

PACS numbers: 61.05.cp, 61.43.Gt, 68.37.Hk, 81.05.Rm, 81.20.Ev, 82.70.Rr, 83.80.-k

Екологічні засоби гасіння та попередження пожеж на основі високопористих носіїв з високодисперсними частинками вогнегасильної солі

Г. І. Єлагін¹, О. А. Дударко², О. С. Алексєєва¹, М. О. Рудь³,
Ю. В. Лепєєва³, І. О. Несен¹, А. Г. Алексєєв¹, О. М. Нуянзін¹,
Д. О. Кришталь¹, Н. В. Данько³, О. Д. Рудь³

¹*Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України,
вул. Онопрієнка, 8,
18034 Черкаси, Україна*

²*Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України,
вул. Генерала Наумова, 17,
03164 Київ, Україна*

³*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульвар Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна*

Запропоновано нові екологічні засоби на основі високопористих носіїв з високодисперсними частинками вогнегасильних солей (амонійфосфату, діамонійфосфату та калій нітрату) для гасіння пожеж на поверхні водойми та попередження поширення їх на торфовищах. Досліджено розподіл частинок вогнегасильних солей за іммобілізації їх на внутрішній поверхні високопористих носіїв (спученого вермікуліту та тирси деревини). За оцінкою ступеня пониження пористості за іммобілізації виявлено, що з носіїв найбільш придатними для виготовлення вогнегасильних засобів такого типу є спучений вермікуліт марки FINE ZU і тирса деревини; з вогнегасильних солей — діамонійфосфат і калій нітрат. За допомогою рентгеноструктурної аналізи та сканувальної електронної мікроскопії показано, що зразки вермікуліту та деревини після оброблення іммобілізаторами містять в собі агломеровані частинки солей, які в цілому рівномірно покривають поверхню носія.

New ecological means based on highly-porous media with highly-dispersed particles of fire-extinguishing salts (ammonium phosphate, diammonium phosphate, and potassium nitrate) are proposed for extinguishing fires on the surface of the reservoir and preventing their spread on peatlands. The distribution of fire-extinguishing salt particles during their immobiliza-

tion on the inner surface of highly-porous media (swollen vermiculite and wood sawdust) is studied. According to the assessment of the degree of reduction of porosity during immobilization, it is found that the most suitable media for the fabrication of fire-extinguishing agents of this type are the expanded vermiculite brand FINE ZU and wood sawdust, and of fire-extinguishing salts, these are diammonium phosphate and potassium nitrate. With the use of x-ray structural analysis and scanning electron microscopy, it is shown that the vermiculite and wood samples after treatment with immobilizers contain agglomerated salt particles, which, in general, evenly cover the surface of the carrier.

Ключові слова: екологічні засоби гасіння та попередження пожеж, високопористі носії, високодисперсні частинки, вогнегасильні солі, інгібування, іммобілізація.

Key words: ecological means of extinguishing and preventing fires, highly-porous media, highly-dispersed particles, fire-extinguishing salts, inhibition, immobilization.

(Отримано 31 травня 2024 р.)

1. ВСТУП

Пожежі горючих рідин на поверхні водоймищ (морів, океанів) і пожежі на торф'яниках мають спільні риси. Коли вони виникають, то продовжуються тижнями, а то й місяцями, і призводять до значних матеріальних збитків і до помітного погіршення екологічної ситуації. Горіння нафти й її похідних продукує велику кількість продуктів повного й неповного згорання та мазутоподібних залишків. Серед продуктів згорання [1]:

- велика кількість вуглекислого газу, який сприяє глобальному потеплінню;
- отруйний для людей і тварин чадний газ;
- дим, який має канцерогенні властивості та знижує прозорість атмосфери.

Залишки неповного згорання нафти являють собою суміш мазуту з бітумом. Її густина близька до густини морської води. Тому ця суміш плаває недалеко від поверхні та переміщується на великі віддалі. У воді вона зберігається тривалий час, що створює небезпеку для планктону та морських тварин [1]. А виникають пожежі з горінням рідин дуже часто [1–3]! Пожежі на торфовищах теж продовжуються місяцями й охоплюють великі площі [4, 5]. Водночас вони стають джерелом поширення чадного газу, метану, радону та канцерогенного диму, і в дуже великих кількостях утворюється вуглекислий газ, який вносить вагому частку у зміну клімату планети [4]. Гасіння обох з цих пожеж —

дуже складна задача. Горіння рідин на поверхні водойми переважно закінчується лише після вигорання всієї горючої речовини. Водночас практично весь вантаж втрачається, а в навколишнє середовище викидається велика кількість шкідливих речовин [1–3]. Горіння тут неможливо припинити водою, оскільки нафта й продукти переробки її легші за воду та завжди впливатимуть на її поверхню. Гасіння інертними газами або хладами вимагає створення певної концентрації погашувального агента, якої на відкритому просторі досягти неможливо. Не дають бажаного ефекту й звичайні порошкові засоби гасіння пожеж. Порошки мають питому густину, більшу за 3 г/см^3 . Це значно вище питомої густини води та вуглеводневих рідин. В результаті порошок за декілька секунд після нанесення занурюється під поверхню та залишає зону горіння без захисту. На практиці горіння нафтопродуктів на поверхні водойми з різним успіхом намагаються припинити повітряно-механічними пінами, що має масу недоліків, в першу чергу, з точки зору екології.

Не менш складно та дорого гасити пожежі на торфовищах. А ці пожежі сягають навіть більших масштабів, аніж пожежі на морі. Найбільшу торф'яну пожежу було зафіксовано в 1997 році в Індонезії. В атмосферу потрапило 0,81–2,57 тисяч тон вуглецю. Горіння продовжувалося більше місяця аж до сезону дощів. Дощ загасив видимий вогонь, але пожежа потроху продовжується й зараз. Останнім часом подібні пожежі відбувалися і в Південній Америці. Менші, але теж потужні та довготермінові пожежі торф'яників спостерігаються кожного року і в Україні.

Складність гасіння торф'яників зумовлено декількома чинниками. Вони проходять під поверхнею землі й небезпечні раптовими проривами вогню з-під землі та тим, що їхній край не завжди помітний. Засоби гасіння, переважним фізико-хімічним механізмом дії яких є ізоляція від окисника зони горіння, тут непридатні. Торф під поверхнею має кисень у своїй структурі та повітря ззовні для горіння не потрібне. Вогнегасильний порошок до підшарових дільниць не проникає, його можна нанести лише на поверхню. Єдиним засобом, який застосовується для гасіння пожеж на торфовищах, лишається вода. Але тут вона малоефективною. Вода або не проникає під поверхню, або стікає струмочками в окремі діри глибоко під шар торфу. До того ж торфовища розташовані в місцях, здебільшого віддалених від джерел водопостачання, а води потрібно дуже багато.

Є в пожежах на морі та в пожежах на торфовищах і принципова відмінність. Аварії танкерів з виливом і загоранням нафтопродуктів передбачити практично неможливо. Отже, ці пожежі доводиться гасити лише по факту виникнення їх. А от на торфовищах ситуація інакша. Тут, як і в багатьох інших випадках,

пожежу набагато легше попередити, ніж потім її гасити. Особливість пожеж на торфовищах полягає у тому, що виникають вони *переважно на поверхні*, і вже потім поширюються у глиб і вшир. Отже, треба або не давати полум'ю виникнути, тримаючи поверхню вологою, або придушувати вогонь в перші ж моменти його появи. Постійно зволожувати поверхню багатогектарного торфовища практично неможливо. Гіпотетично можна було б розсіяти по поверхні вогнегасильний порошок — свого роду профілактику загорання. Але основною дієвою речовиною вогнегасильних порошоків є водорозчинна сіль. Тож перший же дощ або тала вода вимийть цю сіль у нижчі шари, і поверхня залишиться без захисту.

Упродовж останніх десятиліть у ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля проводяться дослідження з розробки принципово нових вогнегасильних засобів. Ці засоби являють собою високопористі носії (спучений вермікуліт або тирса деревини), внутрішню поверхню пор яких за спеціальною технологією іммобілізовано вогнегасними солями [6–12]. Вони мають насипну густину, нижчу за питому густину вуглеводнів і, тим паче, води. Отже, з нанесенням на поверхню будь-якої рідини ці засоби не занурюються під її поверхню, а постійно знаходяться у зоні горіння. Лишаються ці засоби на поверхні або поблизу її та з нанесенням на торфовище; тут вони можуть лишатися неушкодженими декілька років.

Капіляри цих носіїв настільки вузькі, що вода, з огляду на її значний поверхневий натяг, всередину них проникнути не може. Отже, з нанесенням на поверхню горючої рідини, що плаває на водоймі, контакт засобу з водою до вимивання вогнегасильної солі та дезактивації не приводить. У випадку застосування цього засобу для попередження поширення пожеж на торфовищах ані дощ, ані талі води теж вимити вогнегасильну сіль не в змозі. Легкий засіб кілька років може знаходитися на поверхні торфовища без втрати своїх якостей. Підвищення ж температури й у випадку гасіння пожеж на морі, й у випадку виникнення загорання на поверхні торф'яника приводить до десорбції з капілярів вогнегасильних солей, розкладання цих солей і до ефективного гасіння пожежі за інгібувальним фізико-хімічним механізмом. Ще одна перевага таких засобів — абсолютна нешкідливість їх для навколишнього середовища. Спучений вермікуліт використовується у сільському господарстві для структурування ґрунтів, тирса деревини — взагалі природний матеріал, а вогнегасильні солі (амонію фосфати та калію нітрат) є по суті мінеральними добривами.

В даній роботі було поставлено завдання розробити нові екологічні засоби на основі високопористих носіїв з високодисперсними частинками вогнегасильних солей (амонійфосфату, діамоній-

фосфату та калій нітрату) для гасіння пожеж на поверхні водойми та попередження поширення їх на торфовищах і дослідити структуру одержаних матеріалів, зокрема розподіл частинок вогнегасильних солей за іммобілізації їх на внутрішній поверхні високопористих носіїв (спученого вермікуліту та тирси деревини). З цією метою вивчалися пористість, мікроструктура та структурні характеристики вихідних носіїв і носіїв з іммобілізованими в порах вогнегасильними солями.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

В досліджених зразках в якості носіїв використовувався спучений вермікуліт марок FINE UE та FINE ZU (виробник — НВО «УКРВЕРМІКУЛІТ», насипна густина — 0,108 г/см³ й 0,172 г/см³ відповідно) та тирса сосни (табл. 1). Вермікуліт — мінерал класу водних алюмосилікатів Магнію та Феруму шаруватої будови із загальною формулою — $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3[(\text{OH})_2(\text{Al}, \text{Si})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$; хемічний склад змінний, густина — 2,4–2,7 г/см³. Використовується спучений вермікуліт майже виключно для виготовлення теплоізоляційних плит і іноді просто для засипки з тією ж метою. Раніше ні в якості просто вогнегасильного засобу, ні в якості носіїв вогнегасильного засобу вермікуліт не застосовувався.

Перед проведенням операцій іммобілізації зразки носіїв промивалися дистильованою водою та висушувалися за температури у 80–90°C. Іммобілізація зразків спученого вермікуліту розчинами амоній- і діамонійфосфатів проводилася із застосуванням вакуумної техніки [6, 7, 9]. Іммобілізація зразків деревини розчинами амоній- і діамонійфосфатів і калій нітратом — простим стисканням–відпусканням їх у розчинах амоній- і діамонійфосфатів або калій нітрату [8, 9]. Після заповнення капілярів розчинами зразки висушувалися в сушильній шафі та для повного видалення вологи витримувалися теплими протягом 3–4 годин у вакуумному ексікаторі за залишкового тиску у 1–3 мм рт. ст.

Пористість P оцінювалася за розробленою авторами методикою, що уможлиблює проводити експрес-тести високопористих матеріалів з низькою насипною густиною, за формулою [13]:

$$P = \frac{V_2 - V_1 - m/\rho}{m},$$

де V_2 — об'єм рідини з об'ємом утримувача для матеріалу та об'ємом подрібненого високопористого матеріалу; V_1 — об'єм рідини разом з об'ємом утримувача для матеріалу; m/ρ — поправ-

ка, що враховує об'єм матеріалу у неподрібненому стані (для мінералу вермікуліт $\rho = 2,55 \text{ г/см}^3$); m — маса подрібненого високопористого матеріалу.

Фазову аналізу зразків проводили на порошковому рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4 у геометрії Бреґґа–Брентано у монохроматизованому MoK_α -випромінненні ($\lambda = 0.71068 \text{ Å}$) з цифровою реєстрацією даних. Умови експерименту: U — 45 кВ, I — 20 мА, крок між точками — 0,05 ґрад, витримка в кожній точці — 4 с. Розмір областей когерентного розсіяння (нанокристалітів) для вермікуліту FINE ZU та FINE UE у вихідному стані було оцінено за рівнянням Шеррера за методикою, описаною в [14]. Дослідження мікроструктури зразків у вихідному й обробленому станах були виконані за допомогою сканувального електронного мікроскопа JEOL JSEM IT-300.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати визначення пористості зразків наведено у табл. Видно, що спучений вермікуліт FINE ZU має пористість більшу, ніж спучений вермікуліт FINE UE і, отже, для використання в якості

ТАБЛИЦЯ. Досліджені зразки та їхня пористість.¹

№ з/п	Носій	Імобілізатор	Кількість оброблень (циклів імобілізації)	Середня пористість P , $\text{см}^3/\text{г}$
1	Вермікуліт FINE ZU	—	—	2,64
2	Вермікуліт FINE ZU	Амонійфосфат	1	2,48
3	Вермікуліт FINE ZU	Діамонійфосфат	1	1,86
4	Вермікуліт FINE ZU	Діамонійфосфат	2	1,70
5	Вермікуліт FINE UE	—	—	1,24
6	Вермікуліт FINE UE	Амонійфосфат	1	1,18
7	Вермікуліт FINE UE	Діамонійфосфат	1	0,83
8	Тирса сосни	—	—	1,64
9	Тирса сосни	Діамонійфосфат	1	1,46
10	Тирса сосни	Діамонійфосфат	2	1,34
11	Тирса сосни	Калію нітрат	1	0,93
12	Тирса сосни	Калію нітрат	2	0,56

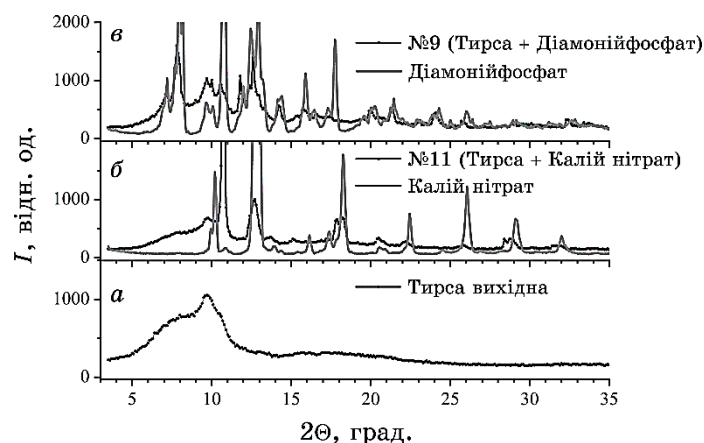


Рис. 1. Дифрактограми деревини сосни (тирса) у вихідному (а) й обробленому станах (б — іммобілізація калій нітратом; в — діамонійфосфатом); дифрактограми відповідних речовин-іммобілізаторів наведено суцільними сірими лініями.²

носіїв вогнегасильних солей є більш придатним. Як і очікувалося, іммобілізація солей у всіх випадках заповнює порожнистості та знижує загальну пористість з 2,64 до 1,70 і з 1,24 до 0,83 для зразків вермікулиту FINE ZU і FINE UE відповідно. Цікаво, що діамонійфосфат адсорбується значно краще, ніж моноамонійна сіль. Водночас перший цикл іммобілізації заповнює біля третини загального об'єму. Що стосується деревини, то тут найліпші результати спостерігаються з калій нітратом. Вже перший же цикл дає змогу заповнити біля 40% порожнистості, а після другого циклу заповнено понад 60% — це навіть більше, ніж потрібно, оскільки збільшується насипна маса засобу, а з використанням він буде занурюватися під поверхню.

Рентгенівські дифрактограми деревини сосни (тирси) у вихідному й обробленому станах наведено на рис. 1. Добре видно, що у вихідному стані тирса сосни характеризується типово вираженою аморфною структурою, що проявляється у присутності широкого дифузного гало в околі 5–12 градусів (рис. 1, а). На рисунку 1, б, в наведено дифрактограми тирси сосни після оброблення калій нітратом і діамонійфосфатом відповідно. На цих же рисунках нанесено також дифрактограми відповідних хемічних речовин, які знаходяться у кристалічному стані.

Можна зробити висновок, що дифракційні картини обробленої тирси є суперпозицією дифракції від деревини та відповідної хемічної речовини, що вказує на добру адсорбцію солей деревиною в процесі її оброблення.

Рентгенівські дифрактограми вермікулиту ZU у вихідному й

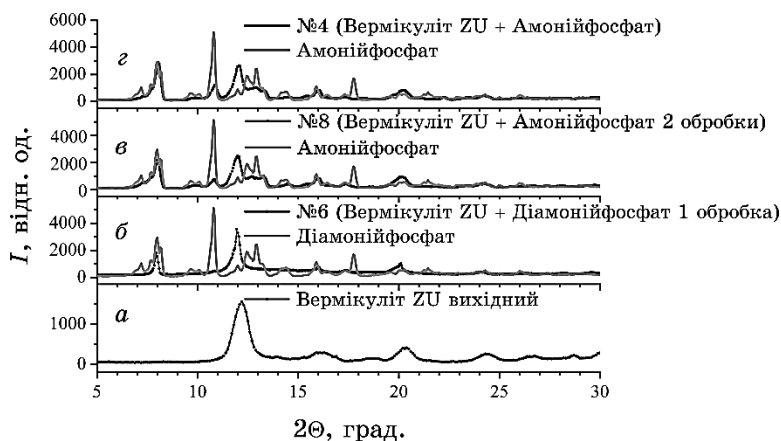


Рис. 2. Дифрактограми вермікуліту ZU (чорні точки) у вихідному (а) й обробленому амонійфосфатом станах (б, в, г; дифрактограми діамонійфосфату наведено суцільними сірими лініями).³

обробленому амонійфосфатом станах наведено на рис. 2. У вихідному стані вермікуліт ZU має кристалічну структуру (рис. 2, а). Дифракційні лінії є розширеними, що свідчить про нанодисперсний стан порошку. Оцінка розміру індивідуальних частинок вихідного порошку за формулою Шеррера [14] показує, що вони знаходяться в нанорозмірному діапазоні ≈ 5 нм.

Оброблення діамонійфосфатом приводить до появи на дифрактограмах властивих йому піків (рис. 2, б, в, г). На цих же рисунках для порівняння суцільною лінією нанесено дифрактограми чистого діамонійфосфату. Причому кількість діамонійфосфату в зразках залежить від режиму оброблення: у випадку подвійної іммобілізації (рис. 2, в) його помітно більше, ніж після однократного оброблення (рис. 2, б).

Електронно-мікроскопічні дослідження на сканувальному електронному мікроскопі у режимі зворотно розсіяних електронів показали, що вермікуліт ZU у вихідному стані характеризується неоднорідною мікроструктурою у вигляді окремих пластин із широкою дисперсією за розмірами — від декількох до 50 мкм з явною схильністю до агломерації (рис. 3, а, б). Оброблення діамонійфосфатом приводить до виникнення більш однорідного стану зі збільшеним розміром частинок-агломератів вермікуліту ZU: однократне оброблення — розмір частинок у 20–100 мкм (рис. 3, ж, з), двократне — 50–200 мкм (рис. 3, д, е). Водночас поверхню частинок вермікуліту ZU вкрито більш дисперсними частинками діамонійфосфату із розмірами у 5–10 мкм, які достатньо однорідно розподілені по ньому.

Рентгенівські дифрактограми вермікуліту UE у вихідному й

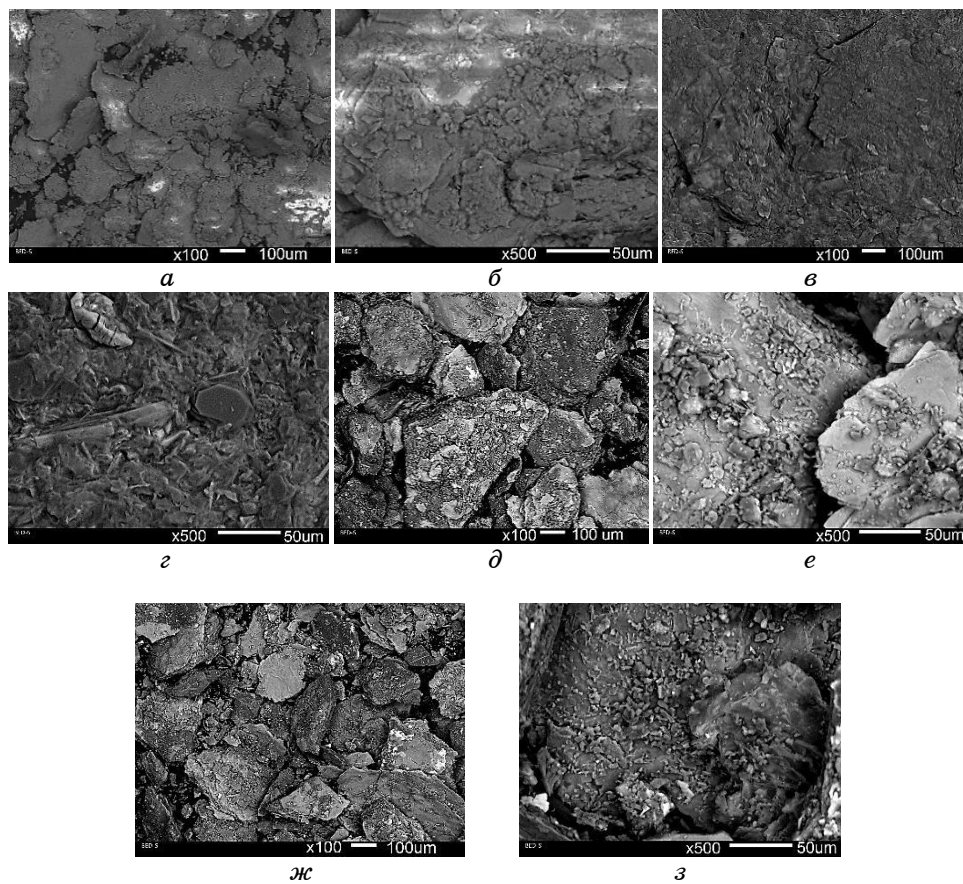


Рис. 3. Електронно-мікроскопічні мікрофотографії вермікулиту ZU у вихідному (а, б) й обробленому амонійфосфатом станах (в, г — діамонійфосфат, одне оброблення; д, е — діамонійфосфат, два оброблення; ж, з — амонійфосфат) за різних збільшень (а — №1 вермікуліт ZU вихідний; б — №1 вермікуліт ZU вихідний; в — №6 вермікуліт ZU + діамонійфосфат, одне оброблення; г — №6 вермікуліт ZU + діамонійфосфат, одне оброблення; д — №8 вермікуліт ZU + амонійфосфат; е — №8 вермікуліт ZU + амонійфосфат, два оброблення; ж — №4 вермікуліт ZU + амонійфосфат; з — №4 вермікуліт ZU + амонійфосфат).⁴

обробленому амонійфосфатом станах наведено на рис. 4.

У вихідному стані вермікуліт UE характеризується кристалічною структурою (рис. 4, а). Дифракційні лінії мають значну інтенсивність і невелику півширину, що свідчить про його більшу структурну досконалість у порівнянні з вермікулітом ZU. Середній розмір індивідуальних частинок, оцінений за формулою Ше-

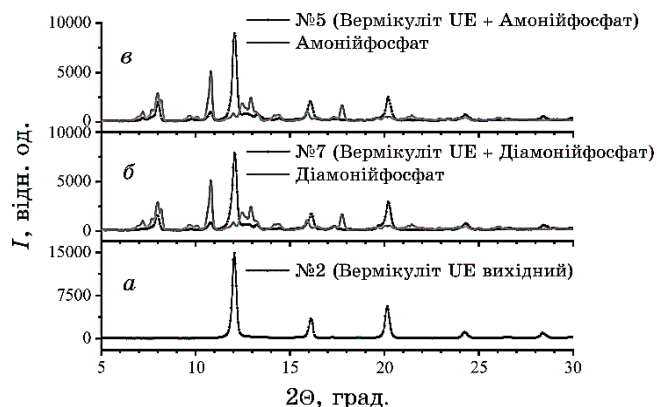


Рис. 4. Дифрактограми вермікуліту UE (чорні точки) у вихідному (а) й обробленому амонійфосфатом станах (б, в; дифрактограми діамонійфосфату й амонійфосфату наведено сірими суцільними лініями).⁵

ррера, становить $\cong 15$ нм. Оброблення діамонійфосфатом приводить до появи на дифрактограмах властивих йому піків (рис. 4, б, в). На цих же рисунках для порівняння суцільною лінією також нанесено дифрактограми чистого діамонійфосфату.

Електронно-мікроскопічні дослідження на сканувальному електронному мікроскопі у режимі зворотньо розсіяних електронів показали, що вермікуліт UE у вихідному стані також характеризується неоднорідною мікроструктурою у вигляді окремих пластинок із широкою дисперсією за розмірами — від декількох до 100 мкм із схильністю до агломерації частинок порошку (рис. 5, а, б). Оброблення діамонійфосфатом приводить до появи на поверхні пластинок вермікуліту UE дисперсних частинок діамонійфосфату із розмірами у 3–10 мкм, які достатньо однорідно розподілені по них (рис. 5, в, г та рис. 5, д, е).

Таким чином, визначення пористості досліджених зразків показало, що з двох марок спученого вермікуліту більш придатним для виготовлення засобів гасіння пожежі на поверхні водойми та виготовлення засобів попередження пожеж на торфовищах є спучений вермікуліт марки FINE ZU. За іммобілізації його солями амонію до третини об'єму порожнин може бути заповнено вже у першому циклі іммобілізації–висушування. З солей амонію ліпші результати одержано із застосуванням діамонійфосфату. Достатньо придатні результати діамонійфосфат показав і для виготовлення засобів на основі тирси деревини. Для виготовлення ж генераторів вогнегасильного аерозолі [8] в якості окисника для деревини найбільше підходить калій нітрат. Але в цьому випадку, щоб зберегти достатньо низку насипну масу, іммобілізацію треба навіть обмежувати. Справа в тому, що за рівнянням реакції

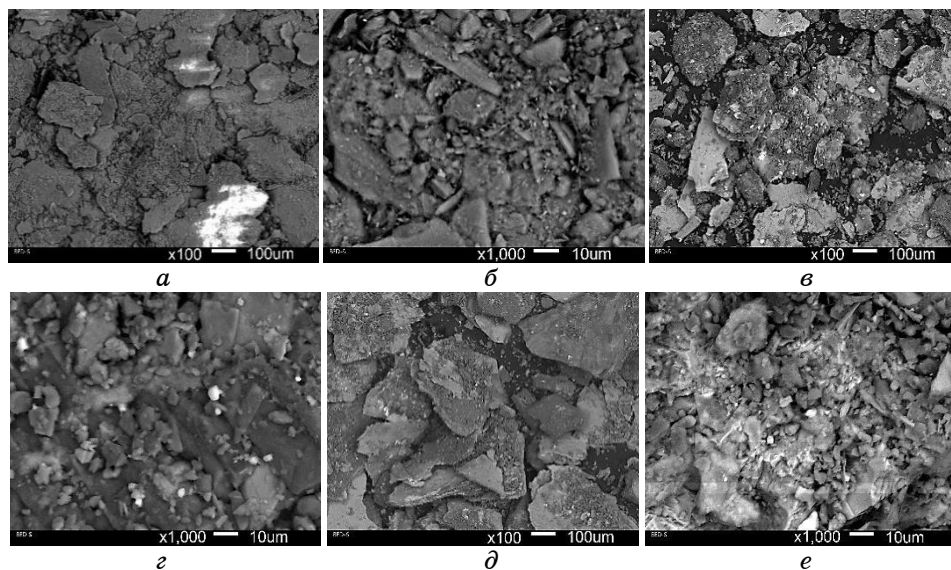


Рис. 5. Електронно-мікроскопічні мікрофотографії вермікулиту ZU у вихідному (а, б) й обробленому амонійфосфатом станах (в, г — амонійфосфат; д, е — діамонійфосфат) за різних збільшень (а — №2 вермікуліт UE вихідний; б — №2 вермікуліт UE вихідний; в — №5 вермікуліт UE + амонійфосфат; г — №5 вермікуліт UE + амонійфосфат; д — №7 вермікуліт UE + діамонійфосфат; е — №7 вермікуліт UE + діамонійфосфат).⁶

для окиснення деревини потрібна достатньо велика кількість калію нітрату. Але, якщо деревина буде просочена такою кількістю солі, вона збільшить свою насипну масу. Для використання задля попередження поширення пожежі на торфовищах це особливого значення не має. Хоча і тут ліпше, щоб засіб якомога довше залишився на поверхні, а не занурювався під час дощів і танення снігу та не замулювався частинками ґрунту. А от під час гасіння пожеж горючих рідин на морі це має істотне значення. Зона горіння тут знаходиться на поверхні рідини — навіть над нею. Отже засіб гасіння має бути достатньо легким, з насипною масою, меншою за густину і води, і нафтопродукту.

4. ВИСНОВКИ

На основі високопористих носіїв з високодисперсними частинками вогнегасильних солей (амонійфосфату, діамонійфосфату та калій нітрату) розроблено нові екологічні засоби для гасіння пожеж на поверхні водойми та попередження поширення їх на то-

рфовищах. За допомогою рентгеноструктурної аналізи та сканувальної електронної мікроскопії показано, що зразки вермікуліту та деревини після оброблення іммобілізаторами містять в собі агломеровані високодисперсні частинки солей, які в цілому рівномірно покривають поверхню носія. Досліджено розподіл частинок вогнегасильних солей за іммобілізації їх на внутрішній поверхні високопористих носіїв (спученого вермікуліту та тирси деревини).

За оцінкою ступеня пониження порожнистості (пористості) за іммобілізації виявлено, що з носіїв найбільш придатними для виготовлення вогнегасильних засобів такого типу є спучений вермікуліт марки FINE ZU і тирса деревини. За іммобілізації вермікуліту солями амонію до третини об'єму порожнин може бути заповнено вже у першому циклі іммобілізації-висушування. З солей амонію ліпші результати одержано із застосуванням діамонійфосфату. Для виготовлення генераторів вогнегасильного аерозолю в якості окисника для деревини найбільше підходить калій нітрат. Але в цьому випадку, щоб зберегти достатньо низку насипну масу, іммобілізацію треба обмежувати.

Роботу виконано в рамках теми «Дослідження можливості попередження пожеж на торфовищах шляхом обробки поверхонь носіями, що просочені вогнегасними солями» та Договору про співробітництво між Черкаським інститутом пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля та Інститутом металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. A. G. Alekseev, G. I. Yelagin, V. V. Nakonetchniy, O. M. Nuyanzin, and M. A. Kutsenko, *Collection of Scientific Works of the Cherkasy Institute of Fire Safety Named After the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine* (2019) p. 5 (in Ukrainian).
2. R. Campbell, *Report of National Fire Protection Association* (2014); <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports>
3. J. G. Hylton, *Report of National Fire Protection Association* (2017), p. 39; <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics/Fire-service/osfdprofile.pdf>
4. G. Yelagin, I. Nesen, M. Kutsenko, O. Alekseeva, O. Nuyanzin, A. Alekseev, and V. Slovinskyi, *Colloquium-Journal*, **1**, No. 4: 52: 163 (2023) (in Ukrainian); doi:10.24412/2520-6990-2023-4163-52-57
5. Ya. Kyryliv, V. Kovalyshin, and R. Sukatch, *Emergencies: Safety and Defence: Materials of IX All-Ukrainian Research and Practice Conference with International Participation* (Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety Named After the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine: 2019), p. 59.
6. G. I. Yelagin, M. A. Kryshchal, and R. A. Palagin, *Vognegasnyy Zasib* [Fire

- Extinguisher] (Patent of Ukraine No. 91400 (Bul. No. 13) (2014)) (in Ukrainian).
7. G. I. Yelagin, I. O. Yuschuk, Ye. O. Tischenko, and O. S. Alekseeva, *Sposib Vyrobnystva Vognegasnogo Zasobu* [The Method of Obtaining a Fire-Extinguishing Agent] (Patent 136531 (Bul. No. 16) (2019)) (in Ukrainian).
 8. G. I. Yelagin, Ye. O. Tischenko, O. S. Alekseeva, V. V. Nakonetchniy, and A. G. Alekseev, *Sposib Vyhotovlennya Generators Vohnehasnoho Aerosolyu* [Method of Making a Fire-Extinguisher Aerosol Generator] (Patent No. 147259 (Bul. No. 16) (2021)) (in Ukrainian).
 9. G. Yelagin, M. Kutsenko, A. Alekseev, A. Nuianzin, and I. Nesen, *The Scientific Heritage*, **1**, No. 84: 15 (2022) (in Ukrainian); doi:10.24412/9215-0365-2022-84-1-15-25
 10. M. Kutsenko, G. Yelagin, A. Alekseev, O. Alekseeva, *Tsyvil'na Bezpeka: Derzhavne Upravlinnya ta Kryzovyy Menedzhment* [Civil Safety: State Administration and Crisis Management] (2022), p. 6 (in Ukrainian).
 11. I. Nesen, G. Yelagin, O. Alekseeva, A. Nuianzin, A. Alekseev, and M. Kutsenko, *Sposib Zapobihannya Poshyrennyu Pozhezhi na Torfovyskhi* [A Method of Prevention of Distribution of Fire is on a Peatbog] (Patent 153448 (Bul. No. 27) (2023)) (in Ukrainian).
 12. G. Yelagin, I. Nesen, O. Alekseeva, and A. Alekseev, *Materials of XIV International Research and Practice Conference 'Theory and Practice of Extinguishing of Fires and Liquidation of Emergencies'* (Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety Named After the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine: 2023), p. 178–180.
 13. G. Yelagin, I. Nesen, O. Dudarko, O. Nuyanzin, Je. Titshenko, O. Alekseeva, S. Nozko, and A. Alekseev, *Prystriy dlya Ehkspres Vyznachennya Porozhnystosti Podribnennykh Dribnoporystykh Materialiv z Nyz'koyu Nasypnoyu Masoyu* [Device for Express Determination of Hollowness of Crushed Fine-Porous Materials with Low Bulk Mass] (Patent application No. a 2020 01522 (2022)) (in Ukrainian).
 14. L. I. Ivashchuk, O. D. Rud, and A. M. Lakhnik, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **28**, Special issue: 285 (2006) (in Ukrainian).

¹Chernobyl Heroes Cherkasy Institute of Fire Safety
of National University of Civil Protection of Ukraine,
8, Onoprienko Str.,
UA-18034 Cherkasy, Ukraine

²O. O. Chuiko Institute of Surface Chemistry, N.A.S. of Ukraine,
17, General Naumov Str.,
UA-03164 Kyiv, Ukraine

³G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36, Academician Vernadsky Blvd.,
UA-03142 Kyiv, Ukraine

¹ TABLE 1. Studied samples and their porosity

² Fig. 1. X-ray diffractograms of pinewood (sawdust) in the initial (*a*) and processed states (*b*—immobilization with potassium nitrate, *c*—with diammonium phosphate; diffractograms of the corresponding immobilized substances are shown by solid grey lines).

³ Fig. 2. X-ray diffractograms of ZU vermiculite (black dots) in the initial (*a*) and ammonium phosphate-treated states (*b*, *c*, *d*—diffractograms of diammonium phosphate are shown by solid grey lines).

⁴ Fig. 3. SEM micrographs of ZU vermiculite in the initial (*a*, *b*) and ammonium phosphate-treated states (*c*, *d*—diammonium phosphate, one treatment; *e*, *f*—diammonium phosphate,

two treatments; κ , ε —ammonium phosphate) at different magnifications.

⁵ **Fig. 4.** X-ray diffractograms of UE vermiculite (black dots) in the initial (a) and ammonium phosphate-treated states (δ , e —diffractograms of diammonium phosphate and ammonium phosphate are shown by grey solid lines).

⁶ **Fig. 5.** SEM micrographs of ZU vermiculite in the initial (a , δ) and ammonium phosphate-treated states (e , ε —ammonium phosphate; ∂ , e —diammonium phosphate) at different magnifications.