

<https://doi.org/10.15407/geotech2019.30.090>
УДК 614.842

Магльована Т.В., Долін В.В.

Магльована Т.В., к.х.н., доц., Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, maglovana_t@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6780-9045>
Долін В.В., докт. геол. н., проф., ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України». vdolin@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6174-2962>.

ВИКОРИСТАННЯ ГУАНІДИНОВИХ ПОЛІМЕРІВ ДЛЯ ГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ТА МІНІМІЗАЦІЇ ЇХ НАСЛІДКІВ

Обґрунтовано використання екологічно прийнятних водних вогнегасних та вогнезахисних речовин гуанідинового ряду для гасіння лісових пожеж, зокрема на радіоактивно забруднених територіях, та мінімізації радіаційних наслідків. Маючи властивості поліелектроліту, молекули полімеру витягуються вздовж потоку водної фази вогнегасної суміші, зменшуючи опір під час руху води. Макромолекули полігексаметиленгуанідину (ПГМГ) орієнтуються паралельно внутрішній поверхні труби, завдяки чому знижується інтенсивність турбулентних пульсацій у пристінному шарі, зменшується турбулентність потоків, знижуються гідравлічні втрати, що сприяє збільшенню напору та відстані подачі рідини. Експериментально встановлено, що у порівнянні з водою, при використанні водних розчинів полімеру за концентрації 3-5% збільшується дальність подачі водних вогнегасних речовин до 50 % з використанням вогнегасника ВВШ-9, а тривалість гасіння модельного вогнища ІА зменшується в 3-4 рази. Запропоновано спосіб гасіння лісової пожежі (зокрема на радіоактивно забруднених територіях), що включає в себе використання водної вогнегасної речовини на основі полімерної поверхнево-активної речовини ПГМГ. Спосіб призначено для гасіння кромки пожежі з одночасним прокладанням перед фронтом пожежі загороджувальних смуг шляхом оброблення розчином на основі солей ПГМГ. Встановлено, що використання запропонованого способу гасіння лісової пожежі дозволяє істотно скоротити тривалість гасіння пожежі завдяки вогнегасним властивостям гідродинамічно активних полімерів гуанідинового ряду з одночасним утворенням на обробленій поверхні лісових горючих матеріалів полімерного ізолюючого шару, продукти термодеструкції якого виконують функцію інгібіторів горіння. Застосування вогнегасних та вогнезахисних речовин гуанідинового ряду сприяє запобіганню вітрової міграції радіоактивних аерозолів унаслідок зменшення пилоутворення за рахунок злипання та коагуляції часточок радіоактивного пилу сприяє його седиментації. Показано перспективність використання запропонованого способу гасіння лісової пожежі для зменшення дозових навантажень особового складу пожежних підрозділів та з метою запобігання лісовим пожежам і мінімізації економічних, екологічних та соціальних наслідків від них.

Ключові слова: лісові горючі матеріали, пожежогасіння, водні вогнегасні речовини, полігексаметиленгуанідин.

Вступ.

Кількість і масштаби лісових пожеж вказують на необхідність вдосконалення як профілактичних (превентивних) заходів профілактики лісових пожеж так і безпосередньо вогнегасних речовин, що використовуються під час гасіння. Унаслідок аварії на Чорнобильській АЕС понад 3,5 млн. га лісових земель України потрапили в зону радіоактивного забруднення. Найбільші площі радіоактивно забруднених лісових екосистем знаходяться в Житомирській (974,3 тис. га), Рівненській (728,8 тис. га), Чернігівській (725,5 тис. га) та Київській (416,4 тис. га) областях. У Черкаській, Вінницькій, Волинській, Сумській та Хмельницькій областях площа радіоактивно забруднених лісових екосистем становить 10-20% від загальної площі [1].

Шкідливий екологічний вплив від лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях обумовлено

виділенням в атмосферу продуктів повного та неповного згорання, що містять в своєму складі оксиди Кальцію (у тому числі сполуки радіоактивного вуглецю ^{14}C), Нітрогену, Сульфуру, аерозолі твердих і рідких частинок у вигляді радіоактивного пилу, які з висхідними конвективними потоками повітря можуть підніматися в атмосферу і становити небезпеку опромінення внаслідок інгаляційного надходження в організм персоналу пожежних [2], оскільки у вигляді попелу, димових аерозолів є відкритими джерелами іонізуючого випромінювання [3]. Основний внесок у дозу опромінення пожежних має зовнішнє опромінення під час знаходження на радіоактивно забрудненій території та інгаляційна компонента опромінення від вдихання димових аерозолів – продуктів згорання лісових горючих матеріалів [2].

Залежно від характеристик ділянки та вологості ґрунту 70-85 % радіонуклідів зосереджено у верхніх

грунтових шарах лісових екосистем, опадів та мохів. У стовбурах дерев, гілках, корі міститься приблизно 15-30 % [4].

Трансуранові елементи, передусім ізотопи Плутонію та Америцію, є надзвичайно небезпечними внаслідок інгаляційного надходження. Це може спричинити локальне опромінення легеневої тканини, лімфатичних вузлів тощо під час гасіння лісових пожеж [2]. Навіть за умов, коли загальний радіаційний фон не перевищує допустимого рівня, радіоактивні частинки, що містяться в аерозолі диму та пилу можуть вражати внутрішні органи внаслідок інгаляційного надходження [5].

Головними дозоутворюючими радіонуклідами при гасінні пожеж у Чорнобильській зоні відчуження та на прилеглих територіях є ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am . Серед них найбільш поширеними є ^{137}Cs та ^{90}Sr з періодом напіврозпаду 30 та 28,6 років відповідно. У медико-біологічному сенсі, враховуючи ореол поширення, найнебезпечнішими вважаються ^{90}Sr та ^{137}Cs , які можуть заміщувати Кальцій у кістковій та Калій у м'язовій тканині людини. Єдиним радіонуклідом, вміст котрого збільшується, є ^{241}Am з періодом напіврозпаду 432,6 роки (вражає легені, печінку, нирки, проникає в кісткові тканини та мозок, накопичується в скелеті). До середини нинішнього століття вміст ^{241}Am в навколишньому середовищі збільшуватиметься, у 2060-х рр. швидкість його розпаду зрівняється зі швидкістю утворення внаслідок розпаду більшої частини материнського ^{241}Pu ($T_{1/2}$ 14 років) і надалі його кількість зменшуватиметься (рис. 1).

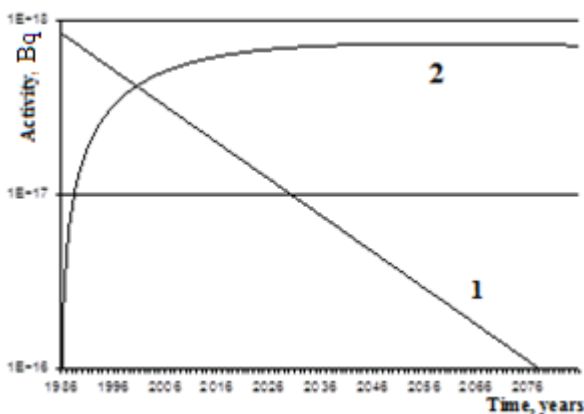


Рис. 1. Динаміка радіоактивного розпаду ^{241}Pu (1) та накопичення ^{241}Am (2) в навколишньому середовищі після Чорнобильської катастрофи

Fig. 1. Radioactive decay of ^{241}Pu (1) and environmental accumulation of ^{241}Am (2) after Chernobyl Catastrophe.

До 2059 р. активність ^{241}Am перевищить активність $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ у 2,5 рази. Наразі частка ^{241}Am у загальній активності альфа-випромінювачів становить понад 50% [6].

Америцій-241 ще довгий час буде залишатися основним дозоутворюючим ізотопом серед трансураничних елементів.

Тепловий стрес, велика кількість вуглекислого газу та радіоактивних продуктів повного і неповного згорання в зоні гасіння (задимлення), зневоднення, надмірна тривалість роботи без відпочинку призводять до виснаження особового складу пожежних підрозділів та впливає на здатність приймати рішення.

Отже, аналізуючи небезпечні чинники, що виникають під час гасіння лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях, актуальним є розробка системи заходів пов'язаної з мінімізацією перебування особового складу пожежних підрозділів і техніки в зоні гасіння пожежі, що може бути досягнуто за рахунок удосконалення вогнегасних речовин, що використовуються для гасіння лісової пожежі.

На сьогодні найчастіше для гасіння лісових горючих матеріалів використовують воду та її розчини. Відомі способи гасіння лісових пожеж із використанням водних розчинів амоній фосфату, амоній сульфату, карбаміду, хлоридів, сульфатів лужних (лужноземельних) металів або алюмінію. Основними їх недоліками є їхня низька змочувальна здатність, незадовільні адгезійні властивості та висока корозійна активність, окрім цього для підвищення змочувальної здатності водних розчинів до них додають поверхнево-активні речовини та високомолекулярні сполуки [7].

Виходячи із вищевикладеного, основними аспектами організації пожежогасіння на радіоактивно забруднених територіях є: контроль індивідуальних доз особового складу пожежних підрозділів і використання засобів індивідуального захисту; зниження пилоутворення; локалізація та адсорбція радіоактивних продуктів згорання; організація заходів із дезактивації.

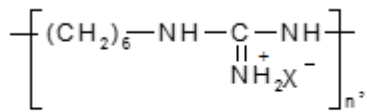
Вогнегасні речовини, що використовуються для гасіння лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях мають сприяти адсорбції радіонуклідів в процесі горіння рослинного матеріалу або утворенню на поверхні горючого матеріалу полімерних плівок, що можливо досягти з використанням полімерних поверхнево-активних речовин гуанідинового ряду в якості вогнезахисних та вогнегасних речовин.

Метою даного дослідження є удосконалення вогнегасних властивостей води шляхом додавання полімерів гуанідинового ряду та використання отриманих водних вогнегасних речовин для цілей гасіння лісової пожежі (в тому числі на радіоактивно забруднених територіях).

Матеріали і методи.

У роботі використовували катіонні полімерні поверхнево-активні речовини гуанідинового ряду: полігексаметиленгуанідин гідрохлорид (ПГМГ-ГХ), полі-

гексаметиленгуанідин гідрофосфат (ПГМГ-ГФ) і полігексаметиленгуанідин фосфат карбаміду (ПГМГ-ФК) загальної формули:



де X – HCl, H₂PO₄⁻, n = 30-120.

Водні розчини ПГМГ отримували розчиненням точних наважок у дистильованій воді. Залишали розчини на 24 години за температури 25±5°C до повного розчинення.

Визначення критеріїв ефективності водної вогнегасної речовини проводили з використанням водного вогнегасника ВВШ-9 (виробництва «Макіївський завод «Факел», м. Київ) згідно [7]. Для цього в полігонних умовах визначали дальність подачі, час викиду заряду, час гасіння модельного вогнища класу 1А (використовуючи в якості водної вогнегасної речовини водогінну воду середньої твердості та розчини солей ПГМГ).

Модельне вогнище класу 1А формували, згідно [8], зі штабелю соснових брусків з поперечним перерізом у вигляді квадрату зі стороною 40 мм і вологістю 10-14 %.

Визначення вогнегасної здатності водної вогнегасної речовини полігексаметиленгуанідину проводили за методикою, описаною в роботі [7]. Суть її полягає у визначенні маси водних вогнегасних речовин, які необхідно подати на гасіння модельного вогнища класу 1А. За результат визначення брали середнє арифметичне двох позитивних результатів випробувань. Допустима розбіжність між результатами повторних випробувань не перевищувала ±15% відносно середнього арифметичного значення.

Показник вогнегасної здатності за класом пожежі А (Q_A), кг/м² розраховували за формулою [7]:

$$Q_A = \frac{m_1 - m_2}{S}, \quad (1)$$

де m₁ – маса корпусу вогнегасника із водною вогнегасною речовиною до гасіння, кг; m₂ – маса корпусу вогнегасника із водною вогнегасною речовиною після гасіння, кг; S – площа вільної поверхні модельного вогнища 1А, яка дорівнює 6,7 м². Масу вогнегасників вимірювали за допомогою терезів з похибкою вимірювання ±0,1 кг.

Результати дослідження

Ефективність боротьби з пожежами істотною мірою залежить від ефективності вогнегасних речовин [7]. На сьогоднішній день найбільш поширеною вог-

негасною речовиною, як у світовій практиці, так і в Україні, є вода. Основним механізмом гасіння водою є охолодження зони хімічної реакції. До переваг води слід віднести те, що вона характеризується високою питомою теплоємністю, прихованою теплотою пароутворення, хімічно інертна до більшості речовин і матеріалів, дешева та доступна. Основними недоліками води є електропровідність, температура замерзання 0 °С, високий коефіцієнт поверхневого натягу та низька в'язкість, що впливає на її вогнегасну здатність [7, 9].

Істотним недоліком води є її порівняно низька змочувальна здатність і велика текучість, які обумовлені високим значенням коефіцієнта поверхневого натягу за відносно малої в'язкості, а отже, поверхня зіткнення крапель води з палаючою поверхнею невелика, і під час гасіння вода з неї швидко стікає [9]. Для зменшення поверхневого натягу води додають поверхнево-активні речовини (ПАР) – це речовини дифільного характеру, тобто їхні молекули складаються з двох частин – полярної групи та неполярного вуглеводневого радикалу. Розчинені у воді молекули ПАР утворюють на поверхні води мономолекулярний шар. Унаслідок кулонівської взаємодії дифільних молекул з диполями води вони розташовуються на межі розділу фаз «вода-повітря» певним чином: частина молекули, яка відштовхується від однойменного заряду диполя води, розташовується над поверхнею води та утворює мономолекулярний шар; інша частина (протилежного заряду), притягнута диполем води, забезпечує зниження її поверхневого натягу.

Також для поліпшення вогнегасних властивостей води додають полімери з великою молекулярною масою і ниткоподібною будовою, наприклад, поліакриламід і поліетиленоксиди, молекули яких під час руху рідини орієнтуються переважно вздовж потоку [9]. Швидкість току води за цих умов може збільшуватися в 2,5 рази, внаслідок збільшення кінематичної в'язкості. Підвищення в'язкості призводить також до посилення взаємодії між молекулами рідини і твердої речовини, з якою вона контактує. Це зумовлює зменшення швидкості стікання води і, як наслідок, збільшення її вогнегасної ефективності [7, 9].

Для удосконалення процесу гасіння з метою зменшення часу гасіння лісових пожеж, що особливо актуально в умовах радіоактивно забруднення, нами досліджено доцільність та можливість використання полімерних поверхнево-активних речовин гуанідинового ряду в якості водних вогнегасних речовин.

Солі ПГМГ мають властивості катіонної полімерної поверхнево-активної речовини та поліелектроліту, для якого характерні основні закономірності поведінки поліелектролітів в розчинах, що обумовлені передусім електролітичною дисоціацією йоногенних груп, унаслідок якої утворюються макройони та контрйони.

Причому в молекулі ПГМГ катіон стабілізований сильніше, ніж нейтральна молекула, тому протонування є енергетично вигіднішим, що веде до існування ПГМГ у вигляді стійких йонів (рис. 2) [10]:

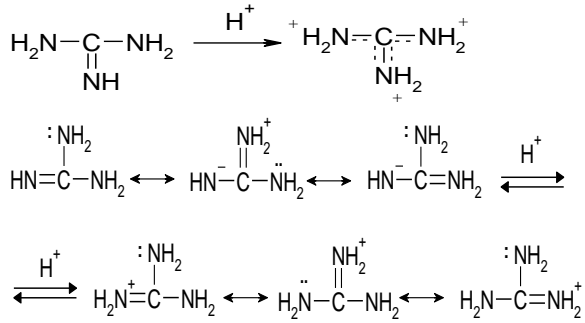


Рис. 2. Схема утворення катіону гуанідинію, у якому позитивний заряд рівномірно розподілений між трьома атомами Нітрогену.

Fig. 2. Formation of guanidinium cation with positive charge uniformly distributed between three Nitrogen atoms.

Об'єднані в загальний полімерний ланцюг утворені йони за рахунок великої «сорочки» електронів на зовнішніх орбіталах молекули здатні вступати в реакції радикального механізму горіння, інгібуючи активні центри полум'я.

За температур вище 350-360 °С відбувається розкладання солей ПГМГ з утворенням великої кількості нітрогенвмісних (NH₄⁺, NH₂⁺, NH₃⁺, NO⁺, NO₂⁺, NO₃⁺) йонів, які, вступаючи в реакції радикального механізму горіння інгібують активні центри полум'я. Для фосфоровмісних гуанідинових сполук наявність йонів (H₂PO₄⁻, HPO₄⁻, PO₃⁻, PO⁺, P₂O, P₂O₂⁺, P₂O₃⁺) підвищує ефективність як до гомогенного, так і до гетерогенного інгібуювання ланцюгових реакцій горіння. Електростатична взаємодія між йонами істотно збільшує величину вільної енергії макромолекулярно-го клубка.

За невеликих концентрацій ПГМГ молекули полімеру сильно розбухають у воді, мають ниткоподібну будову і під дією потоку рідини витягуються вздовж потоку, зменшуючи опір під час руху води. Макромолекули ПГМГ орієнтуються паралельно внутрішній поверхні труб, завдяки чому знижується інтенсивність турбулентних пульсацій у пристінному шарі, зменшується турбулентність потоків, знижуються гідравлічні втрати, що веде до збільшення витрат рідини через трубу.

Дальність подачі вогнегасного розчину збільшується при додаванні солей ПГМГ. Експериментальні дані з високою достовірністю (R² > 97 %) описуються кривою вигляду:

$$l = A + B(1 - e^{-kW}), \quad (2)$$

де *l* – дальність подачі водної вогнегасної речовини, *W* – концентрація солі ПГМГ, %, *A* – дальність подачі води без додавання ПГМГ, *B* – максимальна величина збільшення дальності подачі води внаслідок додавання ПГМГ до водного розчину, *k* – константа, що визначає форму (крутизну) кривої (рис. 3а). В усіх експериментах дальність подачі води без додавання ПГМГ становила *A* = 7,4 м. Додавання солей ПГМГ за концентрації 3–5 % збільшує дальність подачі водного розчину на 30–53 % порівняно з чистою водою (табл. 1). За цих умов найкращий результат досягається додаванням ПГМГ-ГХ: 2 % концентрація цієї солі у водному розчині збільшує дальність подачі води від 7,4 до 11 м.

Збільшення концентрації ПГМГ понад 5% істотно не впливає на величину дальності подачі водної вогнегасної речовини (рис. 3а).

Експериментальні дані щодо тривалості гасіння модельного вогнища від концентрації різних сольових форм полімеру підлягають двоєкспоненційній залежності вигляду:

$$t = Ae^{k_1W} + Be^{-k_2W}, \quad (3)$$

де *t* – час гасіння модельного вогнища, (с), *W* – концентрація сольової форми ПГМГ, (%), *k*₁ та *k*₂ – константи процесів, що визначають швидкість гасіння залежно від концентрації ПГМГ, (%⁻¹), *A* та *B* – коефіцієнти, що визначають внесок кожного з процесів в загальний час гасіння модельного вогнища (рис. 3б). Достовірність апроксимації експериментальних даних R² становить 98–99 %. Різні знаки перед константами в рівнянні свідчать про визначальний вплив на час гасіння двох протилежно спрямованих процесів: так званого ефекту Томса, що веде до зменшення турбулентності потоку вогнегасної речовини, та полімеризації ПГМГ, що веде до збільшення в'язкості розчину (табл. 2).

Гуанідинові йоногенні групи у складі макромолекул ПГМГ зумовлюють розчинність полімеру у воді, надають полімеру властивості катіонного поліелектроліту, якому властивий поліелектролітний ефект в розведених розчинах - ефект розбухання макроклубків під дією позитивних зарядів на ланцюгу макромолекули [11].

При підвищенні концентрації відбуваються конформаційні зміни в макромолекулах ПГМГ, а саме: макромолекули приймають все більш згорнуту конформацію: спочатку – рихлих розпушених статистичних клубків (приблизно від 1,0 до 3,0–5,0 %), а з підвищенням концентрації – статистичні клубки макромолекул починають перекиватись та ущільнюватись, зменшуючись в розмірах та утворюючи більш згорнуті щільні макромолекулярні клубки (рис. 4).

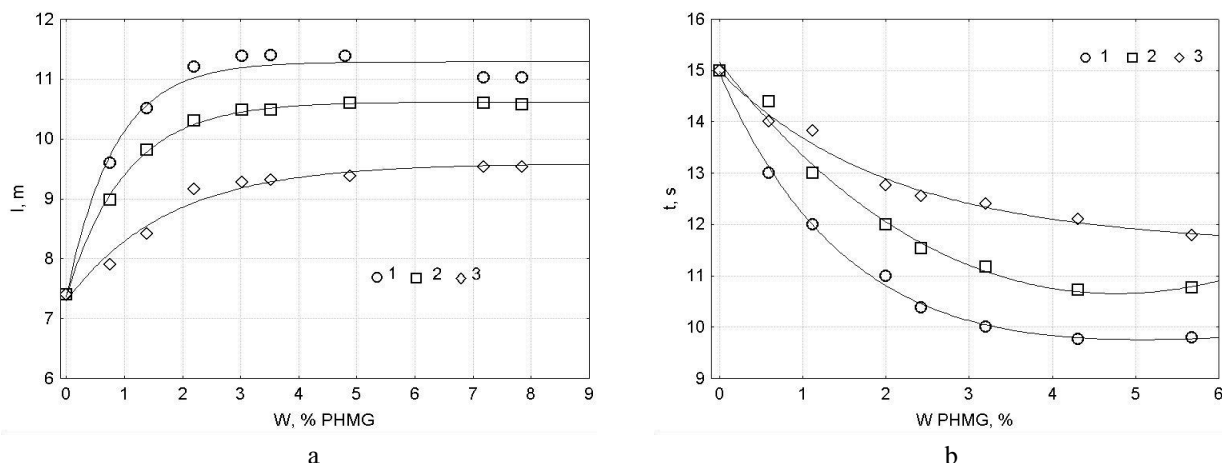


Рис. 3. Вплив концентрації солей полігексаметиленгуанідину на вогнегасні властивості води: (а) - залежність дальності подачі водних розчинів від концентрації полімеру, (б) – залежність тривалості гасіння модельного вогнища 1А від концентрації полімеру. 1- ПГМГ-ГХ; 2- ПГМГ-ГФ; 3 -ПГМГ -ФК.

Fig. 3. The effect of polyhexamethyleneguanidine (PHMG) compounds concentration on the extinguishing properties of water: (a) - flow rate of aqueous solutions, (b) - time for quenching of model foci of type 1A; 1- PHMG-hydrochloride; 2- PHMG-hydro-phosphate; 3- PHMG-phosphate carbamide.

Таблиця 1. Параметри апроксимації даних експериментальних досліджень дальності подачі води (формула 2)

Table 1. Parameterization of experimental data on improvement of the flow rate of aqueous solution (Equation 2)

Солі ПГМГ	$B, м$	$k, \%^{-1}$	$\frac{B}{A}, \%$	R^2
-ГХ	3,89	1,21	53	0,99
-ГФ	3,22	0,972	44	0,99
-ФК	2,21	0,538	30	0,97

Таблиця 2. Параметри апроксимації даних експериментальних досліджень тривалості гасіння модельного вогнища 1А (формула 3)

Table 2. Parameterization of experimental data on time required for quenching of model foci of type 1A (Equation 3)

Солі ПГМГ	$C, с$	$k_1, \%^{-1}$	$D, с$	$k_2, \%^{-1}$	$\frac{k_2}{k_1}$
-ГХ	8,66	0,0178	6,29	0,617	34,7
-ГФ	3,09	0,148	12,1	0,212	1,43
-ФК	11,8	0,00230	3,19	0,511	222

Величина відношення абсолютних значень $\frac{k_2}{k_1}$ (табл. 2) свідчить про визначальний вплив протилежно спрямованих процесів: для розчину ПГМГ-ФК вплив полімеризації зі збільшенням концентрації практично не спостерігається. Водночас для розчинів ПГМГ-ГФ абсолютні величини k_1 та k_2 близькі, тож крива залежності часу гасіння модельного вогнища від концентрації полімеру досягає екстремуму за концентрації 3–5 % (рис. 3б).

За концентрації розчинів більше 5–6 % і температури 12–15 °С навколишнього середовища з часом відбувається застигання розчинів, що перешкоджає гасінню пожежі. Концентровані розчини можна використовувати при реалізації запобіжних протипожежних заходів, що пов'язано з утворенням на поверхні

целюлозовмісного матеріалу полімерної інгібуючої плівки, яка, вступаючи у взаємодію з активними центрами полум'я, інгібує ланцюгові реакції окиснення горючих газів



Рис. 4. Конформація макромолекул ПГМГ: а – розгорнута - в розведеному розчині; б – згорнута - в концентрованому розчині.

Fig. 4. Conformation of PHMG macromolecules: a – unrolled in diluted solution; b – coagulated in strong solution.

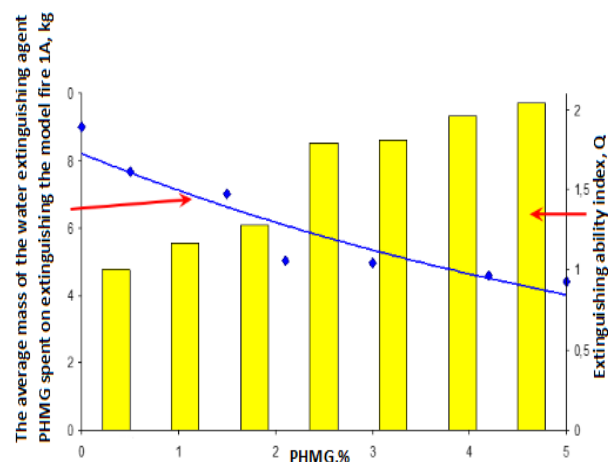


Рис. 5. Витрати водної вогнегасної речовини ПГМГ на гасіння модельного вогнища 1А.

Fig. 5. Discharge of water extinguishing agent PHMG for extinguishing the model foci 1A.

Експериментально встановлено, що оптимальна концентрація ПГМГ для використання в первинних засобах пожежогасіння становить 3–5 %. За таких концентрацій дальність подачі вогнегасної суміші збільшується до 50 %, а тривалість гасіння зменшується у 3–4 рази (рис. 3).

Зменшення тривалості гасіння сприяє зменшенню витрат водної вогнегасної речовини ПГМГ (рис. 5), витраченої на гасіння модельного вогнища 1А. Це пов'язано з тим, що молекули полімеру, які сильно розбухають у воді, мають ниткоподібну будову і під дією потоку рідини витягуються вздовж потоку (ефект Томса), зменшуючи турбулентність потоку.

Доцільним є використання розчинів з масовою часткою ПГМГ не більше 5%. Застигання розчинів з утворенням на поверхні полімерної плівки за більших концентрацій може призвести до порушення роботи деяких механізмів пожежно-технічного обладнання.

Соли ПГМГ містять йоногенні гуанідинові та гексаметиленові групи, які обумовлюють здатність до адсорбції на границі розділу фаз та зменшення поверхневого натягу води, що зумовлює підвищення ефективності змочування дисперсних матеріалів.

При цьому за рахунок збільшення сил адгезії підвищуються злипання частинок та їхнє збільшення. Крім того поліелектроліти здатні утворювати інтерполімерні комплекси. Ці властивості гуанідинових сполук вказують на перспективність використання їх для запобігання вітрової міграції радіоактивних часточок на забруднених територіях та зменшення пилоутворення внаслідок злипання, коагуляції та седиментації пилових радіоактивних часточок.

Раніше нами розглянуто доцільність використання у якості вогнезахисних засобів солей ПГМГ, що серійно виготовляються в Україні і є екологічно безпечними речовинами та належать до IV класу токсичності [12]. Розроблено вогнезахисні композиції, які після висихання на поверхні целюлозовмісних матеріалів утворюють водостійкі полімерні плівки з високими характеристиками міцності і пролонгованим біоцидним ефектом, що обумовлено наявністю в складі полігексаметиленгуанідину гуанідинових груп, які об'єднані в загальний полімерний ланцюг. Запропоновані композиції завдяки своєму хімічному складу можуть одночасно реалізовувати декілька механізмів припинення горіння (ізолювання, інгібування, флегматизацію, охолодження) та не містять компонентів, які за ступенем дії на організм відносяться до небезпечних або надзвичайно небезпечних (що дозволяє вирішити екологічну задачу), і можуть бути ефективно закріплені на поверхні целюлозовмісних матеріалів [13]. Взаємодія похідних полігексаметиленгуанідину з горючими компонентами лісових екосистем, зокрема деревиною та органами дерев, відбувається за рахунок утворення водневих зв'язків між гідрокси-

льними групами поверхні та аміногрупами полімеру, а іммобілізація солей полігексаметиленгуанідину збільшує термостійкість целюлозовмісного матеріалу. Утворена на поверхні органів дерев полімерна плівка в умовах пожежі є термостійкою за температури до 350°C. За вищих температур полімерна плівка розкладається з утворенням нітроген- та фосфорвмісних йонів, які, вступаючи в реакції радикального механізму горіння інгібують активні центри полум'я. Експериментальні випробування вогнезахисної ефективності показали, що застосування превентивного оброблення горючих матеріалів розчинами ПГМГ веде до зменшення лінійної швидкості поширення полум'я майже у 3-4 рази в порівнянні з необробленими зразками лісових горючих матеріалів, а втрата маси оброблених лісових горючих матеріалів при спалюванні в залежності від концентрації ПГМГ становить $\approx 7,7-9\%$, на відміну від необроблених соснових зразків, де втрата маси досягає 80-85%.

Для удосконалення процесу гасіння та з метою зменшення часу гасіння низової лісової пожежі, що особливо актуально в умовах радіоактивного забруднення, нами запропоновано спосіб гасіння лісової пожежі з використанням полімерних поверхнево-активних речовин гуанідинового ряду в якості водних вогнегасних та вогнезахисних речовин.

Гасіння лісової пожежі здійснюється шляхом подавання в зону пожежі (починати з тилу, а потім переходячи до флангових та фронтальної ділянок пожежі) або безпосередньо на кромку пожежі водних розчинів вогнегасних речовин гуанідинового ряду. Концентрація ПГМГ в залежності від інтенсивності пожежі може складати від 0,01 до 5%.

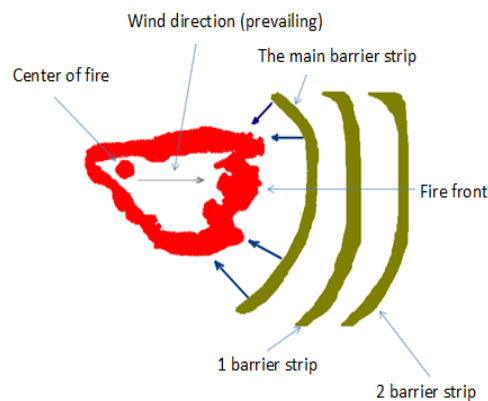


Рис.6 Схема гасіння лісової пожежі з використанням солей ПГМГ

Fig. 6. Scheme of forest fire extinguishing using PHMG salts

Одночасно прокладають загороджувальні смуги з використанням вогнезахисних полімерних композицій. Загороджувальні смуги шириною 1-1,5 метри прокладають безпосередньо перед фронтом лісової пожежі (рис. 6). Для їх прокладання використовують

водні розчини солей ПГМГ з концентрацією 27-35% та молекулярною масою від 10000 до 11000 а.о.м.

Проявляючи властивості катіонних поверхнево-активних речовин солі ПГМГ знижують поверхневий натяг та покращують змочувальну здатність як лісових горючих матеріалів, так і утвореного внаслідок пожежі радіоактивного пилу. Такі властивості сприяють акумуляції радіонуклідів у верхніх шарах лісових горючих матеріалів та зменшенню вітрової міграції пиловатих радіоактивних часточок.

Запропонований спосіб дозволяє підвищити ефективність гасіння лісових пожеж та досягти скорочення термінів гасіння завдяки утворенню на поверхні лісових горючих матеріалів полімерного (інгібуючого) шару, що уповільнює швидкість горіння на початковій стадії, та підвищення ефективності роботи гідравлічних систем пожежно-технічного обладнання внаслідок зменшення гідравлічних втрат в трубопроводах, що обумовлено використанням полімерної вогнегасної речовини полігексаметиленгуанідину (ефект Томса).

Таблиця 3. Розрахунковий час роботи особового складу пожежних підрозділів під час гасіння лісових пожеж в умовах радіоактивного забруднення

Table 3. Estimated working time for fire staff during the extinguishing of forest fires within radioactive contaminated area

Потужність експозиційної дози, мкЗв/год.	Категорія А ІІ підгрупа (особовий склад пожежних підрозділів)	
	H ₂ O	за умови використанням водних вогнезахисних на основі ПГМГ
50	Не залучати	Не залучати
10	35 хв.	70 хв.
5	1,5 год.	3 год.
1	6,2 год.	12,4 год.
0,5	12,5 год.	25,0 год.
0,3	Без обмежень	Без обмежень

Під час гасіння лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях основними міжнародними нормами безпеки МАГАТЕ вимагається мінімізація опромінення персоналу, а також забезпечення оцінки дози його опромінення, проведення індивідуального дозиметричного контролю та моніторингу навколишнього середовища [14]. Національною комісією з радіаційного захисту населення України (НКРЗУ) з метою обмеження опромінення осіб, які додатково опромінюються під час виконання своїх професійних обов'язків (категорії А), встановлено ліміти ефектив-

ної й еквівалентних доз зовнішнього опромінення за календарний рік [15-16]. Контрольний рівень зовнішнього опромінення для особового складу пожежних підрозділів при роботі в Чорнобильській зоні відчуження становить 2,3 мЗв.

Оскільки використання запропонованого способу гасіння лісової пожежі супроводжується зменшенням лінійної швидкості поширення полум'я майже у 3-4 рази та відповідно скороченням термінів гасіння, застосування солей ПГМГ під час гасіння лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях зумовить істотну економію дози опромінення особового складу пожежних підрозділів. Розрахунковий час роботи пожежних в умовах радіоактивного забруднення за потужності експозиційної дози 0,5–10 мкЗв/год та контрольного рівня зовнішнього опромінення 2,3 мЗв/рік, при використанні водних вогнезахисних речовин на основі ПГМГ, вдвічі більше, ніж при використанні води (табл. 3).

Висновки

1. Обґрунтовано використання ефективних екологічно прийнятних водних вогнегасних та вогнезахисних речовин гуанідинового ряду для гасіння лісових пожеж (у тому числі на радіоактивно забруднених територіях) та мінімізації вмісту радіоактивних аерозолів у приземному шарі повітря.

2. Запропоновано спосіб гасіння лісової пожежі (в тому числі і на радіоактивно забруднених територіях), що включає в себе використання водної вогнегасної речовини на основі полімерної поверхнево-активної речовини полігексаметиленгуанідину безпосередньо для гасіння кромки пожежі з одночасним прокладанням перед фронтом пожежі загороджувальних смуг на основі солей полігексаметиленгуанідину.

3. Встановлено, що використання запропонованого способу гасіння лісової пожежі дозволяє скоротити тривалість гасіння пожежі в 3–4 рази за рахунок утворення на обробленій поверхні лісових горючих матеріалів полімерного ізолюючого шару, продукти термодеструкції якого виконують функцію інгібіторів горіння.

4. Обґрунтовано використання водних вогнегасних та вогнезахисних речовин гуанідинового ряду для запобігання вітрової міграції радіоактивних часточок в результаті злипання, коагуляції та седиментації часточок радіоактивного пилу і зменшення пилоутворення з подальшою акумуляцією деяких радіонуклідів у верхніх шарах оброблених лісових горючих матеріалів.

5. Показано, що використання запропонованого способу гасіння лісової пожежі зумовить істотну економію дози опромінення особового складу пожежних підрозділів під час гасіння лісових пожеж на радіоак-

тивно забруднених територіях.

6. Обґрунтовано, що активне гасіння лісової пожежі та прокладання загороджувальних смуг з використанням полімерних поверхнево-активних речовин гуанідинового ряду, які серійно виготовляються в Україні, відповідає екологічним вимогам щодо охорони навколишнього середовища і раціонального використання природних ресурсів.

Література

1. Наукові засади захисту населення і територій від наслідків лісових пожеж з радіаційно небезпечними факторами: монографія / С.І. Азаров, С.А. Єременко, В.Л. Сидоренко та ін.; за заг. ред. П.Б. Волянського. К.: ТОВ "Інтердрук", 2016. 203с.
2. Дворник А. А. Радиоактивное загрязнение воздуха в результате лесных пожаров и его опасность для здоровья человека / А. А. Дворник, А. М. Дворник, Р. А. Король и др. // Радиация и риск. Т. 25. №2–2016. С. 100-108
3. Dusha-Gudym S.I. Forest Fires on the Areas Contaminated by Radionuclides from the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident / United Nations, Economic Commission for Europe // International Forest Fire News.-1992.- № 7.-P. 4-6.
4. Yoschenko V.I., Kashparov V.A., Protsak V.P., Lundin S.M., Levchuk S.E., Kadygrib A.M., Zvarich S.I., Khomutinin Yu.V., Maloshtan I.M., Lanshin V.P., Kovtun M.V. Resus pensionand redistribution of radionuclides during grasslandand forestfires in the Chernobyl exclusion zone: part I. Fire experiments // Journal of Environmental Radioactivity. -2006. -V.86. - P.143-163.
5. Захматов В.Д. Современные проблемы лесных пожаров в Чернобыльской зоне/ В.Д. Захматов, М.В. Силыников, М.В. Чернышов / Пожаровзрывобезопасность – 2015. Т. 24 - №11– С. 55-62.
6. Dvornik, A.A., Dvornik, A.M., Korol, R.A., Shamal, N.V., Gaponenko, S.O., Bardukova, A.V. / Potential threat to human health during forest fires in the Belarusian exclusion zone Aerosol Science and Technology – 2018, Vol. 52, № 8, p.923–932.
7. Антонов А.В. Вогнегасні речовини А.В. Антонов, В.О. Боровиков, В.П. Орел, В.М. Жартовський, В.В. Ковалишин. – Київ: Пожінформтехніка, 2004. – 176 с.
8. Бут В.П. Первинні засоби пожежогасіння. Тактика використання В.П. Бут, В.М. Жартовський, І.Г. Маладика та інші. Навч. пос. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля МНС України, 2008. – 136с.
9. Ковалишин В.В. Пінне гасіння В.В. Ковалишин, О.К. Васильєва., И.М.Козяр-Львів, СПОЛОМ. -2007. 168 с.
10. Гембицкий П.А. Полимерный биоцидный препарат полигексаметиленгуанидин / П. А. Гембицкий, И.И. Воинцева // Запорожье, 1998. 44с.
11. Нижник В. В. Фізична хімія полімерів: Підручник / В. В. Нижник, Т. Ю. Нижник. – К.: Фітосоціоцентр, 2009.- 424с.
12. Maglyovana T.V. Mechanism of interaction of derivative polyhexamethylenuganidin derivatives with biomaterials of forest ecosystems / T.V. Maglyovana, V.V. Dolin // Geochemistry of Technogenesis – 2019. – №1 – Pp. 73-81.
13. Магльована Т.В. Екологічні аспекти використання гуанідинових полімерів в умовах надзвичайних ситуацій: [Монографія] Видання друге/ Т. В. Магльована, Т. Ю. Нижник, С. В. Жартовсь-

кий. Черкаси: видавець ФОП Гордієнко С.І., 2017–210с.

14. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Interim edition. General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3 (Interim), IAEA, Vienna, 2011, 303p.

15. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ – 97). – Державні гігієнічні нормативи. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. – Видання офіційне. – Київ: Комітет з питань гігієнічного регламентування МОЗ України, 1998. – 135с.

16. Наказ МОЗ України від 02.02.2005 № 54 «Про затвердження державних санітарних правил «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України» ДСП 6.177-2005-09-02.

References

1. Azarov, S.I., Eremenko, S.A., Sidorenko, V.L and others; for the total. ed. Volyansky P.B. (2016) *Naukovi zasady zakhystu naselennya i terytoriy vid naslidkiv lisovykh pozhezh z radiatsiyno nebezpechnymy faktoramy*, Interdruk, Kyiv, UA, 203p.
2. Dvornik, A.A., Dvornik, A.M., Koroleta, R. A. (2016), *Radiation and risk*, Т. 25, №2, pp. 100–108.
3. Dusha-Gudym, S.I. (1992) *United Nations, Economic Commission for Europe. International Forest Fire News*, № 7, pp. 4-6.
4. Yoschenko, V.I., Kashparov, V.A., Protsak V.P., Lundin, S.M., Levchuk, S.E., Kadygrib, A.M., Zvarich, S.I., Khomutinin, Yu.V., Maloshtan, I.M., Lanshin, V.P., Kovtun, M.V. (2006) *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 86, pp. 143-163.
5. Zakhmatov, V.D., Silnikov, M.V., Chernyshov, M.V. (2015) *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*, Vol. 24, №11, pp. 55–62.
6. Dvornik, A.A., Dvornik, A.M., Korol, R. A., Shamal, N. V., Gaponenko, S.O., Bardukova, A.V. (2018) *Aerosol Science and Technology*, Vol. 52, № 8, pp. 923–932.
7. Antonov, A.V., Borovykov, V.O., Ore, V.P., Zhartovskyy, V.M., Kovalyshyn, V.V. (2004), *Extinguishing agents*, Poszhintekhnika, Kyiv, UA, 176 p.
8. Boot, V.P., Zartovsky, I.G (2008), *Primary extinguishing media. Tactics of using*, Cherkasy, UA, 136p.
9. Kovalishin, V.V., Vasiliev, O.E., Kozyar, N.M. (2007), *Foam extinguishing*, Spolom, Lviv, UA, 168p.
10. Hembitsky, P.A. (1998), *Polimernyy biotsydnnyy preparat poliheksametylenhuanidyn*, Zaporozhie, UA, 44p.
11. Nyzhnyk, V.V., Nyzhnyk T. Yu. (2009) *Fizychna khimiya polimeriv*, Phytosociocenter, Kyiv, UA, 424 p.
12. Maglyovana, T.V., Dolin, V.V. (2019) *Geochemistry of Technogenesis*, №1, pp. 73-81.
13. Maglyovana, T.V., Nyzhnyk, T. Yu., Zhartovsiy S. V. (2017), *Environmental aspects of the use of guanidine polymers in emergency situations*, Cherkassy, UA, 210 p.
14. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Interim edition. General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3 (Interim), IAEA, Vienna, 2011, 303p.
15. *Normy radiatsiynoyi bezpeky Ukrayiny* [Norms of radiation safety of Ukraine], (1998) 6.6.1.-6.5.001-98, Kyiv, UA, 135 p.
16. *Nakaz MOZ Ukrayiny (2005) № 54 «Pro za-tverdzhennya derzhavnykh sanitarnykh pravyl «Osnovni sanitarni pravyla zabezpechennya radiatsiynoyi bezpeky Ukrayiny»* 6.177-2005-09-02.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГУАНИДИНОВЫХ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ И МИНИМИЗАЦИИ ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Маглевая Т.В., к.х.н., доц., Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля НУГЗ Украины
Долін В.В., докт. геол. н., проф., ГУ «Институт геохимии окружающей среды» НАН Украины

Обосновано использование экологически приемлемых водных огнетушащих и огнезащитных веществ гуанидинового ряда для тушения лесных пожаров (в том числе на радиоактивно загрязненных территориях) и минимизации радиационных последствий. Обладая свойствами полиэлектролита, молекулы полимера, вытягиваются вдоль потока, уменьшая сопротивление при движении воды. Макромолекулы солей полигексаметиленгуанидина (ПГМГ) ориентируются параллельно внутренней поверхности труб, благодаря чему снижается интенсивность турбулентных пульсаций в пристеночной слое, уменьшается турбулентность потоков, снижаются гидравлические потери, что ведет к увеличению расхода жидкости через них. Экспериментально установлено, что при концентрации 3-5 % увеличивается дальность подачи водных огнетушащих веществ на 50 % с использованием огнетушителя ОВШ-9, а продолжительность тушения модельного очага 1А уменьшается в 3-4 раза. Предложен способ тушения лесного пожара (в том числе и на радиоактивно загрязненных территориях), включающий в себя использование водного огнетушащего раствора на основе полимерного поверхностно-активного вещества полигексаметиленгуанидина непосредственно для тушения кромки пожара с одновременным прокладыванием перед фронтом пожара заградительных полос с использованием солей ПГМГ. Установлено, что использование предлагаемого способа тушения лесного пожара позволяет сократить продолжительность тушения в 3-4 раза за счет использования в качестве водных огнетушащих веществ гидродинамически активных полимеров гуанидинового ряда и одновременного прокладывания огнезащитных полос перед фронтом пожара, вследствие чего на обработанной поверхности лесных горючих материалов образуется полимерный изолирующий слой, продукты термодеструкции которого выполняют функцию ингибиторов горения. Обосновано использование водных огнетушащих и огнезащитных веществ гуанидинового ряда для предупреждения ветровой миграции на радиоактивно загрязненных территориях в результате осаждения радиоактивной пыли и пылеподавления с последующей аккумуляцией некоторых радионуклидов в верхних слоях обработанных лесных горючих материалов. Показана перспективность использования предложенного способа тушения лесного пожара для уменьшения дозы облучения личного состава пожарных подразделений, а также с целью предотвращения лесных пожаров и минимизации экономических, экологических и социальных последствий от них.

Ключевые слова: лесные горючие материалы, пожаротушение, водные огнетушащие вещества, полигексаметиленгуанидин.

FEASIBILITY INVESTIGATION OF USING GUANIDINE-BASED POLYMERS FOR FOREST FIRES EXTINGUISHING AND MINIMIZING THEIR EFFECTS

Maglyovana T.V., Ph.D., Associate Professor, Cherkasy Fire Safety Institute named after Heroes of Chernobyl, National University of Civil Protection of Ukraine, maglyovana_t@ukr.net
Dolin V. V. D. Sc. (Geol.), SI "Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine"

The use of environmentally friendly water-extinguishing and fire-retardant substances of the guanidine series for forest fire extinguishing (including radioactively contaminated territories) and minimizing radiation effects has been substantiated. Owing the properties of the polyelectrolyte, under the action of the flow, the polymer molecules are stretched along the flow, reducing the resistance during the movement of water. PGMG macromolecules are oriented parallel to the inner surface of the tubes. Thereby the intensity of turbulent ripples in the wall layer reduces, the turbulence of flows decreases alongside with the hydraulic losses, which, as a result, leads to the increase in fluid flow. It is experimentally established that at the concentration of more than 3-5% the range of supply of water extinguishing agents increases by 10% with the use of the fire extinguisher water mine pumped VVSH-9, and the duration of extinguishing the model fire 1A reduces by 20%. A method of forest fire extinguishing (including radioactively contaminated territories) is proposed, which includes the use of the water extinguishing agent based on polymeric surfactant polyhexamethyleneguanidine (PGMG) directly for extinguishing the edge of a fire with the simultaneous use of PGMG salts. It has been established that the use of the proposed method of forest fire extinguishing can reduce the duration of fire extinguishing by 3-4 times due to the use of hydrodynamically active polymers of guanidine series as water and extinguishing agents and simultaneous formation on the treated forest surface of the combustible materials of polymeric insulation layer which thermal degradation materials act as combustion inhibitors. The use of water-extinguishing and flame-retardant substances of guanidine series for prevention of wind transfer at radioactively contaminated territories as a result of radioactive dust sedimentation and dust suppression with subsequent accumulation of some radionuclides in the upper layers of the treated forest combustible materials has been substantiated. The promise of using the proposed forest fire extinguishing method to reduce the exposure dose rate for the personnel of fire departments, to prevent forest fires, and minimize the economic, environmental and social consequences of them has been shown.

Keywords: forest combustible materials, fire extinguishing, water extinguishing agents, polyhexamethyleneguanidine