропоновано шляхи вдосконалення порошкових засобів, які полягають в іммобілізації вогнегасних солей на внутрішню поверхню капілярів високопористих мінеральних носіїв (спученого вермикуліту) і в іммобілізації цих солей на внутрішню поверхню капілярів тирси деревини. Вказані шляхи дозволяють розширити область застосування порошкових засобів, зокрема з успіхом використовувати їх для гасіння пожеж горючих рідин на поверхні водойм і для попередження поширення пожеж на торфовищах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Єлагін Г.І., Тищенко О.М., Алексєєв А.Г., Нуянзін В.М., Майборода А.О. Теорія виникнення, розвитку, горіння та вибуху. Припинення горіння. Черкаси: ЧПБ, 2020. 490 с.
2. Жартовський С.В., Мирошник О.М., Тищенко Є.О. Вогнегасні порошки та умови їх застосування: навч. посіб. Черкаси: вид. Третяков О.М., 2020. 250 с.
3. Спеціальний пожежний ствол для гасіння підземних пожеж: пат. 133683 Україна: МПК А62С 3/02 (2006.01) / Ковалишин В.В., Сукач Р.Ю., Антонов А.В.; заявник і власник — Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. — № u2018 07685; заявл. 09.07.2018; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8.
4. 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: Матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 59–65.
5. Спосіб профілактики пожежонебезпечної площі торф'яного родовища: пат. 104989 Україна: МПК А62С 3/02 (2006.01) / Бідношея В.Я., Петруняк М.В.; заявники і власники — Бідношея В.Я., Петруняк М.В. — № u2015 09765; заявл. 2015; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4.

6. Спосіб обмеження розповсюдження пожеж на торф'яниках: пат. на корисну модель № 135418 Україна / Поздєєв С.В. та ін.; заявник і власник — Мигаленко К.І. — № u201901248; заявл. 07.02.2019; чинне з 25.06.2019; опубл. 25.06.2019, Бюл. № 12.

7. Вогнегасний засіб: пат. на корисну модель № 91400 Україна / Єлагін Г.І., Кришталь М.А., Палагін Р.А.; заявники і власники — Єлагін Г.І., Кришталь М.А., Палагін Р.А. — Опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13/2014.

8. Спосіб виготовлення вогнегасного засобу: пат. на корисну модель № 136533 Україна / Єлагін Г.І., Ющук Ю.О., Алексєєва О.С.; заявники і власники — Єлагін Г.І., Ющук Ю.О., Алексєєва О.С. — Опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16/2019.

9. Єлагін Г.І., Куценко М.А., Алексєєва О.С., Ющук І.О., Наконечний В.В., Заїка П.І. Техніко-економічне обґрунтування організації виготовлення засобів для гасіння пожеж горючих рідин на основі вогнегасних солей, іммобілізованих пористим носієм. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивіл. захисту України. 2019. Т. 3, № 1. С. 42–50.

10. Спосіб виготовлення вогнегасного засобу: декларац. пат. на корисну модель № 141870 Україна / Єлагін Г.І., Нуянзін О.М., Тищенко Є.О., Алексєєва О.С., Наконечний В.В.; заявники і власники — Єлагін Г.І., Нуянзін О.М., Тищенко Є.О., Алексєєва О.С., Наконечний В.В. — Опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8.

11. Куценко М.А., Єлагін Г.І., Алексєєв А.В., Наконечний В.В., Алексєєва О.С. Обґрунтування техніко-економічної доцільності гасіння пожеж розлитих горючих речовин засобами на основі пористих носіїв з іммобілізованими вогнегасними речовинами. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивіл. захисту України. 2021. Т. 5, № 1. С. 67–77.

12. Jelagin G., Kutsenko M., Alekseev A., Nuianzin A., Nesen I. Extinguishing media for spilled flammable liquids. *The Scientific Heritage* (Budapest, Hungary). 2022. Vol. 1, No. 84. P. 15–25.
13. Несен І.О., Єлагін Г.І., Алексєєва О.С., Ножко І.В., Куценко М.А., Алексєєв А.В. До проблеми попередження пожеж на торфовищах. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивіл. захисту України. 2022. Т. 6, № 1. С. 69–74.
14. Elagin G.I., Crystal D.O., Tishchenko E.O., Kutsenko M.A., Alekseeva O.S., Alekseev A.G., Zaïka P.I. Physical-chemical mechanism of extinguishing and warning of fires by facilities on basis of high-porous transmitters. *Colloquium-journal*. 2024. № 11 (204), Część 1. P. 36–41.
15. Куценко М.А., Єлагін Г.І., Алексєєв А.В., Алексєєва О.С. Економічний ефект застосування засобів на основі вогнегасних солей, іммобілізованих пористим носієм для гасіння пожеж горючих рідин. Цивільна безпека: державне управління та кризовий менеджмент. 2022. С. 6–19.
16. Несен І.О., Куценко М.А., Єлагін Г.І., Алексєєва О.С., Нуянзін О.М., Алексєєв А.Г., Словінський В.К. Оцінка кількості шкідливих речовин в продуктах згоряння при пожежі на торфовищах, та екологічних втрат внаслідок такої пожежі. *Colloquium-journal*. 2023. № 4 (163), Część 1. P. 52–57.
17. Спосіб запобігання поширенню пожежі на торфовищі: пат. на корисну модель № 153448 Україна / Несен І.О. та ін.; заявники і власники — Несен І.О., Єлагін Г.І., Алексєєва О.С., Копитін Д.Е., Нуянзін О.М., Алексєєв А.Г., Куценко М.А., Ножко І.О., Гончар С.В., Халявко В.В. — № u202300355; заявл. 02.02.2023; чинне з 06.07.2023; опубл. 05.07.2023, Бюл. № 27.
18. Elagin G., Kutsenko M., Alekseev A., Nuianzin A., Alekseeva E., Crystal D., Vedula S. Development of fire prevention measures on peat plates. *The Scientific Heritage*. 2024. No. 136. P. 36–43.

REFERENCES

1. Yelagin, H.I., Tyshchenko, O.M., Alekseev, A.H., Nuianzin, V.M., & Maiboroda, A.O. (2020). *Teoriia vynyknennia, rozvytku, horinnia ta vybukhu. Prypynennia horinnia* [Theory of fire initiation, development, combustion and explosion. Fire suppression]. Cherkasy: ChIPB [in Ukrainian].
2. Zhartovskiy, S.V., Myroshnyk, O.M., & Tyshchenko, Ye.O. (2020). *Vohnehasni poroshky ta umovy yikh zastosuvannia* [Fire extinguishing powders and conditions of their use]. Cherkasy: Tretiakov O.M. Publishing [in Ukrainian].
3. Kovalyshyn, V.V., Sukach, R.Yu., & Antonov, A.V. (2019). *Spetsialnyi pozhezhnyi stvol dlia hasinnia pidzemnykh pozhezh* [Special fire nozzle for extinguishing underground fires] (Ukraine Patent No. 133683). Lviv State University of Life Safety. [in Ukrainian].
4. Kyryliv, Ya.B., Kovalyshyn, V.V., & Sukach, R.Yu. (2019). Pozhezhna nebezpeka torfianyky, torforozrobok ta metody i zasoby pidvyshchennia efektyvnosti yikh hasinnia [Fire hazard of peatlands, peat deposits and methods and means of increasing extinguishing efficiency]. In *Nadzvychaini sytuatsii: bezpeka ta zakhyst* (pp. 59–65). Proceedings of the IX All-Ukrainian Scientific-Practical Conference with International Participation. Cherkasy: ChIPB im. Heroiv Chornobyla NUCUZ Ukrainy [in Ukrainian].
5. Bidnosheia, V.Ya., & Petrunyak, M.V. (2016). *Sposib profilaktyky pozhezhonebezpechnoi ploshchi torfianoho rodovyshcha* [Method for preventing fire-hazardous area of peat deposit] (Ukraine Patent No. 104989 [in Ukrainian].
6. Pozdiiev, S.V., Mygalenko, K.I., Zemlianskyi, O.M., Kutsenko, S.V., Kostyrka, O.V., Nuianzin, V.M., et al. (2019). *Sposib obmezhennia rozpovsudzhennia pozhezh na torfianykh* [Method for limiting the spread of fires on peatlands] (Ukraine Utility Model No. 135418). [in Ukrainian].
7. Yelagin, H.I., Kryshchal, M.A., & Palahin, R.A. (2014). *Vohnehasnyi zasib* [Fire extinguishing agent] (Ukraine Utility Model No. 91400). Published 10.07.2014, Bulletin No. 13/2014 [in Ukrainian].
8. Yelagin, H.I., Yushchuk, Yu.O., & Alekseeva, O.S. (2019). *Sposib vyhotovlennia vohnehasnoho zasobu* [Method for producing fire extinguishing agent]

(Ukraine Utility Model No. 136533). Published 27.08.2019, Bulletin No. 16/2019 [in Ukrainian].

9. Yelagin, H.I., Kutsenko, M.A., Alekseeva, O.S., Yushchuk, I.O., Nakonechnyi, V.V., & Zaika, P.I. (2019). Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia orhanizatsii vyhotovlennia zasobiv dlia hasinnia pozhezh horiuchykh ridyn na osnovi vohnehasnykh solei, immobilizovanykh porystym nosiiem [Technical and economic justification for the production of fire extinguishing agents for flammable liquids based on immobilized fire salts on porous carriers]. *Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia – Emergency Situations: Prevention and Response*, 3(1), 42–50 [in Ukrainian].

10. Yelagin, H.I., Nuianzin, O.M., Tyshchenko, Ye.O., Alekseeva, O.S., & Nakonechnyi, V.V. (2020). Sposib vyhotovlennia vohnehasnoho zasobu [Method for producing fire extinguishing agent] (Ukraine Utility Model No. 141870). Published 27.04.2020, Bulletin No. 8 [in Ukrainian].

11. Kutsenko, M.A., Yelagin, H.I., Alekseev, A.V., Nakonechnyi, V.V., & Alekseeva, O.S. (2021). Obgruntuvannia tekhniko-ekonomichnoi dotsilnosti hasinnia pozhezh rozlytykh horiuchykh rehovyn zasobamy na osnovi porystykh nosiiv z immobilizovanymy vohnehasnymy rehovynamy [Technical and economic feasibility of extinguishing spilled flammable liquid fires using porous carriers with immobilized fire extinguishing substances]. *Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia – Emergency Situations: Prevention and Response*, 5(1), 67–77 [in Ukrainian].

12. Jelagin, G., Kutsenko, M., Alekseev, A., Nuianzin, A., & Nesen, I. (2022). Extinguishing media for spilled flammable liquids. *The Scientific Heritage* (Budapest, Hungary), 1(84), 15–25.

13. Nesen, I.O., Yelagin, H.I., Alekseeva, O.S., Nozhko, I.V., Kutsenko, M.A., & Alekseev, A.V. (2022). Do problemy poperedzhennia pozhezh na torfovyschakh [On the problem of fire prevention in peatlands]. *Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia – Emergency Situations: Prevention and Response*, 6(1), 69–74 [in Ukrainian].

14. Elagin, G.I., Crystal, D.O., Tishchenko, E.O., Kutsenko, M.A., Alekseeva, O.S., Alekseev, A.G., & Zaika, P.I. (2024). Physical-chemical mechanism of extinguishing and warning of fires by facilities on basis of high-porous transmitters. *Colloquium-journal*, 11(204), Część 1, 36–41.

15. Kutsenko, M.A., Yelagin, H.I., Alekseev, A.V., & Alekseeva, O.S. (2022). Ekonomichnyi efekt zastosuvannia zasobiv na osnovi vohnehasnykh solei, immobilizovanykh porystym nosiiem dlia hasinnia pozhezh horiuchykh ridyn [Economic effect of using fire extinguishing agents based on salts immobilized on porous carriers for extinguishing flammable liquid fires]. *Tsyvilna bezpeka: derzhavne upravlinnia ta kryzovi menedzhment – Civil Safety: Public Administration and Crisis Management*, 6–19 [in Ukrainian].

16. Nesen, I.O., Kutsenko, M.A., Yelagin, H.I., Alekseeva, O.S., Nuianzin, O.M., Alekseev, A.H., & Slovinskyi, V.K. (2023). Otsinka kilkosti shkidlyvykh rehovyn v produktakh zghoriannia pry pozhezhi na torfovyyshchakh, ta ekolohichnykh vtrat vnaslidok takoi pozhezhi [Assessment of harmful substances in combustion products during peatland fires and resulting environmental losses]. *Colloquium-journal*, 4(163), Część 1, 52–57 [in Ukrainian].

17. Nesen, I.O., Yelagin, H.I., Alekseeva, O.S., Kopytin, D.E., Nuianzin, O.M., Alekseev, A.H., Kutsenko, M.A., Nozhko, I.O., Honchar, S.V., & Khaliavko, V.V. (2023). *Sposib zapobihannia poshyrenniu pozhezhi na torfovyyshchi* [Method for preventing the spread of fire on peatlands] (Ukraine Utility Model No. 153448). Published 05.07.2023, Bulletin No. 27 [in Ukrainian].

18. Jelagin, G., Kutsenko, M., Alekseev, A., Nuianzin, A., Alekseeva, E., Crystal, D., & Vedula, S. (2024). Development of fire prevention measures on peat plates. *The Scientific Heritage*, No. 136, 36–43.