

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ
УКРАЇНИ**

**ГАСІННЯ НИЗОВИХ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ
ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИМИ ЗАСОБАМИ**

Монографія

Харків 2024

Рецензенти:доктор технічних наук, професор **Я.М. Пітак**доктор технічних наук, професор **О.С. Меняйленко**

УДК 614.843

Ефективне гасіння низових лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням: монографія / Д. І. Савельєв, О. О. Кіреєв, М. О. Чиркіна-Харламова, С.Ю. Назаренко. – Х.: Друкарня Мадрид, 2024. – 104с.

ISBN 978-617-7988-16-7

У роботі обґрунтовано вибір засобу з високими вогнезахисними властивостями стосовно матеріалу лісової підстилки, який забезпечує тривалий захист лісових горючих матеріалів від займання, та показано переваги гелеутворюючих систем. Розроблено методи подавання гелеутворюючих систем, які дозволяють забезпечити високу проникну здатність до матеріалу лісової підстилки, а також експериментальні методи визначення вогнезахисних властивостей гелевих композицій стосовно лісових горючих матеріалів, на основі яких було здійснено оцінку відповідних характеристик. На основі математичних методів планування й обробки результатів експерименту обрано оптимальний склад гелеутворюючої композиції. Обґрунтовано параметри пристрою для організації подавання компонентів гелеутворюючої системи на лісову підстилку в реальних умовах лісової пожежі. Розкрито раціональні параметри вогнезахисної смуги, яка утворюється за допомогою гелеутворюючих систем.

За результатами роботи запропоновано мобільний пристрій для організації роздільно-послідовного та роздільно-одночасного подавання компонентів гелеутворюючої системи на лісову підстилку в умовах реальної лісової пожежі та спосіб використання такої установки.

Монографія орієнтована на наукових та практичних працівників органів і підрозділів служби цивільного захисту, викладачів, ад'юнктів і здобувачів вищої освіти.

УДК 614.843

ISBN 978-617-7988-16-7

© Д.І. Савельєв, О.О.Кіреєв,
М.А. Чиркіна-Харламова,
С.Ю. Назаренко

© НУЦЗУ, 2024

© ТОВ «Друкарня Мадрид», 2024

Зміст

Передмова	5
Розділ 1. Сучасні засоби гасіння низових лісових пожеж	9
1.1 Особливості лісових пожеж та їх основні параметри.....	9
1.2 Властивості лісових горючих матеріалів.....	9
1.3 Виникнення й розвиток лісових пожеж.....	13
1.4 Методи й засоби гасіння лісових пожеж.....	14
1.4.1 Гасіння лісових пожеж нахльостуванням або закиданням грунтом крайки.....	15
1.4.2 Гасіння лісових пожеж водою або водними розчинами хімікатів	16
1.4.3 Гасіння лісових пожеж шляхом створення протипожежних бар'єрів.....	21
1.4.4 Інші методи гасіння лісових пожеж.....	23
1.5 Недоліки наявних методів гасіння лісових пожеж.....	30
Розділ 2. Шляхи підвищення ефективності методів і засобів гасіння лісових пожеж	32
2.1 Зменшення втрат вогнегасних речовин під час гасіння лісових пожеж.....	32
2.2 Підвищення охолоджувальної, розріджувальної, інгібувальної та ізолювальної дії вогнегасних речовин, які використовують для гасіння лісових пожеж.....	34
2.3 Підвищення вогнезахисних властивостей бінарних вогнегасних систем.....	37
2.4 Підходи до оптимізації сумішей БВС під час гасіння лісових пожеж.....	39
2.5 Підвищення проникної здатності БВС.....	41
Розділ 3. Дослідження вогнезахисних характеристик БВС по відношенню до матеріалу лісової підстилки	42
3.1 Дослідження проникних властивостей ГУС при роздільно- послідовній і роздільно-одночасній подачі компонентів.....	42
3.2 Дослідження проникних властивостей ПУС при роздільно- послідовній і роздільно-одночасній подачі компонентів.....	43
3.3 Лабораторні дослідження вогнезагороджувальних властивостей лісової підстилки, обробленої ГУС.....	45
3.4 Лабораторні дослідження вогнезагороджувальних властивостей лісової підстилки, обробленої ПУС.....	49
3.5 Лабораторні дослідження впливу параметрів ГУС на вогнезагороджувальні властивості.....	52
3.6 Дослідження вогнезахисних властивостей ГУС на модельному осередку низової лісової пожежі.....	59
3.7 Дослідження вогнезахисних властивостей ГУС 5 % Na ₂ O·2,7SiO ₂ + 35 % CaCl ₂ на модельному осередку низової лісової пожежі в реальних умовах.....	64

Розділ 4. Гасіння низових лісових пожеж за допомогою БВС із роздільним подаванням компонентів.....	69
4.1 Токсикологічні, екологічні та експлуатаційні характеристики компонентів ГУС і гелеподібних шарів.....	69
4.2 Засоби подачі вогнегасних ГУС.....	71
4.3 Моделювання процесу гасіння низових лісових пожеж середньої й високої інтенсивності за допомогою бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів ГУС.....	75
4.4 Розрахунок витрат вогнегасних речовин та часу на створення вогнезахисної смуги під час гасіння низової лісової пожежі за допомогою ГУС.....	80
4.5 Практичні рекомендації з гасіння низових лісових пожеж за допомогою бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів ГУС.....	82
4.6 Економічні параметри запропонованої вогнегасної системи.....	83
Післямова.....	85

ПЕРЕДМОВА

Монографія присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі у сфері пожежної безпеки – підвищенню ефективності гасіння низових лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів гелеутворюючих сполук (ГУС).

Лісові пожежі часто виникають через довгий за часом засушливий період. Великі лісові пожежі є одним із найбільш важких для гасіння видів пожеж. Такі пожежі можуть тривати багато днів і навіть місяців. Найбільш складними для гасіння є верхові лісові пожежі. Але такі пожежі, в більшості випадків, починаються з низових пожеж. Тому швидке гасіння низових пожеж може запобігти переходу низової пожежі у верхову. Існуючі засоби в багатьох випадках не дозволяють успішно боротися з низовими лісовими пожежами, навіть у разі залучення великих сил і засобів пожежогасіння.

Основними методами гасіння низових лісових пожеж є наступні: нахльостування або закидання ґрунтом крайки лісової пожежі; гасіння водою або розчинами хімікатів; прокладання мінералізованих смуг; відпал лісових горючих матеріалів або метод пуску зустрічного вогню; гасіння із залученням авіації; штучне викликання опадів; гасіння з використанням вибухових речовин.

Різні способи гасіння лісових пожеж мають свої переваги і недоліки. Деякі з них не вимагають використання техніки, але вимагають залучення великих людських ресурсів. Деякі не вимагають завезення вогнегасних речовин, інші вимагають доставки великої кількості вогнегасних речовин.

На основі аналізу основних механізмів припинення горіння та інших факторів, що впливають на ефективність гасіння в роботі для гасіння низових лісових пожеж, обґрунтовано використання ГУС як засобу створення загороджувальних смуг. Гелеві шари мають високі вогнезахисні властивості, завдяки наявності в їх складі води – речовини з аномально високими охолоджувальними властивостями. Для зменшення втрат води за рахунок випаровування її з гелю під дією погодних факторів запропоновано введення до складу ГУС високогігроскопічної речовини – хлориду кальцію.

Одним з недоліків гелевих шарів як засобу створення загороджувальної смуги є можливість поширення полум'я під шаром гелю. Таке явище спостерігалось у разі товщини шару лісової підстилки більше 3 см. Воно зумовлене низькою проникною здатністю гелю. Для подолання такого недоліку було запропоновано два підходи – використання піноутворюючих систем (ПУС) і застосування роздільно–послідовного способу подавання компонентів ГУС. В обох запропонованих методах вдалось забезпечити проникнення вогнегасної речовини на всю глибину лісової підстилки, що унеможливило поширення полум'я через загороджувальну смугу.

В ході лабораторних експериментів з використанням модельних осередків пожежі [159] малих розмірів було порівняно вогнезахисні властивості по відношенню до матеріалу хвойної лісової підстилки двох видів бінарних систем – ГУС і ПУС. В якості ГУС було використано 4 системи:

$\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2 + (\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4); \text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{NH}_4\text{HCO}_3;$
 $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{CaCl}_2$ і $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. В якості ПУС було використано 6 систем: $\text{NaHCO}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; $\text{NaHCO}_3 + (\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$; $\text{NaHCO}_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$; $\text{NH}_4\text{HCO}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; $\text{NH}_4\text{HCO}_3 + (\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$; $\text{NH}_4\text{HCO}_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Порівняння таких систем дозволило дійти таких висновків:

- ГУС і ПУС можуть забезпечити проникнення вогнегасної речовини вглиб лісової підстилки в разі використання роздільно-послідовного способу подавання компонентів;

- ГУС і ПУС мають близькі вогнезахисні властивості по відношенню до хвойної лісової підстилки в разі малого часу сушіння;

- за умов часу сушіння більше 30 хвилин ГУС мають суттєву перевагу за вогнезахисними властивостями, у порівнянні з ПУС.

На цій основі для подальших досліджень було обрано ГУС $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$. З використанням математичних методів планування експерименту було встановлено залежність часу займання обробленого ГУС матеріалу хвойної лісової підстилки (T_g) від концентрації $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$ (x_1), концентрації CaCl_2 (x_2), питомої поверхневої витрати ГУС (x_3) і часу сушіння (x_4), яка в кодованих координатах має вигляд:

$$T_g = 3,922 - 1,729x_1 + 0,762x_2 + 1,38x_3 - 0,48x_4 - 0,79x_1 \cdot x_2 - 0,603x_1 \cdot x_3 + 0,769x_1 \cdot x_4 - 0,396x_2 \cdot x_4 + 0,36x_1^2 + 0,966x_3^2 + 0,46x_4^2.$$

Максимальне значення T_g було визначено шляхом покрокового перебору за усіма чотирма координатами. Воно склало 30 хв. Також було встановлено, що оптимальною за вогнезахисними властивостями є ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %).

Для цієї ГУС було проведено дослідження її вогнезахисних властивостей по відношенню до модельних осередків низової лісової пожежі розміром ~1 м за різних швидкостей повітряних потоків та кутів нахилу поверхні. Ці дослідження дозволили встановити, що за питомої витрати ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %), рівної 0,7 г/см² за ширини смуги 20 см, достатньо для створення протипожежного бар'єра на час до 4 годин при куті нахилу поверхні до горизонту до 40°. Також було встановлено, що для запобігання займанню ділянки лісової підстилки поза зоною основної вогнезахисної смуги, за умови одночасного впливу теплового випромінювання, фрагментів тліючих гілок та іскор, потрібно нанести ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) з питомою витратою 0,2 г/см².

Результати, одержані на модельних осередках низової лісової пожежі, було підтверджено результатами натурних експериментів. Загальним висновком з досліджень вогнезахисних властивостей ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) є достатність її питомої витрати, рівної 0,7 г/см², для

забезпечення зупинення фронту низової пожежі протягом до 4 годин після нанесення шару гелю роздільно-послідовним методом. Для запобігання займанню ділянки лісової підстилки поза зоною основної вогнезахисної смуги під одночасним впливом теплового випромінювання та іскор потрібно нанести ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) з питомою витратою $0,2 \text{ г/см}^2$ з використанням роздільно-одночасного подавання компонентів ГУС.

Саме цю ГУС запропоновано для створення вогнезахисного бар'єра для припинення поширення низової лісової пожежі середньої та високої інтенсивності. Нанесення гелеутворюючої композиції на лісовий горючий матеріал було запропоновано проводити нерівномірно. Смуга, яку передбачалося створювати, була розділена на дві по-різному оброблених ділянки. Частина смуги обробляється на всю глибину підстилки з питомою витратою $0,7 \text{ г/см}^2$, за ширини смуги 20 см, яка забезпечує неможливість поширення горіння в шарах лісової підстилки, під поверхневим шаром гелю. Для цього застосовується роздільно-послідовний спосіб подавання компонентів ГУС. Друга частина смуги створюється способом роздільно-одночасного подавання компонентів ГУС із питомою витратою $0,2 \text{ г/см}^2$. Ширина такої смуги буде визначатися висотою полум'я. У цьому випадку на поверхні підстилки утворюється шар гелю, який захищає підстилку тільки від вторинних проявів горіння (іскор, теплового випромінювання та ін.)

Для створення такої смуги за допомогою одного рухомого засобу потрібно забезпечити подавання компонентів ГУС із такою інтенсивністю, яка забезпечує відповідні питомі поверхневі витрати. Виходячи, із прийнятих параметрів вогнезахисної смуги та висоти полум'я, було отримано математичні залежності, які пов'язують ці параметри зі швидкістю руху пересувного засобу:

$$v = \frac{Q}{h \cdot \Phi}; \quad \tau = \frac{l}{v} = \frac{l \cdot h \cdot \Phi}{Q};$$

де v – швидкість руху пересувного засобу; Q – витрата ГУС із засобу подавання; h – ширина вогнезахисної смуги; l – довжина вогнезахисної смуги; Φ – поверхнева питома витрата ВР; τ – час створення вогнезахисної смуги.

Для організації подавання компонентів ГУС було сконструйовано та виготовлено мобільний пересувний засіб для транспортування і подавання компонентів ГУС на лісову підстилку з регульованою витратою компонентів, яка забезпечує змінну ширину захисної смуги. Проведено розрахунки параметрів подавання ГУС за допомогою пересувних засобів. Показано, що для створення вогнезахисної смуги довжиною 1000 м, в разі висоти полум'я 2 м, потрібно 9,1 т компонентів ГУС, з яких в перерахунку на чисті речовини припадає 227,5 кг рідкого скла, 1592,5 кг кальцій хлориду та 7280 кг води.

Розроблено практичні рекомендації щодо застосування ГУС для гасіння низових лісових пожеж. Показано, що запропонована вогнегасна система, в разі створення вогнезахисної смуги, має переваги:

- в порівнянні з водою – за масою ВР, за часом працездатності, а в разі

великої відстані до джерела води забезпечує зниження загальних фінансових витрат на гасіння низової лісової пожежі високої інтенсивності;

- в порівнянні з використанням важкої землерийної техніки – за часом створення захисної смуги та відсутністю обмежень щодо рельєфу місцевості, виду ґрунту та характеру деревостою;

- в порівнянні з використанням водних розчинів хімікатів – за економічними та екологічними параметрами;

- у порівнянні з відпалом – за зменшенням втрат лісових масивів;

- у порівнянні з авіаційними методами – за великим зменшенням фінансових витрат та відсутністю потреб у залучанні додаткових сил та засобів для підтримки гасіння на землі.

Таким чином, було вирішено актуальну науково - практичну задачу у сфері пожежної безпеки – підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж за рахунок використання бінарних вогнегасних систем із роздільно-послідовним та роздільно-одночасним подаванням компонентів ГУС. Запропонований спосіб гасіння має переваги перед існуючими методами, завдяки більш високій ефективності, економічності та екологічним параметрам.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ЗАСОБИ ГАСІННЯ НИЗОВИХ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

1.1 Особливості лісових пожеж та їх основні параметри

Лісові пожежі є поширеним різновидом ландшафтних (природних) пожеж, до яких відносять: степові (трав'яні), лісові, болотяні (торф'яні), тундрові, мареві, очеретяні та польові (дозрілий хліб). Лісові пожежі є найбільш складними для гасіння. Було запропоновано багато способів класифікації лісових пожеж: І.С. Мелехов [110], С.П. Анцишкін [14]), М.П. Курбатський [89], М.А. Софронова [160] та ін. Відповідно до термінології, яку науковці використовують сьогодні в Україні [91; 126], під лісовою пожежею розуміють стихійне, некероване поширення горіння на території лісового фонду [15; 33; 199]. Відповідно до такого визначення до лісових пожеж не відносять профілактичні контрольовані випалювання частини горючого матеріалу в лісі, а також стихійно виниклі пожежі, які за певних умов можна віднести до корисних [42].

У сучасній теорії та практиці пожежогасіння лісові пожежі описують із погляду інтенсивності горіння [41], швидкості їх поширення [49], а також залежно від особливостей вертикального розташування горючого матеріалу, що бере участь у горінні [58; 87; 126]. Прийнято також виділяти кілька класів лісових пожеж за площею, на якій відбувається горіння [11; 42; 112]

Сучасна класифікація лісових пожеж ґрунтується на розташуванні горючого матеріалу відносно ґрунту. Горючі матеріали в лісах можуть знаходитися у верхньому шарі ґрунту – підстилці. Сукупність кущів, трав, мохів, лишайників відносять до ґрунтового покриву. Верхній ярус лісових горючих матеріалів становить полог деревостою. Також можлива наявність горючих матеріалів нижче рівня ґрунту – запаси торфу [199].

Класифікація лісових горючих матеріалів та лісових пожеж наведена у додатку А [30; 109; 126] та Б [89; 113; 114].

Більшість лісових пожеж є низовими. Їхня кількість у середньому становить 97–98 %, а площа – близько 87–89 % від усіх зареєстрованих. При цьому розподіл пожеж за видами суттєво залежить від регіону. У помірному кліматичному поясі низові пожежі становлять 90–98 %, верхові – 1–10 %, ґрунтові – до 1 % [33; 185].

Виникнення верхових пожеж найчастіше відбувається від низових у деревостоях із низько опущеними кронами, у різновікових хвойних, багатоярусних і з рясним підростом. Лісова пожежа, яка рухається по поверхні землі, підігріває й підсушує крони розташованих вище дерев, а коли до них підходить низовий вогонь, у більшості випадків спалахують крони й поширюється верховий вогонь. В більшості випадків поширення верхової лісової пожежі припиняється після припинення низової пожежі. З урахуванням цього в цій монографії будуть розглядатися низові лісові пожежі.

1.2 Властивості лісових горючих матеріалів

Важливою умовою для початку лісової пожежі є наявність горючого матеріалу. Рослини лісів, їх морфологічні частини й рослинні залишки різного ступеня розкладання, здатні горіти, називають лісовими горючими матеріалами (ЛГМ) [116]. Знання основних характеристик ЛГМ (структури, запасу, вологості, температури займання лісових матеріалів) виконує ключову роль як для розуміння процесу виникнення й розвитку лісових пожеж, так і для розроблення засобів і способів боротьби з ними.

ЛГМ мають просторову структуру та характерні вертикальні шари: підстилка – завтовшки 2–5 см; мох, лишайники та опад – завтовшки 6–8 см; трав'янисті рослини; кущі заввишки до 2 м; сукупність крон молодих дерев (підріст) – заввишки до 6 м; сукупність крон дорослих дерев, вищих за 6 м [88; 111; 174].

Фізико-хімічні й геометричні властивості ЛГМ, що впливають на процес горіння, називають пірологічними. Лісові горючі матеріали, відповідно до їх пірологічних властивостей, прийнято поділяти на шість груп:

- 1) мохи й лишайники з дрібним опадом;
- 2) трави та кущі;
- 3) підріст і підлісок;
- 4) лісова підстилка й торф;
- 5) сушняк, гнилі пні;
- 6) хвоя, охвоєні гілки й суччя [93].

Вологість першої, четвертої, та деякою мірою, п'ятої груп залежить від погоди, особливо від таких чинників, як кількість опадів, кількість днів, що минули після останнього дощу, відносна вологість повітря [108]. Відповідно до ролі у виникненні й поширенні лісових пожеж ЛГМ поділяють на три класи: провідники горіння (лишайники, мохи, дрібний опад, лісова підстилка); ті, що підтримують горіння (трави, дрібні кущі, підріст і підлісок, хвоя, дрібні гілки) [190]; ті, що затримують поширення горіння (деякі кущі та трави, липа, осика) [59]. Інтенсивність горіння під час лісової пожежі зумовлена кількісним співвідношенням різних видів горючих матеріалів та їх станом.

Лісові горючі матеріали пропонують також поділяти на наземні (надґрунтові), підземні та надземні. До підземних (або ґрунтових) ЛГМ відносять торф, органічний склад ґрунту, підземну частину рослинності [15; 184].

Наземні (або надґрунтові) горючі матеріали містять усю органічну масу покриву, яка розташована на поверхні й має тісний контакт із нею. До неї належать мохи, лишайники, трави, кущі, опад і підстилка, тобто всі ті ЛГМ, які зазвичай згорають під час низової пожежі [29; 53]. Для цієї групи горючих матеріалів є характерними значна пористість і гігроскопічність, що дозволяє їй швидко реагувати на всі зміни погодних умов [15; 184].

До надземних (кранових) горючих матеріалів належать деревостій та підріст. Ця група містить стовбури дерев разом із лишайниками на них, гілки, суччя, хвою й листя. Їй властива виражена відокремленість між окремими компонентами, мала гігроскопічність і, отже, незначна зміна вологості під впливом погодних умов [15; 184]. Крім названих трьох груп, у роботі В.Є.

Ходакова й М.В. Жарикової виділено групу східчастих ЛГМ, під якими розуміють ЛГМ, що слугують сходинками для переходу низової пожежі у верхову. Вони забезпечують вертикальну неперервність між шарами деревостою й дозволяють переходити від наземних ЛГМ на крони дерев [184]. Врахування цієї особливості є важливим під час вибору тактики гасіння пожежі.

Наземні горючі матеріали за сприятливих умов можуть горіти з виділенням такої кількості тепла, якого з надлишком вистачить для підтримування й поширення горіння. Саме ця група на ранніх стадіях лісової пожежі виконує роль палива та стає причиною більшості низових пожеж. Переважним компонентом наземних груп ЛГМ є лісова підстилка, що складається з опалого листя, хвої, залишків лісових трав'яних рослин, моху. Лісову підстилку можна визначити як органічний надґрунтовий шар, що утворюється в лісі з рослинного опаду різного ступеня розкладання (листя, хвоя, дрібні гілочки, опала кора та ін.) [49; 23]. Відповідно до наведених класифікацій лісова підстилка належить до IV групи лісових матеріалів.

Перегнила частина лісової підстилки може бути джерелом самозаймання (рідко) та безполум'яного горіння. Друга частина лісової підстилки, яка не перегнила, може бути добрим паливом. Неперегнилі сухі залишки за низької вологості, внаслідок різних чинників (наприклад, високої температури повітря, відсутності опадів, малої густоти крон дерев та ін.) легко займаються навіть від не дуже потужного джерела займання і сприяють поширенню пожежі [158].

Згорає підстилка переважно в безполум'яному режимі, унаслідок чого цей процес може протікати протягом тривалого часу. У гірських лісах на неглибоких ґрунтах кореневі системи деревних порід розташовані у верхній частині ґрунтового профілю, а тому потерпають від стійких низових пожеж. У зв'язку з цим підстилку слід розглядати як важливий компонент лісового горючого матеріалу, що визначає інтенсивність горіння й наслідки вогняного впливу на біогеоценоз [88; 165].

Формування лісової підстилки має деякі закономірності. Так, вона з'являється в момент утворення молодняком лісової заони, після чого іде фаза накопичення, а невдовзі її маса стабілізується. Ці фази залежать від порідного складу лісових насаджень, клімату, особливостей будови деревостою та ін. За інформацією П.П. Похітона [125], у стиглому дубовому деревостої запас лісової підстилки становить $13,7 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, у зрілому сосновому лісі – $25,0 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, у зрілих букових насадженнях – $13,1 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Товщина лісової підстилки є різною – від 0,5 до 15 см. У хвойних лісах вона більша, у листяних – менша. Товщина її збільшується у вологих місцях. Запаси лісової підстилки на поверхні ґрунту коливаються в межах від 10 до $100 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ – залежно від складу, віку й густоти насаджень. Лісова підстилка доволі легко відділяється від мінеральної частини ґрунту [125].

Також на підстилці знаходяться й інші ЛГМ які становлять більшу частину матеріалів, що беруть участь у низовій лісовій пожежі (опад, підріст, трава, мохи та ін.). З поширених в Україні ЛГМ найнебезпечнішою є хвоя сосни, яка має одне з найбільших значень теплоти згорання ($13,5 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$).

Теплотворна здатність соснової деревини також перевищує відповідну характеристику для інших порід дерев. У зв'язку з цим ділянки соснового лісу відносять до найбільш пожежонебезпечних [190].

Основними горючими речовинами в усіх лісових горючих матеріалах є целюлоза й лігнін. Деякі рослини мають у своєму складі також значну кількість смол та ефірних масел [33]. Для горіння целюлозовмісних матеріалів характерні дві основні стадії: стадія полум'яного горіння (гомогенне горіння) та стадія гетерогенного горіння карбонізованого залишку. Для початку стадії полум'яного горіння горючий матеріал має бути нагрітим до температури 200-300 °С. У процесі нагріву до цієї температури відбувається термодеструкція ЛГМ і з нього виділяються незв'язана та зв'язана вода, вуглекислий газ і невелика кількість горючих газів. Загалом етап попереднього прогріву матеріалу є ендотермічним.

Після досягнення певної температури (залежить від виду ЛГМ, швидкості нагріву й вологості) в газоподібних продуктах термодеструкції починають переважати горючі гази – починається процес полум'яного горіння. При цьому триває процес прогріву матеріалу всередину, що призводить до термодеструкції у внутрішніх шарах матеріалу. Після досягнення температури на поверхні матеріалу 290–300 °С вихід горючих продуктів термодеструкції є найбільшим і висота полум'я - максимальною. Вигорання більшості горючих матеріалів у стадії полум'яного горіння досягає 85–90 % за масою.

На поверхні матеріалу після завершення процесу термодеструкції утворюється шар вуглецю (карбонізований шар, коксовий шар, вугільний шар). На початковому етапі цей карбонізований шар горіти не може, оскільки весь кисень повітря вступає в реакцію в зоні полум'яного горіння. Температура вугілля на поверхні досягає 500–700 °С. Процес утворення карбонізованого шару просувається всередину матеріалу й після досягнення 2-2,5 см товщина цього шару перестає збільшуватися, оскільки настає рівність швидкості вигорання карбонізованого шару та швидкості просування процесу карбонізації вглиб горючого матеріалу. На цьому етапі процес горіння горючого матеріалу протікає за змішаним механізмом. Цей етап триває доти, поки не карбонізується весь горючий матеріал.

Після того, як повністю закінчився вихід газоподібних продуктів термодеструкції, горіння карбонізованого шару відбувається за гетерогенним механізмом. Швидкість горіння на цій стадії зменшується, однак висока температура на поверхні горючого матеріалу зберігається довго. Саме наявність цієї стадії горіння зумовлює високу «живучість» осередків прихованого горіння. В умовах лісової пожежі основну роль відіграє перша стадія, оскільки для неї є характерними виділення великих обсягів розігрітих газів та інтенсивне теплове випромінювання. В умовах лісових пожеж температура полум'я досягає 900-1000 °С. Це сприяє поширенню процесу горіння на нові площі.

На виникнення горіння та його поширення у значній мірі впливають геометричні параметри ЛГМ. Чим більше відношення площі поверхні ЛГМ до його маси (чи об'єму), тим легше ініціюється процес горіння і тим більшою є інтенсивність горіння [117]. Цей факт пояснює високу горючість сухих мохів,

лишайників, трави та хвої. Водночас горючість товстих гілок і стовбурів дерев є невеликою – у більшості випадків вони не горять в умовах лісової пожежі.

З хімічних чинників найважливіше значення має вологість ЛГМ. Вологі мохи, лишайники й зелена трава займаються важко, а в сухому стані є добрими провідниками горіння. Зелена хвоя, охвоєні гілки, зелене листя в запоні деревостою мають стабільну й високу вологість. Вони загораються тільки після підсушування вогнем низової пожежі. Висушена хвоя, сухі гілки й сухі стовбури дерев загораються значно легше [173]. Критичною вологістю для підстилки вважають 70 %; у випадку досягнення такого рівня горіння підстилки стає неможливим. Критичний поріг вологості для лишайників і мохів з уключеними в них частками опаду в більшості випадків не перевищує 35 %.

Ще одним хімічним чинником, що впливає на горючість ЛГМ, є зольність.

ЛГМ із високою зольністю є більш пожежостійкими.

Знання пірологічних властивостей ЛГМ є необхідною передумовою для ефективного гасіння лісових пожеж.

1.3 Виникнення й розвиток лісових пожеж

Особливості виникнення лісових пожеж, їх розвитку, характеру горіння ЛГМ в умовах реальної лісової пожежі доволі повно узагальнено в літературі про лісові пожежі [28; 34; 182].

Залежно від просторового розташування області горіння розрізняють три основні види лісових пожеж: низові, верхові та ґрунтові (підземні). Установлено, що лісова пожежа в переважній більшості випадків виникає як низова, яка лише в деяких випадках переходить у верхову або підземну. Найлегше загораються так звані провідники горіння (мохи, лишайники, суха трава, дрібний опад, суха підстилка й вітролом). У випадку горіння матеріалів з високою питомою поверхнею низова лісова пожежа поширюється як перебіжна. У випадку перебіжної пожежі горить надґрунтовий шар (суха трава, опале листя та хвоя). Якщо запас таких матеріалів є невеликим, тепла від їх згорання недостатньо, щоб запалити підстилку, підріст і підлісок.

У випадку великого запасу провідників горіння та глибокого висихання підстилки стає можливим перехід перебіжної низової лісової пожежі до стійкої. У випадку стійкої низової пожежі горіння поширюється углиб підстилки. При цьому переважає безполум'яне горіння, процес іде повільно, але виділяється велика кількість тепла, здатного викликати загорання пнів, вітролому, підросту та підліска. У випадку стійкої низової пожежі пошкоджуються корені й кора великих дерев.

Обираючи метод гасіння лісової пожежі, важливо враховувати швидкість її поширення. Серед зовнішніх чинників, що впливають на неї, визначальними є швидкість вітру й нахил поверхні ґрунту. Питання впливу швидкості вітру на характер розвитку лісових пожеж детально висвітлено в літературі [8; 27]

Швидкість поширення лісових пожеж може змінюватися в широких межах: наприклад, швидкість поширення фронту перебіжної низової пожежі за помірного вітру може становити 1–3 м/хв., а в разі сильного вітру досягає

значень порядку 10 м/хв. Відповідно до [93] низові пожежі зі швидкістю поширення до 1 м/хв. належать до слабких, 1–3 м/хв. – до пожеж середньої сили, понад 3 м/хв. – до сильних. У більшості випадків швидкість просування фронту стійкої низової пожежі не перевищує 0,5 м/хв. Водночас швидкість перебіжної низової пожежі може бути значно більшою.

Під час вибору тактики гасіння лісової пожежі треба взяти до уваги той факт, що в переважній більшості випадків без підігріву крон дерев за рахунок низової пожежі значне поширення вогню кронами є неможливим [15; 28; 34]. Останній факт вважають точно установленим для лісових пожеж на території України [174]. Тільки у випадку сильного вітру й суттєвого перекривання крон хвойних дерев можливі окремі випадки поширення вогню покровом лісу скачками, які тимчасово випереджають фронт низової стійкої пожежі [185].

Під час вибору тактики гасіння лісової пожежі також треба взяти до уваги, що у випадку виникнення верхової пожежі випромінювання від її факела підігріває ЛГМ, які знаходяться над поверхнею ґрунту, і тим самим прискорює просування вогню в нижньому ярусі лісу. Ще одним чинником збільшення швидкості просування низової пожежі є розліт іскор із крон дерев, що горять. Іскри викликають появу нових осередків горіння далеко за фронтом пожежі й тим самим сприяють попередньому прогріву крон до підходу основного фронту низової пожежі. Цей чинник є особливо важливим у збільшенні швидкості поширення пожежі за наявності сильного вітру.

Знання закономірностей поширення лісової пожежі є запорукою успішного її гасіння.

1.4 Методи й засоби гасіння лісових пожеж

Під *гасінням лісової пожежі* розуміють процес впливу сил і засобів, а також використання методів та вживання заходів для ліквідації лісової пожежі [126]. Згідно з останнім нормативним документом розрізняють дві основні тактичні операції під час гасіння лісової пожежі – *локалізацію пожежі* та її *ліквідацію*. Іноді ці операції деталізують, виділяючи:

- зупинку поширення крайки пожежі;
- локалізацію пожежі;
- догасіння осередку горіння, що залишився всередині осередку пожежі;
- окараулювання [30; 89].

Процес гасіння лісових пожеж є найбільш складним і трудомістким, порівняно з іншими видами ландшафтних пожеж, і успішність гасіння здебільшого залежить від особистого досвіду та професіоналізму того, хто керує гасінням лісової пожежі. Проблема гасіння лісових пожеж, незважаючи на значну увагу до неї, сьогодні є далекою від розв'язання. Значною мірою це зумовлено великими масштабами пожеж, а також різноманітністю умов їх виникнення й поширення.

Ліквідацію масових лісових пожеж часто ускладнюють труднодоступність районів гасіння й віддаленість їх від джерел водопостачання, нераціональність, а часом - і неможливість залучення автотранспорту для доставки води.

Основними методами гасіння лісових пожеж є такі:

- нахльостування або закидання ґрунтом крайки перебіжної низової лісової пожежі;
- гасіння водою або розчинами хімікатів;
- гасіння за допомогою створення загороджувальних смуг;
- відпал або зустрічний вогонь;
- гасіння із залученням авіації;
- штучне викликання опадів;
- використання газофазних, порошкових ВР і пін;
- гасіння з використанням вибухових речовин [201].

Метод гасіння обирають з урахуванням особливостей лісової пожежі. Одним із найважливіших критеріїв при цьому є інтенсивність пожежі. Пожежі високої інтенсивності зазвичай неможливо гасити так званими *активними методами*. Останні спрямовані на безпосереднє гасіння крайки пожежі. Для їх застосування необхідно підійти на близьку відстань до крайки пожежі, що часто неможливо зробити через високу інтенсивність теплового випромінювання в цій області. До активних методів належать: *нахльостування або закидання ґрунтом крайки низової лісової пожежі, гасіння водою або розчинами хімікатів, гасіння із залученням авіації*.

Для гасіння пожеж високої інтенсивності використовують *непрямі (пасивні) методи гасіння*: створення загороджувальних смуг, відпал. Застосовуючи такі методи гасіння, лінію зупинки вогню вибирають на деякій відстані від крайки пожежі. Для зупинення поширення пожежі використовують захисну смугу (протипожежний бар'єр), на якій є умови неможливості процесу горіння. Під протипожежним бар'єром розуміють ділянку території, яка перешкоджає поширенню й розвитку лісової пожежі. Відповідно до нормативного документа [126] розрізняють такі види протипожежних бар'єрів: мінералізовані смуги, протипожежні розриви, протипожежні заслони, пожежостійкі узлісся, протипожежні канали, ріки, озера, автомобільні шляхи. Деякі з них існують чи їх створюють заздалегідь, з метою пожежної профілактики лісових пожеж; інші споруджують у процесі гасіння лісової пожежі.

Для створення штучних протипожежних бар'єрів необхідно на деякій відстані від крайки лісової пожежі видалити рослинні горючі матеріали або перевести їх у негорючий стан. Для цього з допомогою землерийної техніки споруджують мінералізовані смуги шляхом прокладання каналів і засипання ґрунтом горючих матеріалів. Застосування непрямих методів пов'язане з відомою втратою від вогню значної лісової території, до якої належить уся площа захисної смуги, глибина якої під час сильних пожеж має становити сотні метрів. Крім того, вигорають площі лісу між захисною смугою та крайкою пожежі на момент початку створення захисної смуги. Глибина останніх ділянок лісу може становити сотні й навіть тисячі метрів.

1.4.1 Гасіння лісових пожеж нахльостуванням або закиданням ґрунтом крайки

Нахльостування – найпростіший спосіб гасіння перебіжної низової пожежі. Його застосовують у боротьбі з пожежами слабкої та середньої інтенсивності. При цьому зазвичай використовують підручні матеріали: пучки гілок завдовжки 1-2 м, невеликі деревця листяних порід, змочену водою тканину [174; 182]. Нахльостуванням можна погасити тільки крайку перебіжної пожежі, тобто за відсутності стадії гетерогенного горіння. Гасіння здійснюється внаслідок відриву полум'я від часток, що горять, і охолодження горючого матеріалу. Швидкість гасіння однією людиною крайки пожежі методом нахльостування становить ~300 м/час.

У випадку, якщо низова пожежа супроводжується наявністю стадії гетерогенного горіння, застосовують метод *закидання крайки пожежі ґрунтом*. Його можна здійснити вручну за допомогою штикових лопат. При цьому спочатку збивають полум'я; потім, зупинивши пожежу, знову обходять крайку й насипають на ній ґрунт завтовшки 6-8 см і завширшки 40-60 см. Один робітник може в такий спосіб зупинити низову пожежу на фронті 60-80 м за першу годину роботи. У подальшому продуктивність різко падає [93]. Такий спосіб гасіння можна застосовувати тільки на легких ґрунтах.

У насадженнях невеликої щільності, без густого підліска, для указаних цілей можна використовувати тракторний ґрунтомет. З його допомогою за одну годину роботи на піщаних і легких супіщаних ґрунтах можна засипати ґрунтом до 2 км крайки пожежі, одночасно створивши надійну мінералізовану смугу завширшки близько 1,5 м.

Отже, гасіння лісових пожеж нахльостуванням або закиданням ґрунтом крайки пожежі є найпростішими методами гасіння, які не вимагають залучення складної техніки. Швидкість гасіння методом нахльостування в чотири – п'ять разів перевищує швидкість гасіння закиданням крайки пожежі ґрунтом, якщо використовують тільки ручну працю. Гасіння методом нахльостування можна застосовувати на будь-яких ґрунтах, на відміну від методу закидання ґрунтом, до якого вдаються тільки на легких ґрунтах. Одночасно гасіння методом нахльостування можна використовувати лише за відсутності стадії гетерогенного горіння. Застосування тракторних ґрунтометів, у випадку застосування методу закидання ґрунтом, обмежене можливостями роботи трактора в лісистій місцевості.

1.4.2 Гасіння лісових пожеж водою або водними розчинами хімікатів

У гасінні більшості пожеж вода залишається основним вогнегасним засобом [188]. Її використання значно перевищує використання всіх інших засобів пожежогасіння разом узятих. Це зумовлено наявністю у води унікального комплексу фізико-хімічних властивостей [177]. Вона має високе значення питомої теплоємності й аномально високе значення теплоти випаровування. Це робить воду речовиною, яка має надзвичайно високу охолоджувальну дію. Крім того, вода є доступною, дешевою та екологічно безпечною речовиною.

Водночас вода не позбавлена деяких негативних властивостей, які

ускладнюють її використання з метою пожежогасіння. Мала в'язкість води призводить до швидкого її стікання з вертикальних і похилих поверхонь. Високий поверхневий натяг погіршує змочувальну здатність води. Останні два чинники суттєво знижують коефіцієнт використання води.

Ще одним недоліком води є погіршення її охолоджувальної дії стосовно твердих поверхонь, нагрітих до температур понад 165–170 °С. За цих температур між краплями води та твердою поверхнею утворюється парова плівка, яка ускладнює теплообмін. Феномен відриву краплі від нагрітої поверхні отримав назву ефекту Лейденфроста [191].

Під час гасіння твердих горючих матеріалів, до яких належать і ЛГМ, коефіцієнт використання води зазвичай варіює від 0,01 до 0,1 (для компактних струменів) і від 0,2 до 0,5 (для тонкорозпиленних струменів) [41; 192; 197].

Відносно легко водою гасяться низові лісові пожежі малої інтенсивності. Зазвичай для цього використовують різного виду ранцеві лісові вогнегасники. Для гасіння лісових пожеж середньої й високої інтенсивності необхідно застосовувати ручні або лафетні стволи. Їх використання під час гасіння лісових пожеж має деякі особливості. Основні з них буде перераховано нижче. Для лісових горючих матеріалів є характерною наявність великої кількості труднодоступних поверхонь горіння, що призводить до необхідності забезпечувати подачу води з різних боків, а це, в умовах реальних пожеж, не завжди є можливим. Деякі ЛГМ погано змочуються водою, що спричиняє стікання з них більшої частини води. Під час гасіння лісових пожеж високої інтенсивності зазвичай неможливо забезпечити безпечну подачу води на необхідну відстань через високу інтенсивність теплового випромінювання поблизу фронту пожежі.

Практика гасіння лісових пожеж дозволяє сформулювати рекомендації щодо гасіння лісових пожеж водою:

- під час гасіння водою перебіжних низових пожеж доцільно використовувати розпилені струмені, якими обробляють крайку пожежі;
- для гасіння стійких низових пожеж, коли горять підстилка, вітролом, пні, необхідно використовувати компактні струмені, які руйнують структуру матеріалів, що горять, перемішують їх із ґрунтом, змітають на вигорілу поверхню;
- під час гасіння водою сильних пожеж спочатку необхідно здалеку сильним компактным струменем збити полум'я, а потім, наблизившись до фронту пожежі, ретельно придушити горіння на всіх поверхнях, що горять [93].

Вибір води як вогнегасного засобу для гасіння лісових пожеж часто зумовлений наявністю поблизу джерела води (рік, озер). Витрати води на гасіння лісових пожеж варіюють в широкому інтервалі. Для гасіння перебіжної низової пожежі на один кілометр її крайки витрачають кілька сотень літрів води. Для низових пожеж середньої інтенсивності затрати води становлять до кількох десятків тонн на 1 кілометр фронту пожежі. Для гасіння низових пожеж високої інтенсивності затрати води можуть перевищувати тисячі тонн на 1 км.

Такі великі затрати води значною мірою зумовлені втратами вогнегасної речовини внаслідок стікання води з лісових горючих матеріалів. За оцінками

авторів [121; 190], коефіцієнт використання води під час гасіння лісових пожеж (ТГМ) не перевищує кількох відсотків.

У роботі [54] розглянуто як перспективне гасіння пожеж із застосуванням двофазних середовищ «вода – водяна пара». Пара має добру проникну властивість і дозволяє гасити пожежі в труднодоступних місцях. Представлено конструкторські розробки для створення водяної пари: парогенераторну установку з електричним нагрівальним елементом, який працює від генератора, встановленого на засоби пересування, і автономну парогенераторну установку з нагрівальним елементом у вигляді газового пальника. Розроблені пристрої дозволяють зменшити витрати води в кілька разів, покращити умови праці пожежних і збільшити швидкість гасіння порівняно із традиційними методами. Водночас на практиці гасіння лісових пожеж такими установками є малоефективним; вони не можуть гасити низові пожежі високої інтенсивності, а також мають обмежений радіус застосування.

Одним зі шляхів удосконалення рідиннофазних вогнегасних засобів є використання водних розчинів різних речовин, що дозволяє зберегти основні позитивні властивості води й покращити деякі її характеристики як вогнегасного засобу. Одним із недоліків води як вогнегасного засобу є її погана змочувальна здатність стосовно гідрофобних матеріалів. Це призводить до погіршення контакту води з поверхнями твердих речовин і, відповідно, до швидкого стікання води з них. Ця властивість води зумовлена високим значенням її коефіцієнта поверхневого натягу. Для його зниження застосовують поверхнево-активні речовини (ПАВ) [175; 97]. Як ПАР у пожежній справі використовують розчини піноутворювачів із концентраціями 0,2–2 % (інколи – до 5 %). У такому випадку говорять про застосування змочувачів.

Кількісні оцінки підвищення ефективності використання добавок-змочувачів до води з метою пожежогасіння суттєво різняться. Найоптимістичніші оцінки в більшості випадків не знаходять незалежних підтверджень. Так, не було підтверджено заявлене в роботі [96] підвищення ефективності використання води за рахунок застосування змочувача «Sikl-ex» у п'ять разів під час гасіння лісових пожеж. Більш об'єктивними оцінками підвищення ефективності використання води з добавками змочувачів можна визнати збільшення коефіцієнта використання ВР у два – три рази.

Для зменшення втрат за рахунок стікання води використовують різноманітні *загусники* – речовини, додавання яких до води збільшує в'язкість розчинів, що зумовлює зменшення швидкості стікання розчинів. Як загусники пропонують використовувати велику кількість органічних і неорганічних речовин. З органічних речовин набули поширення водорозчинні полімери: поліакрилова кислота, поліакриламід, полівінілпіролідон, полівініловий спирт, ефіри целюлози. З неорганічних загусників використовують розчини полісилікатів натрію й калію та колоїдні сорти глини (бентоніт) [192].

Застосування загусників підвищило вогнегасну здатність води в півтора – два рази [175; 97; 96].

Суттєвим прогресом у використанні загусників стала розробка *тиксотропних сумішей*. Під тиксотропією розуміють здатність структурованої

колоїдної системи відновлювати в часі свою структуру після її механічного руйнування [177; 37]. Відновлюючи структуру, такі системи втрачають їхню текучість. Прикладами структурованих колоїдних систем є гелі [192]. Для цілей пожежогасіння було запропоновано використовувати вогнегасну тиксотропну систему під торговою назвою «Firesorb» [104; 193]. Її основою є органічний абсорбент, який після додавання води набухає й утворює в'язкий гелеподібний розчин, що має тиксотропні властивості. «Firesorb» поставляють у вигляді концентрату, що містить 28 % дисперсії поліакрилату акрилату натрію, 43 % води, 23 % біорозкладної оливи та 6 % ПАР [194].

У випадку нанесення засобу «Firesorb» на ЛГМ він швидко втрачає текучість. Це забезпечує низькі втрати за рахунок стікання. Оскільки основним компонентом такої суміші є вода, вона забезпечує вогнезахист ЛГМ до моменту її повного випаровування. Суміш «Firesorb» має деякі недоліки, які перешкоджають її широкому застосуванню для гасіння лісових пожеж. Одним з них є використання органічних компонентів. Після випаровування всієї води органічна частина суміші, що залишилася, може горіти. Аналізована суміш має низьку проникну здатність – з її допомогою неможливо здійснити «проливання». Ще більш суттєвим недоліком суміші «Firesorb», у випадку її використання для гасіння лісових пожеж є її висока вартість.

Близький до розглянутого вище засобу «Firesorb» ефект проявляють вогнегасні суміші, в яких використовують швидкотвердіючі піни та вспучувальні суміші [128]. Швидкотвердіюча піна являє собою повітряно-механічну піну низької кратності, до складу якої введено карбамідоформальдегідний полімер. Основним компонентом таких систем (понад 90 %) є вода. Для ствердіння полімеру у процесі змішування вихідних компонентів додають затверджувач – сірчану кислоту. Після цього протягом двох – трьох секунд утворену рідку композицію спінюють і подають на захищену поверхню. Через п'ять – десять секунд після додавання кислоти відбувається твердіння піни.

Тверді піни виявляють добрий ізолювальний і теплозахисний ефект (низька теплопровідність). Їх застосовують для вогнезахисту під час гасіння пожежі (оперативний вогнезахист), а також наносять заздалегідь. Під дією теплового випромінювання тверді піни руйнуються тільки після повного випаровування з них вологи й подальшого займання. Установлено, що час вогнезахисної дії таких пін в основному зумовлений часом випаровування з них вологи. Поширення такі вогнегасні піни не набули через складність технології їх отримання. Є суттєві труднощі в подачі піни. Крім того, такі піноутворювальні суміші містять токсичні компоненти.

Значної частини недоліків, що мають раніше розроблені швидкотвердіючі піни, позбавлені швидкотвердіючі піни на основі наночастинок кремнезему [3; 2]. Вони містять невеликі кількості малотоксичних речовин, однак технологія їх отримання є доволі складною й вимагає розробки спеціальної техніки для їх генерації. Зараз цей засіб гасіння лісових пожеж знаходиться на стадії впровадження.

Зарекомендувало себе з позитивного боку застосування водних розчинів

хімічних речовин для створення опорних хімічних смуг. Так, для гасіння лісових пожеж застосовують багато видів вогнезахисних засобів довготривалої дії, такі як ОС-5, ОС-5У, ОС-А1 та ін. Наприклад у ОС-5 оптимальна концентрація засобу в розчині – 13 %. Розчин має як вогнегасні, так і вогнезахисні властивості; добре гасить полум'я у фазі горіння та тління. Оброблені цим розчином горючі рослинні матеріали не горять протягом декількох діб. Дозування розчину на опорних хімічних полосах здійснюється у залежності від товщини наземних горючих матеріалів, – від 0,5 до 1,5 літра на квадратний метр.

Хімічний склад «Метафосил» розроблений НДІ фізикохімічних проблем. «Метафосил» призначений для прокладання профілактичних протипожежних довгострокових загороджувальних смуг та гасіння лісових пожеж, у тому числі у забруднених радіонуклідами зонах. За результатами проведених натурних випробувань було встановлено, що загороджувальні смуги, створені за допомогою 10%-го водного робочого розчину засобу при нанесенні його на горючий матеріал з витратою 1,0–2,5 кг/м², здатні зберігати вогнезахисні властивості до 45 діб [50].

Вогнезахисний засіб, розроблений УкрНДІЦЗ, «Антипіреново-антисептична просочувальна композиція для деревини» [13] пропонують використовувати для створення загороджувальної смуги для локалізації пожежі. Вказана суміш була перевірена на імітованій лісовій підстилці з шириною загороджувальної смуги 0,5 м, створена з робочого розчину засобу з витратою у 500 г/м². Авторами було доведено, що така смуга здатна перешкоджати поширенню полум'я лісовою підстилкою. Але під час перевірки вогнезахисних властивостей засобу та впливу розведення робочого розчину водою на ефективність смуг у локалізації низових лісових пожеж слабкої інтенсивності краще зарекомендували себе смуги, створені нанесенням початкових робочих розчинів «Антипіреново-антисептичної просочувальної композиції для деревини», а за показником максимальної глибини входження полум'я в загороджувальну смугу не забезпечив надійного захисту та прогорів майже на половину [50].

Ще одним способом підвищення вогнегасної ефективності води є додавання до неї неорганічних сумішей [175; 95]. Розчини неорганічних сумішей можуть діяти комплексно. По-перше, вони можуть бути антипіренами, які насичують горючий матеріал і ускладнюють його горіння. По-друге, водні розчини деяких неорганічних речовин можуть інгібувати полум'яну фазу. По-третє, водні розчини після випаровування з них води часто утворюють на поверхнях, що горять, тверді плівки, які мають ізолювальні й теплозахисні властивості.

Установлено [18; 127; 87], що під час гасіння целюлозовмісних горючих матеріалів (деревина) добре зарекомендували себе водні розчини антипіренів: хлоридів амонію, натрію, калію, магнію й кальцію; гідрофосфатів амонію (NH₄H₂PO₄, (NH₄)₂HPO₄); сульфатів амонію; фосфорної кислоти; деяких боратів та інших речовин. Особливо високі вогнегасні й вогнезахисні властивості мають системи, які містять сполуки азоту й фосфору: уведення у воду фосфату

амонію зумовлює підвищення вогнегасної здатності води в 2,06 разу для придушення полум'яного горіння (K_1) і у три рази – для повного придушення горіння (K_2). Високоєфективною добавкою до води також є хлорид магнію. Для нього значення коефіцієнтів підвищення вогнегасної ефективності становлять відповідно $K_1 = 2,13$ і $K_2 = 3,1$. Уважають, що для цих речовин основний внесок у підвищенні вогнегасних властивостей води – змінювати механізм термодеструкції целюлозних матеріалів [200].

Найбільші можливості покращення вогнегасних характеристик води дає застосування композицій різних добавок, які роблять специфічний внесок у зміну фізико-хімічних характеристик води, що може підвищити її вогнегасний ефект. Суттєво підвищує вогнегасну ефективність води одночасне додавання до неї змочувачів і загусників. Така комбінація добавок покращує змочувальну та проникну здатність водних розчинів (за рахунок додавання змочувача) та зменшує втрати ВР за рахунок стікання (вплив загусника). Ще більшу ефективність пожежогасіння проявляють суміші, які містять, крім змочувача й загусника, антипірени. Антипірени є особливо ефективними під час гасіння матеріалів, схильних до тління. Їх наявність у вогнегасній композиції суттєво впливає на повторне займання, що особливо актуально під час гасіння великих пожеж.

У циклі робіт білоруських дослідників представлено результати вивчення багатокомпонентних рідинних хімічних сумішей, які містять у своєму складі як розчинні у воді речовини, так і дрібнодисперсні тверді добавки [19–22]. Для запропонованих рідинних хімічних сумішей встановлено збільшення показника вогнегасної здатності, порівняно з водою, у два – три рази. Особливо відзначають перевагу таких сумішей під час гасіння матеріалів, що тліють.

У різний час [60; 99; 100] спеціально для гасіння лісових пожеж пропонували водні розчини фосфорної кислоти, хлориду кальцію, хлориду магнію, сульфату амонію, амофосу (суміш гідро- й дигідрофосфату амонію), а також водні емульсії хладонів, піни й порошкові вогнегасні засоби. Усі ці ВР через високу вартість не знайшли широкого застосування.

Не набули поширення для гасіння лісових пожеж і піни, хоча їх неодноразово пропонували для цих цілей [184; 195; 196]. Ще менш перспективним видається застосування методів газового пожежогасіння стосовно лісових пожеж.

Загалом доходимо висновку, що додавання до води різноманітних речовин дозволяє значно підвищити її вогнегасну здатність. Чисельно цей ефект може досягати значення 4–5. Водночас уведенням різноманітних добавок не вдається повною мірою усунути такий недолік води, як її втрати за рахунок стікання з похилих і вертикальних поверхонь.

Незважаючи на помітне збільшення вогнегасної ефективності води при модифікації її за допомогою різних речовин, такі вогнегасні суміші не набули значного поширення у практиці гасіння лісових пожеж. Це зумовлено економічними чинниками – суттєво збільшується вартість таких вогнегасних речовин порівняно з водою. З урахуванням того, що на гасіння великих лісових пожеж витрачають величезну кількість вогнегасних речовин, застосування

таких розчинів спричиняє різке збільшення витрат на гасіння лісових пожеж.

1.4.3 Гасіння лісових пожеж шляхом створення протипожежних бар'єрів

Протипожежні бар'єри для боротьби з лісовими пожежами створюють як перепону на шляху поширення фронту горіння. Для створення такого бар'єра необхідно видалити з усієї площі смуги лісові горючі матеріали або перевести їх у негорючий стан. У випадку, якщо таку смугу створюють повним видаленням лісових горючих матеріалів до мінерального ґрунту, захисну смугу називають *мінералізованою*. Якщо смугу створюють шляхом випалювання лісових горючих матеріалів (відпал), то її називають *випаленою захисною смугою* [92]. Метод гасіння лісових пожеж шляхом створення протипожежних бар'єрів відноситься до пасивних методів гасіння. Інколи цей метод вважають *методом локалізації пожежі*, але, в більшості випадків, він може забезпечити повне припинення лісової пожежі. Завдяки цьому його можна вважати *методом ліквідації пожежі* [115].

Протипожежні бар'єри споруджують у тих випадках, коли через велику інтенсивність теплового випромінювання поблизу крайки пожежі неможливо застосувати прямі методи гасіння. Відстань, на якій починається облаштування протипожежного бар'єра, задають з таким розрахунком, щоб до закінчення його створення персонал знаходився на безпечному віддаленні від фронту лісової пожежі. Ця відстань, своєю чергою, зумовлена швидкістю поширення лісової пожежі. Для низових пожеж протипожежний бар'єр зазвичай починають створювати на відстані від кількох десятків метрів до 100 м. У випадку верхових пожеж бар'єр доводиться починати створювати на відстані кількох кілометрів від фронту лісової пожежі.

Особливе значення має вибір ширини протипожежного бар'єра. За відсутності вітру вона має бути не меншою, ніж подвоєна висота полум'я [93]. Для створення великих за площею смуг використовують різноманітну землерийну техніку: бульдозери, трактори з плугами, смугопрокладачами, ґрунтометами й канавокопачами, а також спеціалізовану лісопожежну техніку. Застосування важкої техніки викликає значні труднощі під час роботи на кам'янистих ґрунтах, у гірській місцевості, за наявності ярів, в умовах високої щільності стояння великих дерев. При сильному вітрі необхідна ширина захисної смуги збільшується настільки, що за допомогою ґрунтообробних знарядь її прокласти важко.

Для гасіння низових пожеж високої інтенсивності найефективнішим є спосіб створення випаленої захисної смуги – *відпал*. *Відпалом* називають завчасне пускання вогню надґрунтовим покривом назустріч низовій пожежі, з метою створення на її шляху смуги, на якій знищено всі лісові горючі матеріали. Ширина випаленої захисної смуги під час гасіння низових пожеж становить 10–20 м [15; 93; 182].

Відпал здійснюють від природних рубежів – доріг, рік, струмків, стежок. У разі їх відсутності створюють опорну смугу завширшки 0,3–0,5 м за допомогою ручного інструменту, землерийної техніки або шляхом обробки

хімічними речовинами. Обираючи рубежі для відпалу, необхідно намагатися виключити площі лісу, на яких можливе виникнення верхової лісової пожежі: ділянки з густим підростом хвойних порід, з молодняком і захаращені ділянки лісу [178]. Якщо цього зробити неможливо, необхідно такий горючий матеріал видалити з усієї смуги відпала. Недоліком використання відпалу є можливість перекидання вогню через опорну смугу при швидкості вітру понад 2–3 м/с. Для уникнення цього можна збільшити ширину опорної смуги або дочекатися вечірніх годин, коли швидкість вітру зазвичай зменшується.

1.4.4 Інші методи гасіння лісових пожеж

У багатьох країнах світу авіацію тривалий час застосовують для гасіння лісових пожеж [188]. Характер її застосування доволі широкий. Це оперативне виявлення осередків лісових пожеж, швидка доставка до осередків займання лісових пожежних, пожежної техніки й засобів пожежогасіння, а також безпосередня обробка осередків горіння вогнегасними речовинами [161].

За допомогою авіаційних методів вирішують такі завдання:

- гасіння крайки горіння на окремих ділянках пожеж;
- затримка поширення пожежі;
- надання допомоги пожежним у гасінні осередків сильного горіння;
- попередження переходу низової пожежі у верхову;
- надання вогнестійкості суміжним із пожежею насадженням;
- допомога наземним силам у підвищенні надійності створюваних протипожежних бар'єрів;
- гасіння точкових лісових пожеж у недоступній гірській місцевості

[133].

Особлива перевага авіаційних методів боротьби з лісовими пожежами, порівняно з іншими методами, полягає в ранньому виявленні осередків займання в лісових масивах і швидкій доставці в ці місця пожежних. Це часто дозволяє не допустити значного поширення вогню на великі площі лісу й погасити пожежу в початковій стадії. Особливо ефективним є використання авіації для гасіння лісових пожеж у віддалених і важкодоступних районах, у яких за відсутності застосування авіації наявна велика ймовірність поширення пожежі на великі площі. У цій роботі основну увагу буде приділено авіаційним засобам подачі вогнегасних речовин в осередок пожежі.

Тут авіація має перевагу перед традиційними засобами пожежогасіння. Застосування літаків і гвинтокрилів дозволяє вдаватися до активних методів гасіння лісових пожеж високої інтенсивності, тобто подавати вогнегасну речовину безпосередньо на крайку пожежі. Цього зазвичай неможливо зробити у випадку використання інших засобів пожежогасіння через високу інтенсивність теплового випромінювання поблизу крайки пожежі.

Для скидання води в осередок лісової пожежі використовують переобладнані або спеціально збудовані для цих цілей літаки і гвинтокрили. Деякі з них придатні тільки для земного базування, а інші можуть здійснювати

посадку й робити забір води самостійно з водойм. У випадку наявності поблизу осередку пожежі великих водойм гідроавіація має важливу перевагу перед авіацією наземного базування [119; 184].

Для скидання води із внутрішніх баків літаків використовують різноманітні водозливні пристрої. У випадку використання гвинтокрилів можуть використовувати й зовнішні ємкості для води, обладнані системами водоскидання [16]. Розпилення води з авіаційних засобів пожежогасіння під час гасіння лісових пожеж високої інтенсивності не дає позитивного результату, оскільки, внаслідок інтенсивних конвекційних потоків, краплі води практично не дістаються крон дерев і поверхні землі. Для досягнення позитивного результату необхідне залпове скидання великої кількості води. У такому випадку з „водяного ядра” частина рідини досягає поверхонь, що горять.

Досвід гасіння пожеж та експериментальні дослідження показують, що лише незначна частина води досягає поверхонь, що горять [75; 199; 189]. Частина води випаровується, частину відносять конвекційні потоки. Втрати води тим більші, чим більша висота її скидання та швидкість авіаційного засобу. Зниження висоти скидання води обмежене вимогами щодо безпечності польотів авіації в умовах лісової пожежі.

Водночас вода, яка досягла крон дерев, тільки частково бере участь в охолодженні твердих поверхонь лісових горючих матеріалів. Значна частина води стікає кронами дерев на лісову підстилку в районах, що знаходяться під краєм крон дерев, а поблизу стовбура дерева підстилка може залишатися сухою [63]. Отже, зрошування лісової поверхні відбувається нерівномірно – на деякі поверхні вода не потрапляє. Крім того, у випадку використання як ВР води деякі ЛГМ залишаються не змоченими нею, у зв'язку з їхньою гідрофобністю. Отже, після потрапляння води, скинутої з авіаційних засобів пожежогасіння, на частині обробленої водою площі лісу будуть поверхні, на яких не залишилось води. На цих поверхнях процес горіння може тривати.

Через деякий час після випаровування води з погашених поверхонь ЛГМ відбуватиметься їх поступовий розігрів від тепла непогашених ділянок, що призведе до повторного займання. У такому випадку горіння відновиться. Цей недолік гасіння лісових пожеж шляхом скидання води за допомогою авіаційних засобів призводить до того, що використання тільки такого методу не дозволяє погасити велику лісову пожежу. Водночас його можна використовувати як допоміжний метод під час гасіння лісової пожежі за допомогою наземних засобів пожежогасіння. Після обробки водою з авіаційних засобів ділянки лісу інтенсивність горіння на ній суттєво зменшується, що дозволяє наблизитися до крайки пожежі наземним пожежним і погасити поверхні, які продовжують горіти. Крім того, обробка ділянок лісової поверхні за допомогою авіаційних засобів пожежогасіння уповільнює просування фронту лісової пожежі, що може бути необхідним для створення загороджувальної смуги.

Суттєво збільшити можливості авіаційних засобів пожежогасіння може використання води з модифікувальними добавками. Додавання до води змочувачів і загусників помітно збільшує коефіцієнт використання води. Загущені й гелеподібні розчини добре утримуються на кронах дерев, а розчини

ПАР добре змочують гідрофобні ЛГМ. Додавання до води інгібіторів горіння в кілька разів збільшує її вогнегасну здатність і, що особливо важливо, попереджає повторне займання. Спеціально для авіаційних методів гасіння лісових пожеж розроблено вогнегасні суміші ВС-А1 і ВС-А2, однак використання таких розчинів значно збільшує вартість ВР, тому з економічних міркувань їх застосування є обмеженим.

Ще одним шляхом підвищення ефективності використання авіаційних засобів гасіння лісових пожеж є розробка методів, які забезпечують менші втрати ВР під час доставки в зону пожежі й рівномірне нанесення ВР на ЛГМ. Скидання ВР зверху забезпечує добре нанесення їх на верхні не екрановані й частково – на бокові поверхні. Нижні поверхні залишаються практично не обробленими ВР. Одним зі шляхів вирішення цих проблем є використання авіаційних боеприпасів. Вони отримали назву «АЗП» (авіаційний засіб пожежогасіння) [56; 148; 182]. АЗП – це своєрідна „водяна бомба”, яка складається з безосколкової оболонки, заповненої водою, і невеликої кількості вибухової речовини, що знаходиться в центральній частині. Підриг боеприпасів на заданій висоті забезпечує рівномірне направлене розпилювання води. Серед характеристик таких авіаційних засобів пожежогасіння відзначають, що виріб АЗП-500 (масою 500 кг) покриває водою площу 1000 м². Конкретних результатів дії на лісовий пожежі цього засобу пожежогасіння не повідомляють; також не згадують про їх практичне застосування.

Перевага АЗП перед звичайним скиданням води полягає в 100% доставці ВР у задане місце й рівномірне його розпилювання, але застосування на практиці таких засобів є досить сумнівним [121].

Загалом відзначаємо, що авіаційні методи гасіння пожеж мають високу оперативність, але використання тільки їх без залучення наземних сил у більшості випадків не забезпечує гасіння лісової пожежі. Крім того, собівартість гасіння пожежі з використанням авіаційних методів у три – чотири рази вища порівняно із традиційними наземними методами [25].

Для гасіння лісових пожеж запропоновано різні варіанти використання вибухових речовин, передусім для створення протипожежних бар'єрів та опорних смуг для відпала. Також запропоновано різні варіанти використання вибухових речовин для розпилювання ВР в осередку пожежі.

Для прокладки мінералізованих смуг вибухові матеріали використовують переважно у віддалених місцях, куди неможливо швидко доставити ґрунтообробну техніку [168]. Є два основні способи застосування вибухових речовин для гасіння лісових пожеж: *шпуровий* і *накладний*. *Шпуровий спосіб* використовують на важких і сильно задернованих ґрунтах – у вигляді зарядів, закладених у спеціально підготовлені свердловини (шпури). *Накладний метод гасіння лісових пожеж* застосовують, коли шар горючих матеріалів на лісовий поверхні невеликий у вигляді зарядів, покладених на поверхні землі.

Шпури роблять завглибшки до 70 см на відстані від двох до п'яти метрів один від одного. У кожен шпур закладають два – три патрони амоніту по 200г кожен. Відстань між шпурами й масу вибухових речовин підбирають з таким

розрахунком, щоб після вибуху воронки дотикалися краями й було отримано суцільну смугу, яка вимагає лише незначної правки вручну. Прокладка мінералізованих смуг шпуровим способом трудомістка – група з чотирьох підрильників за годину може прокласти не більше 300 м смуги.

Більш продуктивним є прокладання мінералізованих смуг за допомогою шнурових зарядів вибухівки. Патрони амоніта поміщають у пластикову трубку й залишають відрізки шнура по 10 м кожен. Кінці шнура зв'язують так, що утворюється лінія завдовжки до 200 м, яку підривають одночасно за допомогою одного капсуля-детонатора. Продуктивність праці при шнуровому способі підриву у вісім – десять разів більша, ніж при шпуровому способі, однак накладні заряди забезпечують створення тільки вузьких смуг і за умови, що поверхневий шар горючого матеріалу є невеликим.

Ще одним недоліком вибухових способів прокладання загороджувальних смуг є велика потреба у вибухівці. На облаштування 1 км вузької загороджувальної смуги потрібно не менше 0,5 т вибухових речовин. Крім того, вибухові роботи через їхню небезпеку суворо регламентовані. До них допускають тільки спеціально навчений персонал.

Сьогодні працюють над удосконаленням вибухових методів [40; 118]. У роботах А. М. Гришина розроблено концепцію боротьби з лісовими пожежами шляхом малих енергетичних впливів. Найбільше цій концепції відповідає використання вибухових ударних хвиль. У роботах Г. В. Рєви [132] описано розвиток вибухового способу гасіння лісових пожеж і запропоновано використовувати для направлення ударних хвиль спеціальні відбивачі.

На думку авторів роботи [105], застосування зарядів на основі паливоповітряних сумішей дозволяє досягти якісно вищої ефективності під час гасіння лісових пожеж. Суть запропонованого методу полягає у видаленні зі стовбурів дерев дрібних гілочок, хвої та листя під дією на них ударної хвилі. Це, своєю чергою, приводить до того, що дерева, позбавлені гілок, хвої чи листя, стають нездатними горіти, а отже, і поширювати верхову пожежу. Ділянки з видаленими гілками мають чергуватися з мінералізованими смугами для попередження поширення низової лісової пожежі. Для цього один чи кілька шлангових зарядів пропонують підривати на земній поверхні з метою створення мінералізованої смуги. Локалізацію верхової пожежі забезпечує вибух зарядів, розташованих поверх крон дерев.

Необхідно відзначити, що використання ударних хвиль для припинення горіння ЛГМ за рахунок зриву полум'я не дає тривалого ефекту. Через невеликий проміжок часу, якщо не здійснити охолодження ЛГМ, горіння відновлюється. Для надійного припинення горіння необхідно одночасно зі зривом полум'я охолодити ЛГМ. Такий ефект забезпечує використання вибухових речовин для розпилювання ВР в осередку пожежі. Сьогодні найперспективнішою розробкою для гасіння лісових пожеж видається вибуховий пристрій, що спрацьовує на певній висоті й забезпечує направлене розпилення ВР на поверхні ЛГМ, що горять [56]. Вибуховий метод розпилювання за ефективністю перевищує всі відомі розпилювальні конструкції. Він не тільки забезпечує тонкого розпилювання, але й забезпечує,

за рахунок мультिवихрової структури, потрапляння ВР на зворотні боки оброблюваних поверхонь.

У наш час пропонують використовувати різні види вогнегасних боєприпасів: бомби, які скидають із літака, бомби, які доставляють до осередку пожежі на підвісці гвинтокрила, багатостовбурні установки як повітряного, так і наземного базування. У таких боєприпасах апробовано як ВР вогнегасні порошки й воду. Також розглядають варіанти застосування різноманітних водних композицій, що містять ПАР, загусники, антипірени.

Перевагою використання вибухових технологій, порівняно з іншими методами гасіння лісових пожеж, є можливість використовувати їх для прямого гасіння (активний метод), відсутність втрат ВР під час доставки в осередок пожежі, висока ефективність розподілу ВР на поверхнях, що горять, і тих, які захищають. Недоліками вибухових методів гасіння є їх потенційна небезпека для людей, висока вартість технічних засобів, що забезпечують доставку ВР (авіація, артилерійські системи). Ці недоліки, вочевидь, гальмують упровадження вибухових технологій у практику гасіння лісових пожеж. [35; 36]

Гасіння лісових пожеж шляхом ініціювання опадів ґрунтується на здатності деяких речовин так впливати на переохоложені хмари, що з часом від цього впливу з оброблених хмар випадають опади. Найкращий ефект ініціювання штучних опадів дає йодисте срібло. Крім нього, суттєвим є ефект йодистого свинцю, сірчистої міді та твердої вуглекислоти. [24] На сьогодні виявлено й фізичні впливи [98].

Для ініціювання опадів за допомогою хімічних речовин вони мають бути введені в хмару в дрібнодисперсному вигляді. Для генерації відповідних аерозолів використовують піротехнічні суміші, які доставляють у необхідну область простору за допомогою авіації, артилерійських або ракетних систем [134]. Так, модифікована реактивна система „Град” забезпечує дальність застосування до 20 км. За допомогою залпу такої системи можна обробити площу 1500 м² земної поверхні.

Серед нових робіт у цьому напрямку відзначаємо огляд за способами штучного ініціювання опадів для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, зокрема й аналізу можливостей цього методу для гасіння лісових пожеж [94]. В останній роботі запропоновано новий метод ініціювання опадів шляхом електрофізичного впливу на атмосферу. Цей метод не передбачає використання авіаційних та артилерійських або ракетних систем, що може значно покращити економічні параметри ініціювання опадів.

Спільним недоліком усіх методів гасіння лісових пожеж шляхом штучного ініціювання опадів є його сильна залежність від метеоумов, а також неможливість у більшості випадків погасити сильну пожежу.

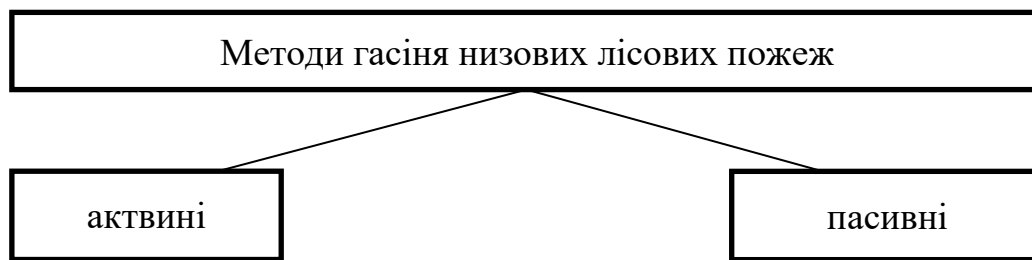
Через високу вартість і низьку охолоджувальну здатність не набули поширення для гасіння лісових пожеж порошкові вогнегасні засоби, хоча дослідження в цій галузі тривають [184].

Не використовують активно для гасіння лісових пожеж і піни, хоча їх неодноразово пропонували для цих цілей [184; 195; 196]. Піни з високою стійкістю дають задовільний результат під час гасіння низових пожеж низької

та середньої інтенсивності, однак і в такому випадку можливий перехід вогню під шаром піни. У випадку пожеж високої інтенсивності піни руйнуються під дією інтенсивного теплового випромінювання протягом кількох хвилин.

Ще менш перспективним виглядає застосування методів газового пожежогасіння до лісових пожеж, хоча такі пропозиції робили [168]. Створити достатню концентрацію вогнегасної газоподібної речовини на тривалий період часу практично неможливо через інтенсивні конвекційні потоки в області горіння й наявності вітру.

На рис. 1.1 наведено основні методи гасіння низових лісових пожеж.



- нахльостування кромки пожежі
- засипка
- вода
- вода з добавками
- використання газофазних, порошкових ВР та пін
- використання важкої техніки
- відпал
- метод ініціювання опадів
- використання авіації
- вибухові методи

Швидкість і продуктивність деяких методів гасіння пожеж наведено в таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 – Швидкість гасіння крайки пожежі одним робітником, м·хв.¹

¹ [130]

Спосіб гасіння	Тип рослинного горючого матеріалу			
	Зеленопотужний	Лишайниковий	Трав'яний	Багульниковий
Водою з використанням ранцевих лісових вогнегасників РЛО-6, РЛО-М, ОР	3,4	4,5	6,2	2,3
Розчинами хімікатів із використанням РЛО-6, РЛО-М, ОР	4,2	5,2	7,5	3,1

Засипання ґрунтом	0,3	0,8	1,5	
Створення загороджувальної смуги за допомогою ВВ – ПШ-13-20, ЭШ-1П	4,0	5,2	6,0	2,5
Відпал захаращених ділянок		1,2	2,5	
Створення опорної смуги завширшки 0,75 м за допомогою шанцевого знаряддя	0,8	1,2	1,5	0,5

Таблиця 1.2–Швидкість гасіння крайки пожежі різними засобами пожежогасіння (м·год.⁻¹) в залежності від інтенсивності пожежі [130]

Спосіб гасіння	Засоби гасіння	Інтенсивність пожежі		
		Висока	Середня	Низька
Гасіння водою	Мотопомпи МЛП-0,2; ПЛВ-2/1,2; МЛН-2,5/0,25	300	500	750
Гасіння крайки пожежі водою на відстані від джерела води до 1 км	Лісопожежний всюдихід ВПЛ-149, ВПЛ-149А, ВПЛ-6	1200	2000	4000
Те ж саме	Автоцистерни АЦ-30(66)-146, АЦ-30(66-11) мод. 184А, АЛП-10(88)-221	200 ÷ 400	400 ÷ 600	600 ÷ 1000
Гасіння крайки пожежі водою на відстані від джерела води до 100 м (низова інтенсивна пожежа); - побіжна низова пожежа	Ранцевий лісовий вогнегасник РЛО-6, РЛО-М, ОР	20 ÷ 40	40 ÷ 80	80 ÷ 150
		30 ÷ 50	50 ÷ 100	100 ÷ 200
Засипка крайки пожежі ґрунтом	Шанцеве знаряддя	15 ÷ 30	20 ÷ 40	40 ÷ 70

Деяких недоліків вищезгаданих засобів гасіння низових лісових пожеж

позбавлені бінарні вогнегасні системи, які являють собою два водні розчини, які зберігають окремо й подають одночасно або послідовно. Розрізняють гелеутворюючі й піноутворюючі бінарні вогнегасні системи (ГУС и ПУС). [70; 71; 144]. ГУС раніше було запропоновано для гасіння лісових пожеж [171-175]. Але дослідження було проведено в основному для верхових лісових пожеж. В цих роботах також не було обрано оптимальний склад вогнегасного засобу. Основні вогнегасні та вогнезахисні властивості ГУС було розглянуто в роботі [5], тому в даній роботі детально розглядатися не будуть. Відмітимо лише, що використання ГУС може забезпечити суттєве зменшення втрат ВР за рахунок стікання з вертикальних та похилих поверхонь і вони можуть забезпечити довготривалу вогнезахисну дію. Недоліком ГУС є низька проникна здатність у матеріал лісової підстилки.

1.5 Недоліки наявних методів гасіння лісових пожеж

Розглянуті методи й відповідні їм засоби гасіння пожеж мають обмежені сфери застосування. Більшості з них властиві суттєві недоліки. Відносно простий метод гасіння низової лісової пожежі слабкої інтенсивності шляхом нахльостування крайки пожежі не вимагає залучення техніки й вогнегасних речовин, однак необхідна велика кількість персоналу. Ще одним недоліком цього методу є можливість повторного займання погашеної крайки пожежі, оскільки цим методом практично неможливо загасити всі осередки тління, а після відновлення горіння полум'я може безперешкодно поширюватися далі.

Метод засипки крайки пожежі ґрунтом позбавлений останнього недоліку, однак має велику трудомісткість. Застосування технічних засобів (ґрунтометів, механізованих плугів, траншеєкопачів) дозволяє значно прискорити процес гасіння, однак це важко зробити в насадженнях із високою щільністю деревостою, на складному рельєфі місцевості, каменистому ґрунті.

Вода як засіб активного гасіння лісових пожеж має суттєві недоліки, пов'язані з великими втратами за рахунок стікання з похилих і вертикальних поверхонь [188]. Ще більші недоліки вона має як засіб вогнезахисту – крім стікання із захищуваних поверхонь, вода в умовах лісової пожежі швидко випаровується. Використання води з модифікувальними добавками значно ефективніше, ніж її використання в чистому вигляді, однак застосування таких композицій у більшості випадків економічно недоцільне. Це пов'язано, зокрема, з тим, що значна частина водних розчинів втрачається за рахунок стікання.

Таблиця 1.3–Позитивні властивості та недоліки різних методів та вогнегасних речовин при гасінні низових лісових пожеж

Метод або вогнегасна речовина	Фактори, що визначають ефективність пожежогасіння					
	коеф. викорис-тання	прони-кна здатність	вогнегас-ні власти-вості	час вогнеза-хисної дії	потреба у ВР	економіч-ний фактор
вода	-	++	+	-	-	++
розчини	+	++	++	+	-	-

піни	++	+	++	+	-	-
твердіючі піни	++	+	++	++	-	-
порошки	-	-	++	-	-	-
«Firesorb»	++	-	++	+	-	-
ГУС БВС	++	±	++	++	-	-
гази-інгібітори	-	-	++	-	-	-
вибухові методи			±	+	++	+
нахльостування				-	++	+
закиданням грунтом				++	++	±
створення протипожежних бар'єрів					++	++
створення протипожежних бар'єрів хімічними засобами	+	++	++	+	-	-
відпал				+	+	+
авіаційні методи (вода)	-	+	+	-	-	-

Показник оцінювання методу або вогнегасної речовини:

++ дуже висока, + висока, ± середня, – низька

Основні позитивні властивості та недоліки різних методів гасіння низових лісових пожеж приведено в табл. 1.3.

Використання газофазних, порошкових ВР і пін під час гасіння лісових пожеж ще менш перспективне – як через великі втрати, так і з економічних міркувань.

Пасивні методи гасіння низових пожеж високої інтенсивності в основному пов'язані з улаштуванням протипожежних бар'єрів. Для цього використовують важку техніку, за допомогою якої створюють мінералізовані смуги, однак через велику ширину таких смуг на це доводиться витратити багато часу, що, своєю чергою, призводить до втрати великих площ лісу.

Використання методу ініціювання випадіння опадів, а також авіаційних і вибухових методів гасіння лісових пожеж мають суттєві обмеження – як самостійні методи їх практично не застосовують.

Швидкотвердіючі піни на основі органічних речовин мають обмеження в

дальності їх подавання, мають у своєму складі горючі та токсичні компоненти, мають низькі економічні показники. Швидкотвердіючі піни на основі неорганічних речовин мають переваги, у порівнянні із швидкотвердіючими пінами на основі органічних речовин, за екологічними параметрами та вогнезахисними властивостями. Основним недоліком всіх методів із використанням авіації є надзвичайно низькі економічні показники. Недоліком ГУС є низька проникна здатність і низькі економічні характеристики.

РОЗДІЛ 2

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Ефективність вогнегасних речовин зумовлена комплексом їх властивостей. Вогнегасні властивості визначають чотири основні показники: здатність охолоджувати зону горіння або поверхню горючого матеріалу, інгібувальна, ізолювальна та розріджувальна дії. Також для гасіння пожеж важливе значення має вогнезахисна дія ВР, зумовлена в основному ізолювальними й теплозахисними, а для лісових пожеж ще і проникними властивостями.

Крім того, суттєвим є такий інтегральний показник, як коефіцієнт використання ВР, що зумовлений часткою його непродуктивних втрат. Коефіцієнт використання залежить від способу подачі ВР і його фізико-хімічних властивостей. Для більшості наявних ВР характерний низький коефіцієнт використання, так, для газофазних і твердофазних ВР властиве винесення потоками повітря (вітер) і конвекційними потоками. Цей недолік стосується й використання для гасіння пожеж води в розпиленому вигляді. Для води та водних розчинів (у випадку використання подачі компактними струменями) є характерними великі втрати за рахунок стікання рідини з похилих і вертикальних поверхонь.

Зменшення втрат ВР є особливо важливим під час гасіння лісових пожеж: по-перше, через великі витрати їх на гасіння, а по-друге, через те, що в багатьох випадках необхідно доставляти ВР на великі відстані.

2.1 Зменшення втрат вогнегасних речовин під час гасіння лісових пожеж

Як видно з наведеного аналізу наявних методів гасіння лісових пожеж (Розділ 1), вони мають суттєві недоліки: в активних методах це великі втрати ВР; у пасивних – значні втрати й велика трудомісткість методів гасіння (створення мінералізованої смуги).

Різні способи гасіння лісових пожеж мають свої переваги й недоліки. Деякі з них не потребують використання техніки, але необхідно залучати людські ресурси. Одні не вимагають завезення вогнегасних речовин, для інших потрібно доставляти їх у великій кількості [72].

Деяких недоліків з розглянутих вогнегасних речовин позбавлені бінарні вогнегасні системи, які являють собою два водні розчини, які зберігають окремо й подають одночасно або послідовно. Розрізняють гелеутворюючі й піноутворюючі бінарні вогнегасні системи (ГУС і ПУС) [70].

ГУС запропоновані для гасіння ТГМ [77; 82; 83] і являють собою два водні розчини, які зберігають окремо й подають одночасно. Перший – це розчин гелеутворюючого компонента; другий – каталізатор гелеутворення.

За умов одночасної подачі двох розчинів вони змішуються на поверхнях, які горять, або на захищуваних поверхнях. Між компонентами розчинів відбувається взаємодія, що зумовлює виникнення стійкого гелю. Гель утворює на поверхні неплинний вогнезахисний шар, який легко утримується на вертикальних і похилих поверхнях. Перевага ГУС перед водою та водними розчинами полягає в суттєвому зменшенні втрат вогнегасної речовини за рахунок стікання з похилих і вертикальних поверхонь і високих вогнезахисних властивостей гелеподібного шару, що утворюється. Недоліком ГУС є низька проникна здатність утворюваного гелю, що не дає можливість забезпечити глибоке просочування підстилки до ґрунтового шару.

У роботах [167; 171; 174] було раніш запропоновано використовувати ГУС для гасіння лісових пожеж. Проаналізовано як вогнегасні, так і вогнезахисні характеристики ГУС. Спираючись на ці дослідження, доходимо висновку [71], що перевага ГУС, порівняно з водою й водними розчинами, при активних методах гасіння є незначною, а при пасивних вона на порядок більша, ніж у випадку використання води та водних розчинів. Водночас зауважимо, що у відзначених роботах не було запропоновано способи оптимізації складу ГУС стосовно гасіння низових лісових пожеж.

Як важливий момент щодо застосування ГУС для гасіння низових лісових пожеж було встановлено [144] факти подолання фронтом пожежі лісової підстилки завтовшки більше 3 см з нанесеним гелем. Горіння тривало на деякій глибині під шаром гелю. Цей факт зумовлений низькою проникною здатністю гелю, що утворюється. Одночасно було встановлено [152], що шар гелю невеликої товщини (1–2 мм) попереджає займання лісової підстилки від дії теплового випромінювання полум'я й іскор.

Отже, застосування ГУС для гасіння низових лісових пожеж є перспективним напрямом, однак треба розв'язати проблему їхньої низької проникної здатності й оптимізувати суміш ГУС. В результаті проведених попередніх досліджень встановлено [71], що підвищити проникну здатність ГУС можна шляхом роздільно-послідовної подачі компонентів ГУС або застосування в якості БВС піноутворюючих систем (ПУС) [148]. ПУС передбачає не подання готової піни, а роздільне подання двох рідких компонентів у розпиленому вигляді, які під час змішування утворюють піну. ПУС дозволяють забезпечити утворення піни як на зовнішній поверхні матеріалу з великою кількістю труднодоступних і прихованих поверхонь, так і всередині матеріалу, що є проникним для рідин. В останньому випадку компоненти ПУС запропоновано [148] подавати по чергово, що забезпечує протікання процесу утворення піни в нижніх шарах лісового горючого матеріалу. Попередні дослідження [150] дозволили встановити такі переваги БВС на основі ПУС:

- високі проникні властивості;
- збереження вогнезахисних властивостей протягом кількох годин;
- високі ізолювальні властивості.

На підставі сказаного було запропоновано використовувати ГУС і ПУС

для гасіння лісових пожеж [136]. Однією з основних переваг ГУС і ПУС перед традиційними ВР є їх високий коефіцієнт використання. Оскільки основним компонентом ГУС і ПУС є вода (60–97 %) [146], їм властива висока охолоджувальна дія. Крім того, до складу ГУС і ПУС можна вводити речовини, які забезпечують високу інгібувальну, розріджувальну та ізолювальну дію. А саме останні три складники разом з охолоджувальною дією дозволяють забезпечити високу вогнегасну й вогнезахисну дію.

Раніше отримані результати [63; 67] вказують на високі вогнезахисні й вогнегасні характеристики ГУС стосовно целюлозовмісних матеріалів. Обробка за допомогою ГУС багатьох ТГМ призводить до втрати ними здатності до горіння [6; 17; 45]. З огляду на це запропоновано [152] використовувати ГУС для облаштування протипожежних бар'єрів. При цьому ЛГМ в області протипожежного бар'єра не видаляють і не засипають ґрунтом, а обробляють ГУС. Як результат – на поверхні ЛГМ утворюється міцне покриття, що має високі вогнезахисні властивості. У плані оперативного вогнезахисту ЛГМ гелеві покриття мають значні переваги перед водою й водними розчинами, передусім з огляду на практично повну відсутність втрат за рахунок стікання з похилих і вертикальних покриттів і просочування в ґрунт крізь шари лісової підстилки, а роздільно- послідовне подання компонентів забезпечує утворення гелю на всій товщі лісової підстилки.

ПУС, своєю чергою, утворюють стійку піну низької кратності. Залежно від способу подачі це може відбуватися як на поверхні ЛГМ, так і в шарах підстилки. Завдяки такому способу отримання піни вдається не лише створити надійний ізолювальний шар і попередити проходження вогню в шарах підстилки, але й значно скоротити втрати ВР. У випадку роздільно-одночасного подання компонентів піна утворюється на поверхні ЛГМ і поступово проникає у глибину надґрунтового шару, що забезпечує надійний вогнезахист горючих матеріалів. Водночас вогнезахисні й вогнегасні характеристики ПУС щодо ЛГМ лісової підстилки раніше не було визначено.

2.2 Підвищення охолоджувальної, розріджувальної, інгібуючої та ізолюючої дії вогнегасних речовин, які використовують для гасіння лісових пожеж

Компоненти ГУС являють собою водні розчини, тобто їм іманентно властива висока охолоджувальна дія. Підвищити її, як показано в роботах [64; 68; 66], можна шляхом використання компонентів з високими значеннями теплоти термодеструкції. У цих роботах також запропоновано використовувати як каталізатори гелеутворення розчини солей амонію: сульфати й фосфати. Для ГУС з такими каталізаторами експериментально підтверджено високу охолоджувальну дію [5]. Підвищення охолоджувальної дії ВР сприяє збільшенню як вогнегасної дії, так і оперативної вогнезахисної дії. Остання властивість є важливою у випадку використання непрямих методів гасіння лісових пожеж.

Розріджувальний ефект первісно властивий ГУС, оскільки під час нагрівання їх утворюються пари води, які діють як розріджувачі на речовину, що бере участь у процесі горіння. Більш ефективним розріджувачем, ніж пари води, є вуглекислий газ. Тому введення до складу ГУС речовин, які виділяють вуглекислий газ під час нагрівання, може стати одним зі шляхів підвищення вогнегасних і вогнезахисних властивостей. Серед перспективних емітентів вуглекислого газу відзначимо карбонат амонію й гідрокарбонати амонію, натрію й калію.

Одним з найважливіших механізмів припинення горіння та зменшення горючості є інгібувальний ефект. Інгібітори горіння уповільнюють або зупиняють реакцію горіння. Найефективнішим інгібітором горіння целюлозовмісних матеріалів є фосфати амонію. Як компонент ГУС найкраще зарекомендував себе дигідрофосфат амонію [67]. Близький до нього ефект проявляє амофос – добриво, основним компонентом якого є $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Також можливо використовувати в гелеутворюючих композиціях органічні бром- та йодовмісні сполуки й деякі фосфати [97; 96].

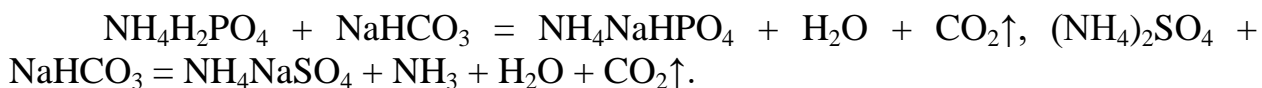
Вагомим механізмом припинення горіння є ізоляція горючих речовин від надходження до його поверхні кисню. Ізоляція особливо важлива на стадії гетерогенного горіння карбонізованого залишку целюлозовмісних матеріалів. Ізолувальні властивості властиві як ГУС, так і ПУС. Вони міцно утримуються на всіх видах ЛГМ й у вологому вигляді надійно ізолюють матеріал від надходження до його поверхні кисню.

Найближчим аналогом ПУС є повітряно-пінні вогнегасні засоби, які знайшли широке застосування у практиці пожежогасіння й посідають друге місце за частотою використання під час гасіння пожеж [148; 180]. Ізолувальна дія є домінантним механізмом під час гасіння пінами [149]. За цим показником піни значно перевищують всі інші традиційні засоби пожежогасіння. Піни використовують для гасіння пожеж класів А і В. Коефіцієнт використання повітряно-пінних сумішей є високим у випадках гасіння горизонтальних ділянок поверхонь горючих матеріалів і низьким під час гасіння вертикальних і похилих поверхонь [174; 184]. Це зумовлено стіканням отриманої піни на основі води й ПУС з вертикальних поверхонь.

Під час гасіння ЛГМ ПУС мають переваги порівняно з традиційними пінами: у випадку руйнування піни, отриманої на основі ПУС, утворюється аморфний осад гідроксиду алюмінію, який утримує велику кількість води. Після його висушування з'являється пористий залишок, який виявляє теплоізолувальні властивості. Після руйнування й висушування звичайної піни такий залишок з ізолувальними властивостями не утворюється [60].

Якщо вибір лужної частини піноутворюючих розчинів можна обмежити карбонатами й гідрокарбонатами натрію та калію, то вибір кислотної частини надає додаткові можливості для підвищення вогнегасної здатності таких засобів пожежогасіння. Доцільно ввести до складу вогнегасного розчину речовини, що підвищують охолоджувальну дію, та інгібітори горіння. З цією метою можна використовувати дигідрофосфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та сульфат амонію. Попередні дослідження показали [137; 145; 148], що ці речовини під час

реакції з гідрокарбонатом амонію утворюють вуглекислий газ:



Така реакція, що протікає за наявності піноутворювача (ПУ), викликає утворення піни. У випадку $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ процес піноутворення протікає швидко, а у випадку $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – повільно. На твердих поверхнях, унаслідок одночасного набризкування лужного розчину (NaHCO_3) й кислотного розчину ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ або $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), утворюються шари дрібнодисперсної піни, яка за відсутності зовнішнього впливу зберігається більше 10 хвилин. Необхідно відзначити, що така піна утримується й на вертикальних поверхнях, якщо товщина її шару не перевищує 3 см [70].

Крім ізолювальної дії, піна, утворена під час використання як кислотного компонента дигідрофосфату амонію, проявлятиме й інгібувальну дію, оскільки ця речовина є одним із найефективніших інгібіторів горіння целюлозних матеріалів [177]. У випадку використання як кислотного компонента сульфату амонію піна матиме підвищену охолоджувальну дію за рахунок великих затрат тепла на термічне розкладання цієї речовини [7].

Також, у разі використання ПУС, є можливість отримувати швидкотвердіючі піни (ШТП) [4]. Такі піни мають здатність розтікатися поверхнею ТГМ у перші секунди у процесі переходу від рідкого стану в гелеподібний, а потім – у твердий. Стверділа піна має добрий коефіцієнт адгезії, автоматично виконує вже в перші три - п'ять секунд екранувальний та ізолювальний механізми вогнезахисної дії. Водночас ШТП мають і негативні властивості, основною з яких є низька проникна здатність. Також під час гасіння лісових пожеж швидкотвердіюча піна може завдати значних збитків екології лісу, через наявність у її складі токсичних речовин (оцтова й соляна кислоти). Крім того, необхідно відзначити, що після змішування всіх компонентів ШТП утворюється композиція, водневий показник (рН) якої перевищує величину 11. Таке значення рН системи несприятливо впливає на розвиток деяких рослин, а потрапляючи на шкіру, суміш викликає подразнення або легкі хімічні опіки.

Основною перевагою ПУС є те, що утворювана з них піна має великі проникні властивості, порівняно з ШТП. У випадку використання ПУС можна застосовувати два види подачі – роздільно-одночасну та роздільно-послідовну. У першому випадку, при одночасному потраплянні на поверхню лісової підстилки, компоненти змішуються й утворюють піну. За необхідності утворення піни в глибині шару підстилки необхідна послідовна подача компонентів, що забезпечує проникнення компонентів углибину підстилки. Комбінування способів подачі дозволяє оперативно змінювати способи й методи боротьби з лісовою пожежею та оперативно реагувати на швидко змінну обстановку, що часто трапляється під час лісових пожеж.

Одним із суттєвих недоліків пін є проблеми з їх подачею на великі

відстані. Частково проблему вирішує застосування рідких сумішей, що спінюються в осередку пожежі [164; 201]. Вони являють собою емульсію швидкозакипної рідини у водному розчині піноутворювача. Потрапляючи на нагріті поверхні (ЛГМ) в осередку пожежі, швидкозакипна рідина переходить у газоподібний стан. За рахунок наявності піноутворювача у вогнегасному розчині внаслідок цього утворюється піна, яка розтікається поверхнею горючого матеріалу. Такі піни за наявності в матеріалі отворів і щілин здатні проникати всередину пористої системи. Недоліком сумішей, що спінюються в осередку пожежі, є те, що спінювання відбувається тільки на нагрітих поверхнях. Потрапляючи на недостатньо нагріті вертикальні й похилі поверхні, рідка суміш стікає з них, що призводить до втрати вогнегасної речовини, а це робить їх застосування для гасіння лісових пожеж нераціональним. Цю проблему вирішують способом роздільної подачі компонентів ПУС. Роздільні зберігання й подача підвищують дальність подачі компонентів на великі відстані й уже на поверхні, змішуючись, утворюється гель або піна, залежно від компонентів і незалежно від температури поверхні.

2.3 Підвищення вогнезахисних властивостей бінарних вогнегасних систем

Оскільки для гасіння лісових пожеж середньої та високої інтенсивності в основному застосовують непрямі методи гасіння, ВР, що використовують із цією метою, повинні мати високу вогнезахисну дію. Вогнезахисні властивості зумовлені тими самими складниками, що й вогнегасні властивості: охолодження горючого матеріалу, інгібування реакцій горіння, розрідження газоповітряного середовища над горючим матеріалом та ізоляція поверхні матеріалу від надходження кисню повітря. У плані вогнезахисту найважливішим складником є теплоізолювальні властивості покриття. Саме покриття з низькою теплопровідністю можуть забезпечити довготривалий вогнезахист.

Бінарні вогнегасні системи можуть забезпечити одержання на різних поверхнях покриттів з високими вогнезахисними властивостями. Гелеподібні покриття, що утворюються під час нанесення на тверді поверхні компонентів ГУС, діють комплексно – тією чи іншою мірою у вогнезахисті задіяні всі механізми вогнезахисної дії, однак домінуючими механізмами є охолоджувальний і теплоізолювальний [64; 66]. Для гелевих покриттів на першому етапі реалізується висока охолоджувальна дія – відбувається випаровування води з шару гелю. Оскільки воді властива аномально висока теплота випаровування, то й саме покриття, що складається в основному з води, має високу охолоджувальну дію. На другому етапі вогнезахист зумовлюють теплоізолювальні властивості покриття. Після випаровування води із шару гелю утворюються шари сухого гелю (ксерогель). Цей шар, з огляду на високу пористість, має високі теплоізолювальні властивості, причому механізм теплозахисної дії має триваліший характер, ніж інші

механізми. Розглянемо його детально [71].

У найпростішому випадку питомий тепловий потік q через покриття визначають товщиною захисного шару l , коефіцієнтом теплопровідності λ та різницею температур між сторонами покриття Δt [46]:

$$q = \lambda \cdot \Delta t / l. \quad (2.1)$$

Тобто для забезпечення низького теплового потоку через покриття необхідно збільшувати товщину покриття та знижувати коефіцієнт теплопровідності. Нанесення гелеподібних покриттів з використанням ГУС дозволяє забезпечити товщину такого покриття до 1 см. Гель, що утворюється на першому етапі, має коефіцієнт теплопровідності, близький до відповідної характеристики води $\sim 0,6$ Вт/(м·К) [84]. Ксерогелевий шар, що утворюється після випаровування води, має на порядок менше значення коефіцієнта теплопровідності $\lambda \approx 0,06$ Вт/(м·К) [61], що знаходиться на рівні теплопровідності теплоізоляційних матеріалів. Отже, питомий тепловий потік через шари ксерогелю за різниці температур, що дорівнює 1000 К, становитиме 6 кВт/м². На підставі цього робимо висновок, що ГУС дозволяють забезпечити високий рівень вогнезахисту ТГМ.

Ще більшою мірою покращити вогнезахисні властивості гелеутворюючих шарів дозволяє введення до складу ГУС компонентів, які забезпечують їх спучення: цільових добавок інтеркалійованого графіту, поліфосфатів амонію або використання надлишку гелеутворювача – рідкого скла [80].

У випадку використання непрямих методів гасіння лісових пожеж важливим є питання про швидкість створення вогнезахисних бар'єрів. Сам процес нанесення рідких компонентів ГУС на ЛГМ в області вогнезахисного бар'єра є значно менш трудомісткий, ніж проведення земляних робіт і видалення рослинних матеріалів із зони облаштування вогнезахисної смуги. Для оцінки швидкості створення захисної смуги за допомогою ГУС необхідно здійснити експериментальні дослідження з визначення їхньої необхідної питомої витрати.

Ще однією перевагою ГУС перед традиційними методами створення вогнезахисних смуг є зменшення втрат лісових насаджень – рослини, оброблені ГУС, не гинуть.

Разом із позитивними властивостями, ГУС мають і деякі недоліки. Одним із них є їхня низька проникна здатність. У випадку швидкого утворення гелю ВР не проникає до закритих труднодоступних поверхонь. А саме гасіння таких поверхонь горіння є найскладнішим завданням під час гасіння лісових пожеж. Повітряно-механічні піни, хоча й мають більшу, ніж

ГУС, проникну здатність, також повною мірою не забезпечують надійного проникнення ВР до прихованих поверхонь. Крім того, для пін характерні втрати ВР за рахунок стікання з похилих і вертикальних поверхонь. Після стікання із захищуваних поверхонь практично цілком втрачається вогнезахисна дія пін.

ПУС із зовнішнім піноутворенням являють собою бінарні вогнегасні засоби, до складу яких входять дві рідини, що містять ПУ, які роздільно зберігаються й роздільно-одночасно подаються. При змішуванні на твердих і рідких поверхнях ПУС утворюють хімічну піну. Процес піноутворення займає деякий час, за який частина рідких компонентів ПУС устигає затекти в щілини й отвори; частково піна утворюється у глибинних порожнинах ЛГМ. Разом з цією перевагою перед ГУС піноутворюючі суміші мають і недолік. Вони, як і звичайна повітряно-механічна піна, стікають із зовнішніх відкритих поверхонь твердих матеріалів. З використовуваних ВР найкращі проникні властивості мають вода й водні розчини, однак для них характерні й найбільші втрати за рахунок стікання й відсутності вогнезахисної дії. ПУС, своєю чергою, має менший процент стікання з вертикальних поверхонь, ніж повітряно-механічна піна й вода з добавками, але все-таки поступається ГУС [133].

Піноутворюючі системи, своєю чергою, мають високі вогнезахисні властивості й достатню щільність за рахунок низької кратності та високу стійкість за рахунок додавання стабілізаторів, які збільшують час працездатності хімічних протипожежних бар'єрів.

2.4 Підходи до оптимізації сумішей БВС під час гасіння лісових пожеж

У виборі оптимального складу ВР для гасіння лісових пожеж необхідно враховувати такі основні чинники: вогнегасні властивості речовин, їхні вогнезахисні характеристики, економічні й екологічні параметри. Кожна з цих характеристик по-різному пов'язана зі складом вогнегасної речовини. Обираючи оптимальну суміш для гасіння лісової пожежі, необхідно окремо розглянути активні та пасивні методи гасіння, оскільки речовина, яка є ефективною в активних методах гасіння, може виявитися малоефективною у разі використання пасивних методів гасіння й навпаки.

Ефективність ВР зумовлена видом горючого матеріалу – для одних горючих матеріалів переваги може мати одна вогнегасна суміш, для інших – інша. Принциповий підхід до оптимізації вогнегасного складу при перемінному пожежному навантаженні наведено в роботах [84; 137; 136]. З усього розмаїття ЛГМ для подальшого розгляду залишимо деревину й суху

траву як приклад целюлозовмісних речовин та соснову хвою й шишки як матеріал, що містить велику кількість смол. Дослідження щодо вогнегасних і вогнезахисних властивостей ГУС під час гасіння деревини були здійснені раніше – результати подано в роботах [80; 67; 75]. З наведених відомостей випливає, що з великої кількості ГУС виділяють дві системи. Одна з них ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + \text{CaCl}_2$) проявляє високі вогнезахисні властивості, а друга ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) – високі вогнегасні властивості. У подальшому як каталізатор гелеутворення замість дигідрофосфату амонію використовуватимемо технічний продукт амофос. Ця заміна мало впливає на вогнегасні властивості ГУС, але суттєво здешевлює ВР.

Необхідно також відзначити, що в різних ситуаціях до ВР висувають суперечливі вимоги – в одних випадках необхідно, щоб ВР на поверхні ЛГМ було нетекучим, в інших – щоб за допомогою нього було можливо здійснити „пролив”. Найбільше цим вимогам відповідають ГУС [63; 65; 75]. Вони складаються з двох компонентів, що зберігаються окремо, а це дозволяє подавати тільки один із компонентів. У такому випадку можна здійснювати „пролив”. При одночасній подачі обох компонентів утворюється нетекучий шар гелю, який має високі вогнезахисні властивості.

У випадку, якщо є велика кількість прихованих від прямого потрапляння ВР поверхонь, ГУС не забезпечує зупинку просування полум'я. Тоді одним зі шляхів підвищення проникних властивостей ВР є використання тільки одного з компонентів вогнегасної системи. Однак при цьому втрачається найважливіша перевага ГУС – відсутність втрат ВР за рахунок стікання.

Значні переваги у проникних властивостях мають піноутворюючі системи із зовнішнім піноутворенням [70]. Раніше ПУС було запропоновано застосовувати для гасіння горючих рідин. Ми пропонуємо [137] використовувати їх для обробки ЛГМ. До таких матеріалів належить лісова підстилка. Процес вибору компонентів БВС здійснено на підставі фізико-хімічних та економічних показників компонентів, отриманих раніше [60; 137; 148].

Вибір компонентів ГУС для гасіння лісових пожеж було здійснено раніше в роботах [73; 172], у яких обґрунтовано застосування ГУС $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{CaCl}_2$ як системи з найкращими вогнезахисними властивостями. А саме вогнезахисні властивості є першочерговими у використанні пасивних методів гасіння низових лісових пожеж [76].

Оптимальну ПУС для гасіння низових лісових пожеж раніше не було обрано. Це вимагає проведення експериментальних досліджень усіх раніше запропонованих ПУС:

$\text{NaHCO}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – ПУС-1;

$\text{NaHCO}_3 + \text{амофос}$ – ПУС-2; $\text{NaHCO}_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ – ПУС-3;

вуглеамонійна сіль + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ – ПУС-4; вуглеамонійна сіль + амофос – ПУС-5; вуглеамонійна сіль + $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ – ПУС-6.

Для двох видів БВС (ГУС і ПУС) також необхідно вивчити проникні властивості в матеріали лісової підстилки. Це пов'язано з тим, що у випадку товстої підстилки полум'я може проникнути під нанесений вогнезахисний шар.

2.5 Підвищення проникної здатності БВС

Для створення загороджувальних та опорних смуг, від яких здійснюють відпал, доцільно застосовувати засоби з високими оперативними вогнезахисними властивостями. Одна з вимог до таких засобів – малі втрати у випадку їх нанесення на лісові горючі матеріали. Як такі засоби вогнезахисту було запропоновано використовувати два варіанти БВС – ГУС і ПУС.

ГУС [154] показали високі вогнезахисні властивості щодо хвої та сухої трави. Водночас вони мають деякі негативні властивості, однією з яких є низька проникна здатність. Так, під час обробки лісової підстилки, яка складається з сухого соснового опаду, шишок і дрібних сухих гілок, було встановлено [72], що за товщини шару підстилки від 5 см гелеві покриття неспроможні попередити поширення пожежі лісовою підстилкою. Горіння поширюється на деякі глибини нижче шару гелю. У зв'язку з цим виникає необхідність збільшити проникну здатність ГУС.

Причиною низької проникної здатності ГУС щодо лісової підстилки є швидке утворення суцільного шару гелю на її поверхні. Подальша подача рідких компонентів ГУС просто збільшує товщу гелеподібного шару, а проникнення ВР у глибину підстилки відсутнє. Для розв'язання цієї проблеми запропоновано [151] здійснювати подачу компонентів ГУС послідовно. Спочатку подають один компонент ГУС, який є малов'язкою рідиною. Він проникає на будь-яку глибину підстилки, яка залежить від кількості поданого компонента. Потім подають другий компонент, який так само, як і перший, є малов'язкою рідиною. Оскільки перший компонент за рахунок змочування підстилки затримується на ній, у місцях контакту з другим компонентом утворюється гель.

Шари гелю уповільнюють проникнення другого компонента у глибину підстилки. Завдяки цьому при подальшому надходженні другого компонента він блокується на поверхні, як наслідок – на поверхні лісової підстилки утворюються суцільні шари гелю. Дослідження глибини проникнення шару гелю при послідовній подачі компонентів ГУС вимагає проведення експериментальних досліджень.

Попередні досліди показали [72], що ПУС при роздільно-одночасній подачі компонентів має більшу, ніж ГУС, проникну здатність. У такому

випадку вогнегасні речовини проникають у лісову підстилку на глибину 3–4 см. Така глибина проникнення може виявитися недостатньою для попередження поширення полум'я в товстих шарах лісової підстилки. Для збільшення проникної здатності ПУС можна також, як і для ГУС, скористатися роздільно-послідовною подачею компонентів, що, своєю чергою, вимагає проведення відповідних експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БВС ПО ВІДНОШЕННЮ ДО МАТЕРІАЛУ ЛІСОВОЇ ПІДСТИЛКИ

Для ефективного гасіння лісових пожеж необхідно використовувати вогнегасні речовини з високими вогнегасними й вогнезахисними характеристиками. Високі вогнегасні характеристики необхідні передусім при активних (прямих) методах гасіння, що спрямовані на безпосереднє гасіння кромки пожежі. Раніше проведені експериментальні дослідження [172] показали, що у випадку гасіння низових лісових пожеж активними методами ГУС не мають суттєвих переваг перед гасінням водою й водними розчинами.

Для гасіння низових лісових пожеж високої та середньої інтенсивності використовують непрямі (пасивні) методи гасіння, що передбачають вибір лінії зупинки вогню на деякій відстані від кромки пожежі. Для зупинки поширення пожежі використовують захисну смугу (протипожежний бар'єр). У таких випадках для вогнегасного засобу необхідні високі вогнезахисні властивості.

Серед ВР найвищі вогнезахисні властивості проявляють гелеподібні шари й піни, які наносять на захищені поверхні за допомогою БВС. Сьогодні відомі два різновиди БВС – ГУС і ПУС. Одним із недоліків досліджуваних систем є їх низькі проникні властивості по відношенню до матеріалу лісової підстилки. Ефективне використання таких вогнегасних засобів вимагає підвищення їх проникних властивостей. Для забезпечення глибинного просочування лісової підстилки в цій роботі запропоновано використовувати роздільно-послідовну подачу компонентів БВС [151].

3.1 Дослідження проникних властивостей ГУС при роздільно- послідовній і роздільно-одночасній подачі компонентів

Для вивчення проникнення ГУС у глибину лісової підстилки необхідно експериментально дослідити цей процес. В експериментах було використано [72] лісову підстилку, що складалася із сухого ялинового опаду, шишок і дрібних сухих гілок. Товщину лісової підстилки було обрано рівною 10 см. Компоненти ГУС подавали на лісову підстилку роздільно-послідовно й роздільно-одночасно [145]. Подачу компонентів ГУС здійснювали за допомогою побутових розпилувачів ОП- 301.

Під час проведення експерименту матеріал лісової підстилки засипали в циліндричну місткість із висотою борта 2 см і діаметром 25 см. Далі на

поверхню підстилки наносили шар гелю з поверхневою витратою ГУС від 0,2 до 2 г/см². Поверхневу витрату контролювали ваговим методом з використанням ваг неперервного зважування ТМ Radwag (Польща) з дискретністю 0,1 грамм. Через одну хвилину після нанесення шару гелю фрагмент підстилки розділяли на дві рівні частини за вертикаллю (рис. 3.1).



Рис. 3.1 – Результат обробки лісової підстилки ГУС при роздільно-одночасному способі подачі

Аналогічно проводили дослід для випадку роздільно-послідовної подачі компонентів ГУС. Час між подачею компонентів становив ~10 с.

У результаті експерименту було встановлено, що роздільно-одночасний спосіб подачі ГУС не забезпечує вогнезахисту лісової підстилки на всю її товщину через створення захисних шарів тільки в тонкому верхньому шарі підстилки товщиною менше 1 см. При роздільно-послідовній подачі глибина проникнення ВР у шар лісової підстилки залежить від поверхневої витрати В компонентів. Вона варіює від 0,5 см (при $V=0,2$ г/см²) до 10 см (при $V=2$ г/см²). Розподіл ВР за глибиною проникнення в лісову підстилку нерівномірний. У верхній частині лісової підстилки кількість ВР більша, а внизу – менша.

3.2 Дослідження проникних властивостей ПУС при роздільно- послідовній і роздільно-одночасній подачі компонентів

Експериментальні дослідження проникних властивостей ПУС при роздільно-послідовній і роздільно-одночасній подачі компонентів БВС

проводили аналогічно з дослідженнями для ГУС. Отримано результати візуальних спостережень для випадку роздільно-одночасної подачі:

- усі шість ПУС показали ідентичні результати;
- тип піноутворювача мало впливає на результати;
- вогнегасні речовини проникають на глибину лісової підстилки від 0,5 см (при $V=0,1 \text{ г/см}^2$) до 5 см (при $V=1 \text{ г/см}^2$);
- піна, що утворюється, створює суцільне об'ємне покриття (рис. 3.2), яке з часом поступово руйнується;
- через 10–15 хвилин піна руйнується повністю;
- для ПУС $\text{NaHCO}_3+\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{NaHCO}_3+\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{NH}_4\text{HCO}_3+\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{NH}_4\text{HCO}_3+\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ після руйнування піни на поверхні матеріалів лісової підстилки утворюються фрагменти аморфного осаду з великим вмістом рідини.



Рис. 3.2 – Результат обробки лісової підстилки ПУС: вуглеамонійна сіль + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ при роздільно-одночасному способі подачі

Для випадку роздільно-послідовної подачі:

- усі шість ПУС показали ідентичні результати;
 - тип піноутворювача мало впливає на результати;
 - вогнегасні речовини проникають на глибину лісової підстилки від 1 см (при $V=0,1 \text{ г/см}^2$) до 5 см (при $V=0,3 \text{ г/см}^2$);
 - піна, що утворюється, створює суцільне об'ємне покриття на поверхні й на всю глибину шару підстилки (рис. 3.3);
 - через 8–10 хвилин піна руйнується повністю;
- для ПУС $\text{NaHCO}_3+\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{NaHCO}_3+\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{NH}_4\text{HCO}_3+\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{NH}_4\text{HCO}_3+\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ після руйнування піни на поверхні матеріалів

лісової підстилки утворюються фрагменти аморфного осаду з великим вмістом рідини.

Порівняння проникних властивостей ГУС і ПУС дозволяє зробити висновок, що при роздільно-одночасній подачі ПУС забезпечує глибше просочування лісової підстилки.



Рис. 3.3 – Результат обробки лісової підстилки ПУС $\text{NaHCO}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ при роздільно-послідовному способі подачі

У випадку роздільно-послідовної подачі обидві БВС можуть забезпечити проникнення ВР на всю глибину шару лісової підстилки.

3.3 Лабораторні дослідження вогнезагороджувальних властивостей лісової підстилки, обробленої ГУС

Для дослідження вогнезагороджувальних властивостей лісової підстилки, обробленої ГУС, було обрано [136] два різновиди гелевих композицій: в одному випадку – ГУС зі значним часом гелеутворення; у другому – послідовна подача компонентів ГУС з малим часом гелеутворення. Обидва підходи забезпечили глибоке проникнення ВР у шар лісової підстилки. З вивчених раніше систем [76] дві ГУС мають значний час гелеутворення – це $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (15 %) + амофос (15 %) (ГУС-1) і $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (15 %) + NH_4HCO_3 (15 %) (ГУС-2). Як ГУС з малим часом гелеутворення було обрано дві системи з найвищими вогнегасними властивостями $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) + CaCl_2 (5 %) (ГУС-3) і $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) + $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (5 %) (ГУС-4)

Для вивчення впливу обробки лісової підстилки ГУС на поширення стійкої низової пожежі було проведено лабораторні дослідження з поширення полум'я підстилкою. Підстилка, як і раніше, складалася із

соснового опаду, шишок і дрібних сухих гілок. Обираючи параметри лісової підстилки, ми враховували, що в межах одного типу лісу її товщина може варіювати від 0,5 до 15 см, а запаси – становити від 10 до 100 т/га [120]. Також узято до уваги, що товщина підстилки в 60-літньому сосняку зазвичай не перевищує 6 см, але зі збільшенням віку лісу цей показник може зменшуватися [170]. Крім того, ураховано, що середній вік лісів України становить більше 55 років [38].

У лабораторних дослідженнях було відтворено лісову підстилку розміром 30x30 см, завантаженням 225 г, що відповідає питомому завантаженню 2,5 кг/м² і товщині 5 см. Підстилка була вислана на керамічній плитці з шаром піску 1 см.

Для порівняння було вивчено вогнезагороджувальні властивості лісової підстилки, обробленої водою та водою з піноутворювачем (2 %). ВР наносили за допомогою побутових розпилювачів на підготовлену підстилку, як показано на рис. 3.4.

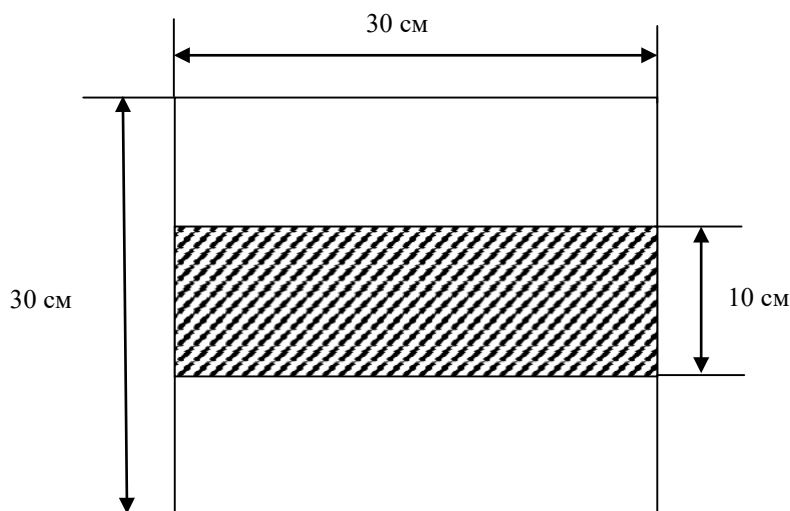


Рис. 3.4 – Схематичне зображення лісової підстилки для імітації лісової пожежі

Ширину оброблюваної підстилки було обрано 10 см, що відповідає площі 0,03 м². Оброблені ділянки знаходились на відстані 10 см від місця підпалу. Далі здійснювали підпал підстилки. Етапи проведення експерименту представлено на рис. 3.5.



а

6



B



Рис. 3.5 – Етапи лабораторного експерименту з поширення полум'я лісовою підстилкою, обробленою ГУС: а – шар гелю на лісовій підстилці (при одночасній подачі компонентів ГУС); б – прогорання підстилки. На фото бачимо полум'я з іншої сторони обробленої смуги; в – зовнішній вигляд підстилки після завершення експерименту при роздільній подачі компонентів (видно пройдені й непройдені вогнем ділянки).

Усі лабораторні досліди проводили у двох варіантах – без сушки оброблюваної підстилки (час підпалу не більше 5 хвилин після обробки) і з підсушуванням підстилки протягом 20–24 годин при температурі 18–20 °С у лабораторних умовах. Час підсушування 20–24 години в лабораторних умовах відповідає 4–6 годинам підсушування при температурі 30–35 °С та за умов впливу вітру 2–4 м/с [136].

Маси ВР, нанесених на смугу підстилки шириною 10 см і довжиною 30 см, становили 30 г, 50 г та 75 г. При подачі 30 г ВР (питома витрата 1 кг/м²) в усіх випадках вогонь подолав оброблену ВР смугу. Результати інших експериментів представлено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вплив маси (m) і питомої витрати (В) на результати експерименту з вогнезагороджувальних властивостей лісових підстилок, оброблених ГУС і водою при одночасно-роздільній (одн) і послідовній (посл) подачі компонентів

m, г	50				75			
P, кг/м ²	1,7				2,5			
Сушка	без сушки		сушка		без сушки		сушка	
Спосіб подачі	одн	посл	одн	посл	одн	посл	одн	посл
ГУС-1	-	-	-	-	-	+	-	-
ГУС-2	-	-	-	-	-	+	-	-
ГУС-3	-	+	-	-	-	+	-	+
ГУС-4	-	-	-	-	-	+	-	-
Вода	+		-		+		-	
Вода + ПУ(2%)	+		-		+		-	

+ полум'я не пододало перепону, - полум'я пододало перепону

Аналіз результатів експерименту дозволяє зробити висновок, що ГУС поступаються воді у випадку створення вогнезахисної смуги на хвойній підстилці товщиною 5 см (питоме пожежне завантаження – 2,5 кг/м²). Це зумовлено тим, що полум'я проходить під шаром підстилки, розташованої нижче шару гелю. Це, своєю чергою, зумовлено низькими (порівняно з водою) проникними властивостями ГУС. У випадку послідовно-роздільної

подачі компонентів ГУС гель утворюється в усьому об'ємі лісової підстилки. Завдяки цьому ГУС-3 змогла попередити поширення горіння хвойною лісовою підстилкою при питомій витраті 1,7 кг/м². Водночас у ході тривалого сушіння ГУС-3, так само, як і вода, не забезпечує надання вогнезагороджувальних властивостей лісової підстилки за такої питомої витрати.

У випадку підвищення питомої витрати ВР до 2,5 кг/м² всі вивчені ГУС при послідовній подачі компонентів забезпечують надання вогнезахисних властивостей лісовій підстилці у випадку незначного часу сушки. При тривалому сушінні (20–22 години) обробленої ділянки лісової хвойної підстилки тільки ГУС-3 забезпечує попередження поширення горіння підстилкою у випадку застосування роздільно-послідовної подачі компонентів.

3.4 Лабораторні дослідження вогнезагороджувальних властивостей лісової підстилки, обробленої ПУС

Так само, як і для ГУС, у випадку ПУС було застосовано [146] два підходи. Перший передбачає використання ПУС з роздільно-одночасною подачею, унаслідок чого утворюється піна на поверхні зразка; другий – роздільно-послідовну подачу компонентів ПУС з почерговим проникненням компонентів у глибину зразка й утворенням піни в шарах підстилки.

Як піноутворюючі системи було обрано насичені розчини компонентів з піноутворювачем (ПУ) 6%: NaHCO₃ + Al₂(SO₄)₃ (ПУС-1); NaHCO₃ + амофос (ПУС- 2); NaHCO₃ + Fe₂(SO₄)₃ (ПУС-3); вуглеамонійна сіль + Al₂(SO₄)₃ (ПУС-4); вуглеамонійна сіль + амофос (ПУС-5); вуглеамонійна сіль + Fe₂(SO₄)₃ (ПУС-6).

В якості поверхнево-активної речовини (ПАР) використовували піноутворювачі загального призначення «Альпен» і «Морський» і харчовий піноутворювач – екстракт мильного кореня (ЕМК). Спочатку визначили деякі характеристики піни, що утворюється під час взаємодії компонентів ПУС (табл. 3.2). Кількісною характеристикою стійкості піни було обрано час до руйнування половини об'єму піни ($\tau_{1/2}$). При цьому за початковий об'єм піни приймали її максимальний об'єм, що утворюється у випадку зливання компонентів ПУС. Кратність піни розраховували з формули (3.1), як відношення максимального об'єму піни ($V_{\text{макс}}$) до суми об'ємів вихідних рідких компонентів ПУС (V_1, V_2):

$$K = \frac{V_{\text{макс}}}{V_1 + V_2}, \quad (3.1)$$

Детально методику експерименту описано в роботах [10; 69].

Таблиця 3.2 – Характеристики стійкості ($\tau_{1/2}$) та кратності (K) утворюваної піни в різних ПУС з використанням піноутворювачів

ПУ система	ПУ «Альпен»		ПУ «Морський»		ПУ харчовий (ЕМК)	
	К	$\tau_{1/2}$, хв.	К	$\tau_{1/2}$, хв.	К	$\tau_{1/2}$, хв.
ПУС-1	5,2	10	5,2	8	5,2	>20
ПУС-2	5,8	2,1	6,8	1,4	5,6	3,3
ПУС-3	5,4	3,4	7,6	2	5,2	5
ПУС-4	7	4,6	7,8	10	3,4	>20
ПУС-5	7,4	2,2	10,4	3	5	5
ПУС-6	7,2	4	10	3	5	5

З табл. 3.2 видно, що в усіх випадках утворюється низькократна піна. Найбільша кратність досягається при використанні ПУ «Морський». У випадку систем ПУС-5 і ПУС-6 кратність піни досягає 10. Найбільшої стійкості піни (понад 20 хвилин) було досягнуто у випадку використання ПУ ЕМК [180].

Для вивчення впливу обробки ПУС лісової підстилки на поширення полум'я було здійснено дослідження, аналогічні проведені раніше з [136; 146; 148]. При цьому застосовували ПУС із вмістом ПУ 6 %. Подачу компонентів здійснювали за допомогою побутових розпилювачів ОП-3 двома способами: роздільно-одночасним і роздільно-послідовним, використовуючи насичені розчини компонентів ПУС загальним об'ємом 50 мл [155].

Вогнегасну речовину (ВР) наносили на підготовлену підстилку 30x30 см. Розміри оброблюваної ділянки становила 10x30 см. Оброблені ділянки знаходились на відстані 10 см від місця підпалу. Далі підпалювали підстилку та здійснювали візуальне спостереження за просуванням фронту полум'я. Етапи проведення експерименту представлено на рис. 3.6.



а



б

Рис. 3.6. – Етапи лабораторного експерименту з поширення полум'я лісовою підстилкою, обробленою ПУС: а – з роздільно-одночасною подачею; б – з роздільно-послідовною подачею

Лабораторні досліді проводили у двох варіантах – без сушіння обробленої підстилки (час підпалу не більше 5 хвилин після обробки) та із сушінням підстилки протягом 2, 4, 6, і 24 годин за температури 20–25 °С. Відповідні результати представлено в табл. 3.3 і 3.4.

Зіставлення результатів, отриманих для ПУС, з відповідними даними для ГУС засвідчує деяку перевагу більшості ПУС в умовах відсутності сушіння. Однак, якщо відбувається сушіння, навіть протягом двох годин, вогнезахисні властивості ПУС погіршуються. Після чотирьох годин сушіння всі вивчені ПУС не забезпечують вогнезагороджувальних властивостей лісової підстилки.

Таблиця 3.3

Вогнезагороджувальні властивості лісової підстилки, обробленої піноутворюючими системами масою 50 г з питомою витратою 1,7 кг/м² при одночасно-роздільній (одн) і одночасно-послідовній (посл) подачі компонентів без сушіння

ПУ	ПУ «Альпен»		ПУ «Морський»		ПУ (ЕМК)	
	одн	посл	одн	посл	одн	посл
ПУС-1	+	-	-	-	+	-
ПУС-2	-	-	-	+	-	+
ПУС-3	+	+	+	-	-	+
ПУС-4	+	-	+	+	+	+
ПУС-5	-	+	-	+	-	+
ПУС-6	-	-	-	+	-	-

Таблиця 3.4 – Вогнезагороджувальні властивості лісової підстилки, обробленої піноутворюючими системами масою 50 г з питомою витратою 2,5 кг/м² при одночасно-роздільній (одн) і одночасно-послідовній (посл) подачі компонентів без сушіння

ПУ	ПУ «Альпен»	ПУ «Морський»	ПУ (ЕМК)

Спосіб подачі Система	одноча сно	послідо вно	одночасн о	послідов но	одноча сно	послідо вно
ПУС-1	+	-	+	-	+	-
ПУС-2	+	-	-	+	-	+
ПУС-3	+	+	+	-	-	+
ПУС-4	+	-	+	+	+	+
ПУС-5	+	+	-	+	-	+
ПУС-6	+	-	+	+	+	-

+ полум'я не пододало перепону, - полум'я пододало перепону

Це означає, що в умовах сухої вітряної погоди ПУС не виконуватимуть їхніх вогнезахисних функцій при завчасному створенні вогнезагороджувальної смуги. Це, своєю чергою, дозволяє зробити висновок, що для обробки лісової підстилки у випадку низової лісової пожежі перевагу мають ГУС.

3.5 Лабораторні дослідження впливу параметрів ГУС на вогнезагороджувальні властивості

Результати попередніх досліджень показали [147] суттєву перевагу у вогнезахисних властивостях по відношенню до лісової підстилки ГУС у варіанті роздільно-послідовної подачі, порівняно з ПУС, водою й водними розчинами ПУ. Водночас для цієї системи не було проведено досліджень з оптимізації складу ГУС та впливу умов її застосування на вогнезагороджувальні властивості лісової підстилки. Це вимагає проведення експериментальних досліджень вогнезахисної дії ГУС на матеріал лісової підстилки.

Компонентами ГУС на підставі авторських (підрозд. 3.3) і раніше проведених досліджень [78; 46; 173] було обрано рідке скло (гелеутворювач) і хлорид кальцію (каталізатор гелеутворення); чинниками, що впливають на вогнезахисні властивості, – концентрації компонентів ГУС, питому витрату вогнегасного засобу й час сушіння.

Як лабораторний модельний осередок низової лісової пожежі було відтворено лісову підстилку з соснового опаду розміром 10x10 см, завантаженням 25 г, що відповідає питомому завантаженню 2,5 кг/м², і товщиною 5 см. Підстилка була сформована на металевій решітці й підвішена на спеціальній установці (рис. 3.7).

Попередньо зважені модельні осередки пожежі обробляли з розпилювачів ОП-301 розчинами каталізаторів гелеутворення, а потім гелеутворювачем. Після цього знову визначали їхню масу. За різницею мас розраховували масу гелю, що утворився в об'ємі лісової підстилки. Обробку проводили так, щоб маси компонентів ГУС були однаковими.



а



б

Рис. 3.7 – Лабораторні дослідження вогнезахисної дії лісової підстилки, обробленої ГУС за умов прямого впливу полум'я: а – зважування лісової підстилки; б - початок вогневого випробування

Кількісним показником вогнезахисної дії ГУС було прийнято час займання верхньої частини модельного осередку низової лісової пожежі в умовах дії відкритого полум'я. Вогневий вплив здійснювали за допомогою газової горілки. Висота полум'я була на 5 см вища від верхньої частини модельного джерела. При цьому горілку встановлювали так, щоб центр полум'я знаходився на відстані 2 см від краю модельного осередку пожежі.

Вибір параметрів ГУС і обробку отриманих результатів виконано з використанням методів теорії планування експерименту [31]. З урахуванням хімічної сполучуваності компонентів ГУС і умови можливості швидкого гелеутворення було визначено рівні варіювання цих чинників (табл. 3.5) [9].

Таблиця 3.5

Рівні варіювання чотирьох чинників

Чинники	Кодове позначення	Нульовий рівень $x_i = 0$	Інтервал варіювання	Максимальний рівень $x_i = + 1$	Мінімальний рівень $x_i = - 1$	Зоряні точки $x_i = + 2$	Зоряні точки $x_i = - 2$
Концентрація $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$, %, (C_{Si})	x_1	15	5	20	10	25	5
Концентрація CaCl_2 , % (C_{Ca})	x_2	20	7,5	27,5	12,5	35	5
Маса нанесеного покриття, г/см^2 , (m)	x_3	0,7	0,15	0,85	0,55	1	0,4
Час сушіння ЛГМ, хв., (t)	x_4	30	15	45	15	60	0

Експеримент було реалізовано за планом, який дає можливість передбачити значення функції відгуку з дисперсією, однаковою на рівних відстанях від центру плану, тобто було використано центральний композиційний рототабельний план другого порядку.

Реалізацію плану типу 2^4 представлено в табл. 3.6, яку доповнено сімома дослідями в центрі плану й вісьмома дослідями в зоряних точках із плечем, що дорівнює двом інтервалам варіювання.

Виконавши розрахунок значень коефіцієнтів регресії та оцінивши їхню значущість за критерієм Стюдента [31], було отримано рівняння регресії залежності часу займання (T_B) лабораторної ділянки ЛГМ:

$$T_g = 3,922 - 1,729x_1 + 0,762x_2 + 1,38x_3 - 0,48x_4 - 0,79x_1 \cdot x_2 - 0,603x_1 \cdot x_3 + 0,769x_1 \cdot x_4 - 0,396x_2 \cdot x_4 + 0,36x_1^2 + 0,966x_3^2 + 0,46x_4^2, \quad (3.2)$$

або в натуральних координатах

$$T_g = 14,58 - 0,1015 \cdot C_{Si} + 0,5241 \cdot C_{Ca} - 38,84 \cdot m - 0,238 \cdot t - 0,0211 \cdot C_{Si} \cdot C_{Ca} - 0,804 \cdot C_{Si} \cdot m + 0,01025 \cdot C_{Si} \cdot t - 0,00352 \cdot C_{Ca} \cdot t + 0,00144 \cdot C_{Si}^2 + 42,93 \cdot m^2 + 0,0020044 \cdot t^2$$

Таблиця 3.6 – Умови й результати дослідів з дослідження вогнестійкості лісової підстилки, обробленої гелеутворюючою системою ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$)

x_1	x_2	x_3	x_4	T_{Π}	x_1	x_2	x_3	x_4	T_{Π}
-1	-1	-1	-1	4,11	-2	0	0	0	5,5
+1	-1	-1	-1	2,65	+2	0	0	0	4,53
-1	+1	-1	-1	12,1	0	-2	0	0	3,16
+1	+1	-1	-1	1,83	0	+2	0	0	5,5
-1	-1	+1	-1	10,5	0	0	-2	0	2,88
+1	-1	+1	-1	3,5	0	0	+2	0	12
-1	+1	+1	-1	12	0	0	0	-2	6,83
+1	+1	+1	-1	4,8	0	0	0	+2	4
-1	-1	-1	+1	5	0	0	0	0	3,66
+1	-1	-1	+1	5	0	0	0	0	4,16
-1	+1	-1	+1	6,83	0	0	0	0	4
+1	+1	-1	+1	3,6	0	0	0	0	4,81
-1	-1	+1	+1	8	0	0	0	0	4,33

+1	-1	+1	+1	3	0	0	0	0	3,16
-1	+1	+1	+1	9,8	0	0	0	0	3,33
+1	+1	+1	+1	4,4					

Перевірка адекватності отриманої моделі за критерієм Фішера дала позитивний результат.

Аналіз виразу (3.2) показав, що зменшення значення концентрації $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ в ГУС дає найбільший ефект і зумовлює збільшення вогнезахисної здатності покриття. Збільшення маси нанесеного покриття підвищує час вогнезахисної дії. Також встановлено взаємозв'язок між часом сушіння обробленої ділянки та часом вогнезахисної дії. У рамках досліджуваної межі показники часу сушки зменшують час вогнезахисної дії.

Дослідимо вираз (3.2) на екстремум. Запишемо частинні похідні за всіма змінними:

$$\frac{\partial T_6}{\partial x_1} = -1,729 + 0,72 \cdot x_1 - 0,79 \cdot x_2 - 0,603 \cdot x_3 + 0,769 \cdot x_4;$$

$$\frac{\partial T_6}{\partial x_2} = 0,762 - 0,79 \cdot x_1 - 0,396 \cdot x_4;$$

$$\frac{\partial T_6}{\partial x_3} = 1,38 - 0,603 \cdot x_1 + 1,932 \cdot x_3;$$

$$\frac{\partial T_6}{\partial x_4} = -0,48 + 0,769 \cdot x_1 - 0,396 \cdot x_2 + 0,92 \cdot x_4.$$

Прирівнявши праві частини отриманих виразів нулю, отримаємо систему лінійних рівнянь, яка після перетворення набуде вигляду:

$$\begin{cases} 0,72 \cdot x_1 - 0,79 \cdot x_2 - 0,603 \cdot x_3 + 0,769 \cdot x_4 = 1,729 \\ 0,79 \cdot x_1 + 0,396 \cdot x_4 = 0,762 \\ 0,603 \cdot x_1 - 1,932 \cdot x_3 = 1,38 \\ 0,769 \cdot x_1 - 0,396 \cdot x_2 + 0,92 \cdot x_4 = 0,48 \end{cases} \quad (3.3)$$

У результаті розв'язання системи (3.3) за формулами Крамера отримано стаціонарну точку з координатами, що виходять за область визначення моделі (3.2). Максимальне значення функції (3.2) було встановлено шляхом застосування процедури покрокового перебору за всіма

чотирма координатами. Максимальне значення T_B відповідає координатам $(-2,2,2,-2)$ і дорівнює 30,0 хв.

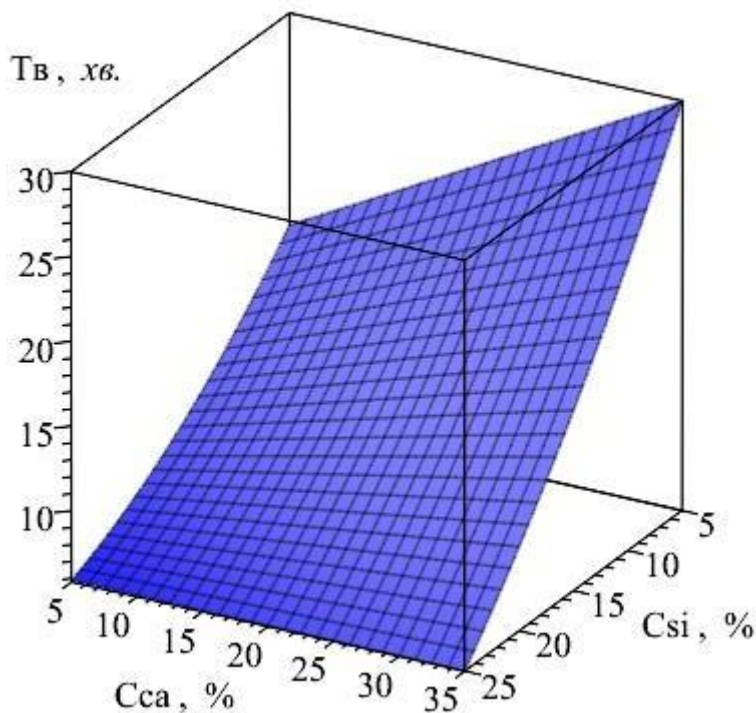


Рис. 3.8 – Графік залежності (2) при $m=1$ г/см² та $t=0$ хв.

У результаті дослідження встановлено, що максимальне значення часу займання (максимальна вогнезахисна ефективність) гелеутворюючої системи ($\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) досягається за мінімальних значень концентрації $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ і часу сушіння обробленої ділянки, а також при максимальних значеннях концентрації CaCl_2 (35%) і маси нанесеного вогнезахисного покриття.

При цьому треба мати на увазі, що концентрацію $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ не можна зменшити нижче за концентрацію 5 %, щоб не втратити здатність до гелеутворення. На рис. 3.8 представлено залежність часу вогнезахисної дії ГУС $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ від концентрацій рідкого скла і хлориду кальцію за фіксованої питомої витрати ГУС 1 г/см² і часі сушіння 0 хв.

На рис. 3.9 представлено залежність часу вогнезахисної дії від питомої витрати ГУС та часу сушіння. Як і слід було очікувати, зі збільшенням маси покриття час вогнезахисної дії збільшується. Видно, що найкращі вогнезахисні властивості для лісової підстилки забезпечує ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %).

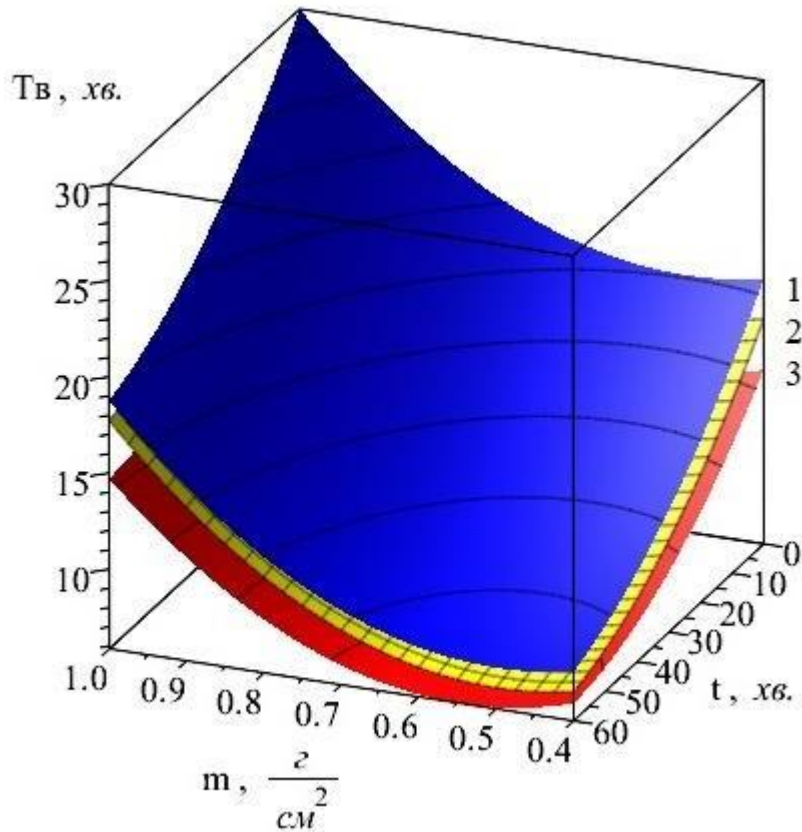


Рис. 3.9 – Графік залежності часу вогнезахисної дії від питомої витрати ГУС та часу сушіння при: 1 – $C_{Si} = 5\%$, $C_{Ca} = 35\%$; 2 – $C_{Si} = 5\%$, $C_{Ca} = 30\%$; 3 – $C_{Si} = 10\%$, $C_{Ca} = 35\%$

Також із рис. 3.9 видно, що під час просушування покриття волога випаровується, тим самим зменшуючи масу ГУС, яка більш ніж на 80 % складається з води, але повного видалення вологи з гелю не відбудеться, оскільки в його складі міститься гігроскопічна речовина – кальцію хлорид. Процес сушки гелю, що містить кальцій хлорид, у природних умовах раніше було вивчено в роботі [175]. Через добу сушіння у природних умовах гель перестає втрачати вологу, а вміст води в ньому зумовлено температурою повітря та його відносною вологою. Цей чинник дає можливість використовувати запроповану ГУС як для оперативного вогнезахисту й керування вогнем під час пожежі, так і для профілактики лісових пожеж у пожежонебезпечну пору року.

На рис. 3.10 різними поверхнями продемонстровано залежність часу вогнезахисної дії від часу сушіння гелевого покриття. Зі збільшенням часу сушіння вогнезахисні властивості ГУС поступово зменшуються, але характер цієї залежності дозволяє припустити, що, досягнувши деякого часу сушіння, вогнезахисні властивості змінюються у незначній мірі (поверхня 3 на рис. 3.10).

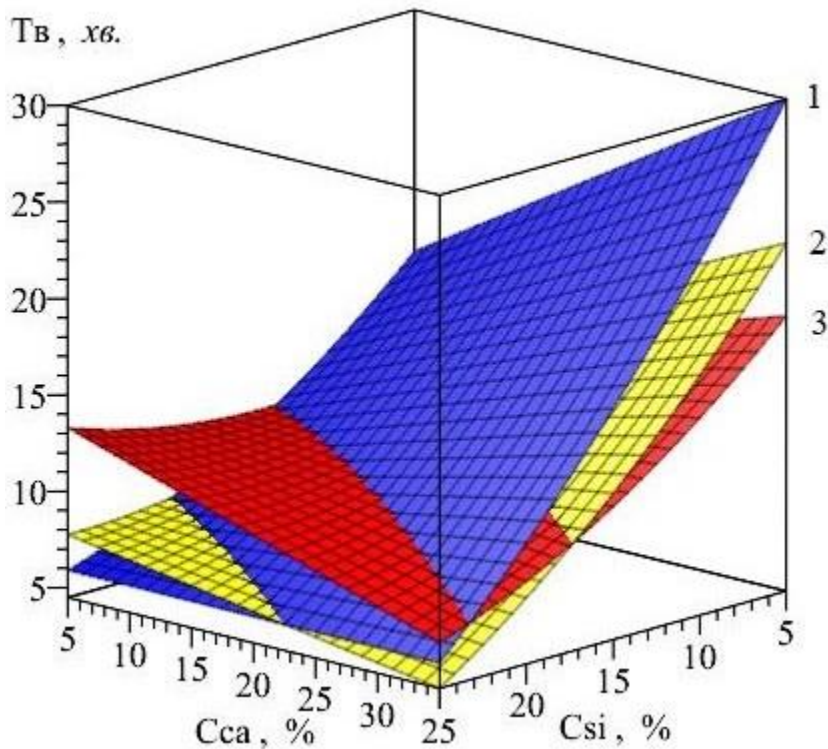


Рис. 3.10 – Графік залежності при: 1 – $m=1 \text{ г/см}^2$, $t=0 \text{ хв.}$; 2 – $m=1 \text{ г/см}^2$, $t=30 \text{ хв.}$; 3 – $m=1 \text{ г/см}^2$, $t=60 \text{ хв.}$

Порівняння результатів, отриманих для ПУС та ГУС дозволяє зробити наступні висновки:

- у випадку нанесення вогнезахисних шарів на лісову підстилку за малий час до підходу фронту лісової пожежі ГУС і ПУС проявляють близькі вогнезахисні властивості;
- у випадку завчасного нанесення вогнезахисних шарів на лісову підстилку ГУС мають перевагу перед ПУС;
- найкращі вогнезахисні властивості для лісової підстилки забезпечує ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %);
- питома витрата ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) дорівнює 1 г/см^2 й забезпечує час вогнезахисної дії 30 хв. навіть у разі тривалого сушіння [143].

3.6 Дослідження вогнезахисних властивостей ГУС на модельному осередку низової лісової пожежі

Раніше розглянуті дослідження вогнезахисних властивостей БВС по відношенню до матеріалу лісової підстилки було проведено (підрозд. 3.5) на малорозмірних модельних джерелах низової лісової пожежі. У таких випадках вогневий вплив на захищені зразки лісової підстилки суттєво відрізняється від реальних умов лісової пожежі. Частково до умов реальної лісової пожежі можна наблизитися, якщо збільшити розміри зразків лісової підстилки й розглянути додаткові чинники, що впливають на процес

поширення полум'я.

Розмір робочої поверхні установки для досліджень низових лісових пожеж у цій лабораторії становить 4,5х2 метрів (рис. 3.11). Крім того, робоча поверхня дозволяє змінювати її кут нахилу, що імітує рельєф. Ще однією особливістю цієї лабораторії є можливість створення повітряних потоків у межах від 0 до 4 м/с, що імітує приповерхневий вітер.

Було проведено [142] експериментальні дослідження з визначення вогнезахисної дії покриття, отриманого з використанням ГУС 5 % $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + 35\% \text{CaCl}_2$, нанесеного на лісову підстилку із соснового опаду розміром 100х50 см, завантаженням 1,25 кг, що відповідає питомому завантаженню $2,5 \text{ кг/м}^2$, і товщиною 5 см. Склад лісової підстилки та її товщину було обрано близькими до досліджень на модельному джерелі низової лісової пожежі малих розмірів (підрозд. 3.5). Відмінність у складі полягала у включенні до складу хвойної лісової підстилки шишок і дрібних гілок в обсязі 20 % від загальної ваги, що більшою мірою відповідало реальній підстилці в лісах Харківської області.

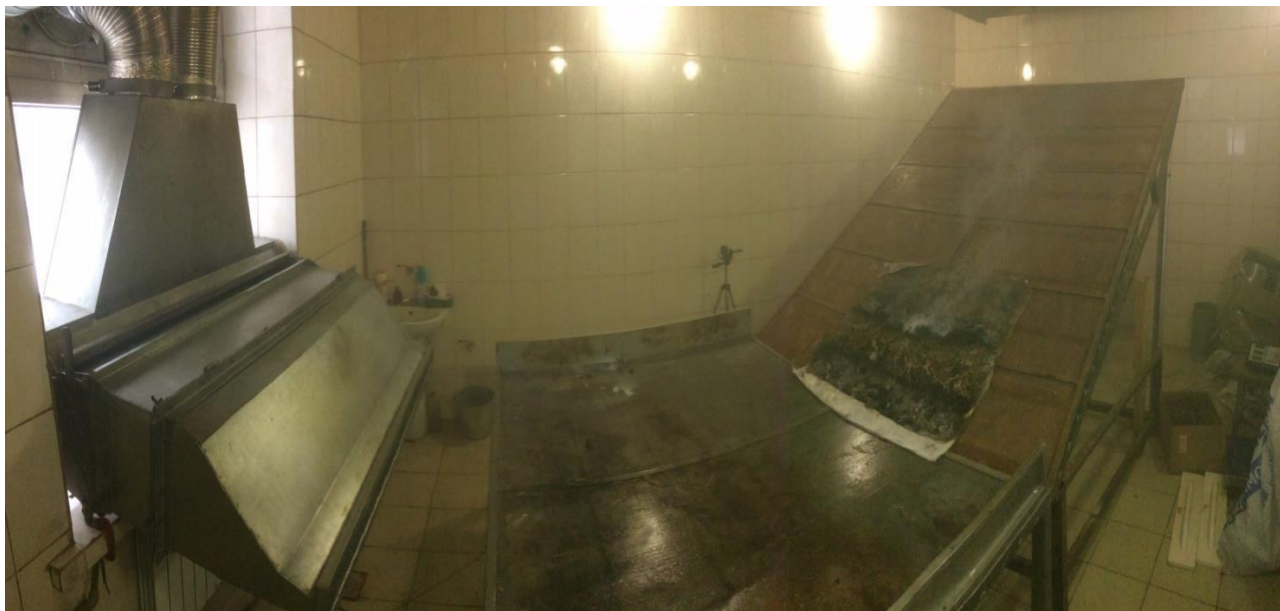


Рис. 3.11 Загальний вигляд установки для імітації потоку повітря з різною швидкістю та різним рельєфом

Приміщення, в якому проводили експеримент, було обладнане системою припливної й витяжної вентиляції та системою дренчерного пожежогасіння. З метою проведення експерименту було використано установку для створення вітрових потоків різної швидкості для моделювання ландшафтних пожеж, а також стіл зі змінним кутом нахилу. Стіл висотою 700 мм над підлогою складався із двох зварених з металу частин, одна з яких – горизонтальна, розміром (2000х2000) мм зі зйомними бортами 200 мм, друга – з функцією підйому, розміром (2500х2000) мм, що дало можливість

імітувати рельєф під певним кутом. Кут нахилу, який можна встановити завдяки наявності такої похилої стільниці, – від 0 до 60 градусів.

У ході експерименту також було використано систему імітації потоків повітря, яка мала розмір 1360x300 мм і була встановлена навпроти стола на висоті 750 мм і на відстані від підстилки 500 мм. Корпус цієї установки має: вентилятор, ресивер, решітку, сопло, що звужується. Решітка забезпечує рівномірний потік на вході в сопло. Перед решіткою встановлений ресивер, у який подається повітря від двох вентиляторів. Також у корпусі використовуваної системи була встановлена дросельна заслінка, яка знижує швидкість потоку повітря шляхом перекриття прохідного отвору.

Основні параметри проведення експерименту:

- швидкість потоку повітря на виході – від 0 до 4 м/с;
- розмір підстилки – 1000x500 мм;
- товщина шару підстилки – 50 мм;
- маса хвої – 1250 г;
- ширина обробленої ділянки – 20 см;
- час сушіння обробленої ділянки – 30 хв. (центр плану математичного планування експерименту);
- кут похилої поверхні 0°/10°/20°/30°/40°;
- склад підстилки: суха соснова хвоя, дрібні гілочки й шишки.

Для виміру швидкості потоку вітру використовували анемометр [37]. Використовувана ГУС – 5 % $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + 35\% \text{CaCl}_2$.

Проведення експерименту

На підготовлену підстилку розміром 1000x500 мм було нанесено вогнезахисне покриття із ГУС шириною 200 мм на всю глибину підстилки (5 см) роздільно-послідовним способом подачі. Компоненти подавали за допомогою ручних оприскувачів ОП-301 з питомою витратою ГУС-1; 0,85; 0,55; 0,4 г/см². Близький край підстилки шириною 10 см обливали бензином і підпалювали.

Експеримент проходив у кілька етапів на рівній поверхні та з кутами нахилу поверхні, які імітували рельєф місцевості. На кожному з етапів за допомогою установки створювали швидкість потоку повітря від 0 до 4 м/с (рис. 3.12). У ході експерименту оцінювали глибину прогорілої частини обробленої ділянки підстилки після повного самозагасання горючих матеріалів. Також фіксували можливість проходження гетерогенного горіння в шарах обробленої ділянки й можливість „перекидання” полум'я через оброблену ділянку на горючі матеріали [157].



Рис. 3.12 – Установка для імітації потоку повітря з різною швидкістю

Під час проведення експерименту було встановлено, що за підвищення кута нахилу поверхні збільшується інтенсивність впливу полум'я на підстилку, відстань по вертикалі між полум'ям і підстилкою зменшується і зростає ризик перекидання полум'я через оброблену смугу 20 см. Результат експерименту визнавали негативним, якщо оброблена ділянка ЛГМ прогорала хоча б на 5 см.

Зі збільшенням швидкості потоку повітря до 3 м/с і вище на похилій поверхні полум'я нахиляється (притискається) до поверхні ЛГМ і в деяких випадках переходить у горіння підстилки під шаром гелю. У випадку горизонтальної поверхні при швидкості потоку вітру 4 м/с полум'я також притискається до поверхні ЛГМ і горіння в деяких випадках переходить у гетерогенне горіння підстилки під шаром гелю.

Результат експерименту представлено в табл. 3.7. Значок „+” означає, що полум'я не пододало вогнезахисну смугу і прогорання обробленої смуги не більше 1 см; „±” – вогнезахисна смуга прогоріла на (1 – 5) см, але полум'я не подолало всю смугу; „-” – полум'я пододало вогнезахисну смугу. Досліди не проводились за витрат ГУС більших, ніж ті, що дали позитивний результат у попередніх дослідах з меншими витратами [141; 142].

Таблиця 3.7 – Результати залежності питомих витрат ВР від нахилу поверхні установки та швидкості потоку повітря

		Швидкість потоку повітря 1–4 м/с				
Витрата ВР		0,4	0,55	0,7	0,85	1
Кут нахилу поверхні		0	10	20	30	40
0		>1 м/с	>2 м/с	>4 м/с	>4 м/с	>4 м/с
10		>1 м/с	>2 м/с	>4 м/с	>4 м/с	>4 м/с
20		>1 м/с	>2 м/с	>3 м/с	>4 м/с	>4 м/с
30		-	>1	>2 м/с	>3 м/с	>4 м/с
40		-	-	>1 м/с	>2 м/с	>4 м/с
$\alpha, ^\circ$	$\Phi, \text{г/см}^2$					
	0,4	0,55	0,7	0,85	1	
V= 0 м/с						
0	+	+	+	+	+	
10	+	+	+	+	+	
20	+	+	+	+	+	
30	-	±	+	+	+	
40	-	±	+	+	+	
V= 1 м/с						
0	+	+	+	+	+	
10	+	+	+	+	+	
20	+	+	+	+	+	
30	-	±	+	+	+	
40	-	±	+	+	+	
V= 2 м/с						
0	±	+	+	+	+	
10	±	+	+	+	+	
20	-	±	+	+	+	
30	-	-	+	+	+	
40	-	-	+	+	+	
V= 3 м/с						
0	±	±	+	+	+	
10	-	±	+	+	+	
20	-	-	+	+	+	
30	-	-	+	+	+	

40	–	–	+	+	+
	V= 4 м/с				
0	–	–	+	+	+
10	–	–	+	+	+
20	–	–	+	+	+
30	–	–	+	+	+
40	–	–	+	+	+

На підставі наведених у табл. 3.7 відомостей доходимо висновку, що оброблена ГУС з витратою $0,7 \text{ г/см}^2$ лісова підстилка надійно забезпечує непоширення полум'я в інтервалі швидкостей повітряного потоку від 0 до 4 м/с при кутах нахилу поверхні до 40° [156].

Також з використанням лабораторної установки було досліджено вплив іскор і розпечених фрагментів деревини на займання незахищеної горизонтальної лісової підстилки за різних швидкостей повітряного потоку. Такі дослідження показали, що від дрібних іскор вибрана лісова підстилка не загорається за швидкостей повітряного потоку від 0 до 4 м/с. Одночасно було встановлено, що за наявності в лісовій підстилці сухої трави ($\sim 5\%$) в $\sim 25\%$ випадків траплялось локальне займання яке за швидкостей повітряного потоку від 0 до 2 м/с переходило у стійке горіння. За швидкостей повітряного потоку 3–4 м/с стійке горіння не спостерігалось, що зумовлено охолоджувальним ефектом повітряного потоку [167].

У випадку подачі розпечених фрагментів деревини (тліючі гілочки довжиною 1–2 см) на поверхню лісової підстилки, як без сухої трави, так і з її наявністю, спостерігали поодинокі випадки займання лісової підстилки за всіх швидкостей повітряного потоку.

У зв'язку з цим було досліджено вплив нанесення шару гелю на поверхню лісової підстилки для забезпечення вогнезахисту від дії іскор і фрагментів тліючих гілочок. Результати цих досліджень показали, що нанесення шару гелю з питомою витратою $0,2 \text{ г/см}^2$ достатньо для захисту від впливу іскор і фрагментів тліючих гілочок за всіх вивчених швидкостей вітрового потоку.

3.7 Дослідження вогнезахисних властивостей ГУС $5\% \text{ Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + 35\% \text{ CaCl}_2$ на модельному осередку низової лісової пожежі в реальних умовах

Для дослідження впливу ГУС на вогнезахисні властивості лісової підстилки в реальних умовах [140] було вибрано систему $5\% \text{ Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + 35\% \text{ CaCl}_2$, яка показала найкращі результати в лабораторних дослідженнях, та ділянку соснового лісу з переважно хвойною лісовою підстилкою товщиною 5 см. За необхідності товщину шару лісової підстилки штучно коригували за рахунок опалої хвої із сусідніх ділянок. Дослідження

проводили як на горизонтальних ділянках, так і на похилих – із кутом нахилу 30°.

Натурні експерименти проводили після 17 днів стійкої спекотної погоди за температури 28–33 °С, відносної вологості повітря 35 %, атмосферного тиску 747 мм рт. ст., за швидкості вітру 2–5 м/с.

Обробку ГУС здійснювали в такий спосіб. Загальна ширина захищеної ділянки становила 4 м. Її було поділено на ділянки шириною 0,5 м, які обробляли ГУС або водою з питомими витратами 1; 0,7; 0,85; 0,55; 0,4 г/см². Отже, довжина кожної вогнезахищеної ділянки становила 0,5 м. У дослідах було обрано дві ширини вогнезахищеної ділянки – 0,1 м і 0,2 м. Подальші досліди показали, що за ширини вогнезахищеної ділянки 0,1 м у деяких дослідах фронт низової лісової пожежі подолав оброблені ділянки навіть при питомих витратах ВР 1 г/см². Тому в подальшому дослідження проводили за ширини вогнезахищеної ділянки 0,2 м. На рис. 3.13 представлено підготовчі етапи дослідження з гасіння хвойної лісової підстилки в реальних умовах.



а)



б)

Рис. 3.13 – Етапи підготовки ділянок дослідження з гасіння хвойної лісової підстилки в реальних умовах: а) на рівній місцевості; б) на схилі 30°

Загороджувальну смугу було створено ручними пристроями розпилення ОП-301 послідовно-роздільним способом подачі компонентів ГУС (CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %)) на всю товщину підстилки з різними значеннями питомої витрати: (1; 0,7; 0,85; 0,55; 0,4) г/см². Витрату визначали ваговим методом, шляхом зважування

розпилювачів. Було обрано такі варіанти часу сушіння: 0,5 години, 2 години, 4 години.

Також для досліджень було представлено необроблені ділянки та ділянки, які обробляли лише водою (без застосування ГУС) з такими самими, як у випадку ГУС, питомими витратами.

Підпал здійснювали з навітряного боку на відстані 20 см від загороджувальної смуги за допомогою бензину, нанесеного на кромку підстилки. Після підпалу спостерігали за вогнезахисною дією обробленої ділянки. На рис. 3.14 представлено зовнішній вигляд підстилки під час та після завершення експерименту.

Відповідні результати експериментів представлено в табл. 3.8–3.11.



а)



б)

Рис. 3.14 – Зовнішній вигляд лісової хвойної підстилки: а) під час проведення дослідження; б) після завершення експерименту

Таблиця 3.8 – Залежність вогнеперешкоджувальних властивостей ділянок лісової підстилки від питомої витрати води (Φ) і часу сушіння (t) для рівної поверхні

t , годин	Φ , г/см ²				
	0,4	0,55	0,7	0,85	1,0
0,5	-	+	+	+	+
2	-	-	-	+	+
4	-	-	-	-	-

+ фронт низової лісової пожежі не пройшов;

- фронт низової лісової пожежі пройшов

Таблиця 3.9 – Залежність вогнеперешкоджувальних властивостей ділянок лісової підстилки від питомої витрати води (Φ) і часу сушіння (t) для кута нахилу поверхні 30°

t, годин	Φ , г/см ²				
	0,4	0,55	0,7	0,85	1,0
0,5	-	-	+	+	+
2	-	-	-	-	+
4	-	-	-	-	-

+ фронт низової лісової пожежі не пройшов;

- фронт низової лісової пожежі пройшов

Таблиця 3.10 – Залежність вогнеперешкоджувальних властивостей ділянок лісової підстилки від питомої витрати ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) (Φ) і часу сушіння (t)

t, годин	Φ , г/см ²				
	0,4	0,55	0,7	0,85	1,0
0,5	-	+	+	+	+
2	-	+	+	+	+
4	-	-	+	+	+

+ фронт низової лісової пожежі не пройшов;

- фронт низової лісової пожежі пройшов

Після цього було проведено експерименти, у яких ділянки лісової підстилки поза областю обробки ГУС одночасно піддавали впливу теплового випромінювання та іскор (досліди проводили аналогічно з описаними в підрозд. 3.6). Експерименти засвідчили, що в багатьох випадках відбувалося займання лісової підстилки відразу за зоною її обробки ГУС. Для з'ясування умов недопущення займання лісової підстилки при одночасній дії теплового випромінювання та іскор було проведено додаткові дослідження. Вони показали, що нанесення ГУС CaCl_2 (35 %)+ $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) з питомою витратою 0,2 г/см² забезпечує відсутність займання лісової підстилки при одночасній дії теплового випромінювання та іскор.

Таблиця 3.11 – Залежність вогнеперешкоджувальних властивостей ділянок лісової підстилки від питомої витрати ГУС CaCl_2 (35 %)+ $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) (Φ) і часу сушіння (t) для кута нахилу поверхні 30°

t, годин	Φ г/см ²				
	0,4	0,55	0,7	0,85	1,0
0,5	-	-	+	+	+
2	-	-	+	+	+
4	-	-	+	+	+

+ фронт низової лісової пожежі не пройшов;

- фронт низової лісової пожежі пройшов

Аналіз результатів експерименту показано у роботі [153]. Ділянки лісової підстилки, оброблені водою, зберігають вогнеперешкоджувальні властивості короткий час. Навіть за питомої витрати води 1,0 г/см² вогнеперешкоджаючі властивості втрачаються через чотири години. Ділянка, що знаходилася на рівній місцевості хвойної підстилки й була оброблена ГУС в кількості 0,4 г/см², прогоріла повністю. Інші ділянки, оброблені ГУС із питомою витратою 1; 0,7; 0,85; 0,55 г/см², показали надійні вогнезахисні властивості, якщо суміші було нанесено не раніше, ніж за дві години до підходу фронту пожежі. Водночас ділянки під нахилом 30° , оброблені ГУС так само, як і на рівній поверхні, показали інші результати. Ділянки, оброблені ГУС у кількості 0,4 та 0,55 г/см², прогоріли повністю, що свідчить про недостатні вогнезахисні властивості ГУС. Ділянки, оброблені ГУС з питомою витратою 1; 0,7; 0,85 г/см², забезпечили зупинення фронту низової пожежі. Тобто питомої витрати ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %), рівної 0,7 г/см², достатньо для створення протипожежного бар'єру на час до чотирьох годин. Для запобігання займання ділянки лісової підстилки за зоною основної вогнезахисної смуги під одночасним впливом теплового випромінювання та іскор потрібно нанести ГУС CaCl_2 (35 %)+ $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) з питомою витратою 0,2 г/см².

РОЗДІЛ 4

ГАСІННЯ НИЗОВИХ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ БІНАРНИХ ВОГНЕГАСНИХ СИСТЕМ ІЗ РОЗДІЛЬНИМ ПОДАВАННЯМ КОМПОНЕНТІВ

4.1 Токсикологічні, екологічні та експлуатаційні характеристики компонентів ГУС і гелеподібних шарів

Найважливішим складником для успішного впровадження результатів наукових досліджень у практику є складання інструкцій застосування нових технічних засобів і матеріалів. Також для успішного впровадження нових розробок необхідно знати експлуатаційні властивості речовин, матеріалів і використовуваних технічних засобів. Важливо враховувати вплив використовуваних речовин і продуктів, які утворюються при їх використанні, на людину й навколишнє середовище. Також одним із найважливіших чинників у впровадженні нових технологій є економічний.

Використовуючи вогнегасні речовини, необхідно забезпечити такі умови, які дозволяють забезпечити вміст їх у навколишньому середовищі нижче від установлених значень ПДК. З метою пожежогасіння припустимо використовувати речовини не нижче 3 і 4-го класів небезпеки [5]. Ще одним важливим моментом є забезпечення відсутності небезпечних продуктів, які можуть утворюватися в умовах зберігання або застосування ВР.

З метою гасіння низових лісових пожеж запропоновано застосовувати ГУС. Як гелеутворювач запропоновано використовувати водний розчин полісилікату натрію ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, рідке скло), який належить до III класу небезпеки. Рідке скло використовують як в'язучий компонент, інгібітор корозії сплавів заліза, як основний компонент силікатного клею, сировину для отримання інших силікатів і силікагелю. Фізико-хімічні властивості виготовленого рідкого скла установлюють залежно від сфери застосування. Найпоширенішим видом рідкого скла є концентрат, який використовують у будівництві. Концентрат має лужну реакцію середовища ($\text{pH} \geq 12$). Він може викликати подразнення кожних покрівів. Також небезпечним є вдихання аерозолів цієї речовини й потрапляння їх в очі. З огляду на це необхідно використовувати захисний одяг, респіратори, окуляри або маски для захисту очей. Раніше проведені дослідження [5] засвідчили відсутність суттєвої корозії сталей і сплавів алюмінію, що їх використовують у виробництві пожежної техніки, під дією розчинів рідкого скла. Розчини рідкого скла також не викликають суттєвих пошкоджень матеріалів, використовуваних для виробництва пожежних рукавів.

Під час змішування компонентів ГУС відбувається реакція:



Продуктом такої реакції є нерозчинний у воді полісилікат кальцію, який відноситься до 4-го класу хімічної небезпеки. Його склад є близьким до складу

глин, що забезпечує відсутність негативних екологічних наслідків. Ще одним із продуктів реакцій є малотоксична речовина – хлорид натрію.

Концентровані розчини рідкого скла мають гарантійний термін зберігання 12 місяців. З метою пожежогасіння, без суттєвого погіршення вогнегасних і вогнезахисних характеристик, можна використовувати вихідний розчин рідкого скла з терміном збереження до двох років. Розбавлені розчини цієї речовини зберігають їхні експлуатаційні властивості протягом меншого часу (табл. 4.1), тому доцільно готувати робочий розчин рідкого скла з вихідного концентрату на місці використання.

Час збереження працездатності розчинів рідкого скла значною мірою залежить від недопущення контакту з атмосферним повітрям. Це зумовлено поступовою полімеризацією таких розчинів унаслідок взаємодії з вуглекислим газом, що міститься в повітрі.

Таблиця 4.1 – Залежності часу збереження експлуатаційних властивостей водних розчинів полісилікату натрію (τ) від їх концентрації (ω) при використанні з метою пожежогасіння [5]

ω , мас.%	4	5	10	20
τ , діб	60	200	280	450

Робочі розчини рідкого скла готують з вихідного концентрату шляхом його розбавлення водою. Для розбавлення можна використовувати водопровідну, річкову й технічну воду. В останньому випадку вміст солей дво- і тривалентних металів у ній не має перевищувати 0,3 %. Розчин полісилікату натрію готують об'ємним методом – до заданого об'єму води приливають необхідний об'єм рідкого скла. Нижче наведено об'єми рідин, необхідні для приготування 1 м³ робочого розчину рідкого скла для ГУС CaCl₂ (35 %) + Na₂O·2,7SiO₂ (5 %) (табл. 4.2). Прийнято, що вміст Na₂O·nSiO₂ у вихідному розчині становить 36 %, а щільність цього розчину – 1350 кг/м³.

Таблиця 4.2 – Об'єми вихідних розчинів (V) і води V (H₂O), необхідні для приготування робочих розчинів ГУС CaCl₂ (35 %) + Na₂O·2,7SiO₂ (5 %)

Компонент ГУС	V, м ³	V (H ₂ O), м ³
Na ₂ O · 2,7SiO ₂	0,108	0,892
CaCl ₂	0,802	0,198

У зв'язку з високою в'язкістю вихідного розчину рідкого скла його необхідно перемішувати будь-яким методом протягом двох хвилин.

Як каталізатор гелеутворення використовують насичений розчин хлориду кальцію (42 % при 20 °C). Щільність цього розчину – 1403 кг/м³. У

табл. 4.2 наведено об'єми насиченого розчину (V) і води V (H₂O), необхідні для приготування 1 м³ робочого розчину CaCl₂.

Припустімо застосовувати хлорид кальцію будь-якої хімічної й технічної класифікації, зокрема й відходи виробництва, що містять цю речовину. Добре зарекомендували себе як каталізатори гелеутворення розчини хлориду кальцію, що їх скидають содові заводи (під час виробництва соди за аміачним методом) [154]. Ці розчини можна використовувати без подальшої корекції складу. Виготовляючи насичений розчин із твердого кристалогідрату хлориду кальцію, до необхідного об'єму води додають приблизно такий само об'єм CaCl₂. Перемішування здійснюють не менше п'яти хвилин. У випадку, якщо розчиниться весь хлорид кальцію, додають ще десятю частину від вихідної кількості CaCl₂. Для приготування та збереження розчинів хлориду кальцію необхідно використовувати місткості з кислотостійких сплавів або пластмас. Ці розчини слід зберігати в закритих місткостях. Термін зберігання в таких умовах не обмежений.

У зв'язку з корозійною активністю розчинів хлориду кальцію все обладнання, виготовлене з нестійких до корозії матеріалів, яке підлягало впливу такого розчину, має бути оброблене. Для цього його спочатку необхідно промити водою, потім нейтралізувати 1 % розчином рідкого скла або соди. Остаточо проводять ще одну промивку водою.

Хлорид кальцію належить до речовин III класу небезпеки. Характер середовища водних розчинів CaCl₂ кислий, рН≈5. Такі розчини викликають слабку подразнювальну дію на шкірні покриви, небезпечні у випадку потрапляння в дихальні шляхи й особливо в очі. Захист органів дихання та шкірних покривів такий самий, як і для розчинів рідкого скла.

4.2 Засоби подачі вогнегасних ГУС

Однією з умов успішного використання ГУС, з метою гасіння лісових пожеж є подача компонентів системи в розпиленому вигляді. З цією метою раніше було розроблено й виготовлено автономні установки гасіння гелеутворюючими системами АУГГУС (рис. 4.1) і АУГГУС-П (рис. 4.2) [5].

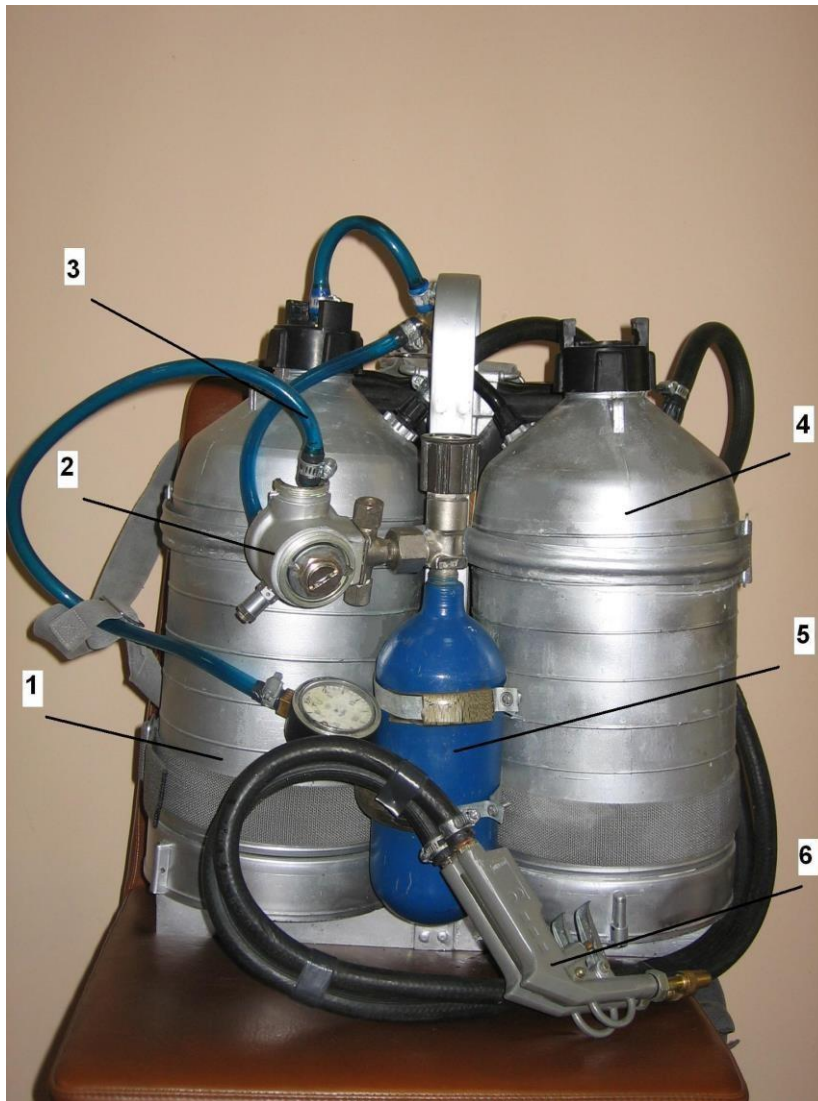


Рис. 4.1 – Зовнішній вигляд автономної установки пожежогасіння АУГГУС: 1 – ємність із розчином гелеутворювача; 2 – редуктор; 3 – система гнучких шлангів; 4 – ємність із розчином каталізатора гелеутворення; 5 – балон зі стисненим повітрям; 6 – стволи з пістолетними рукоятками

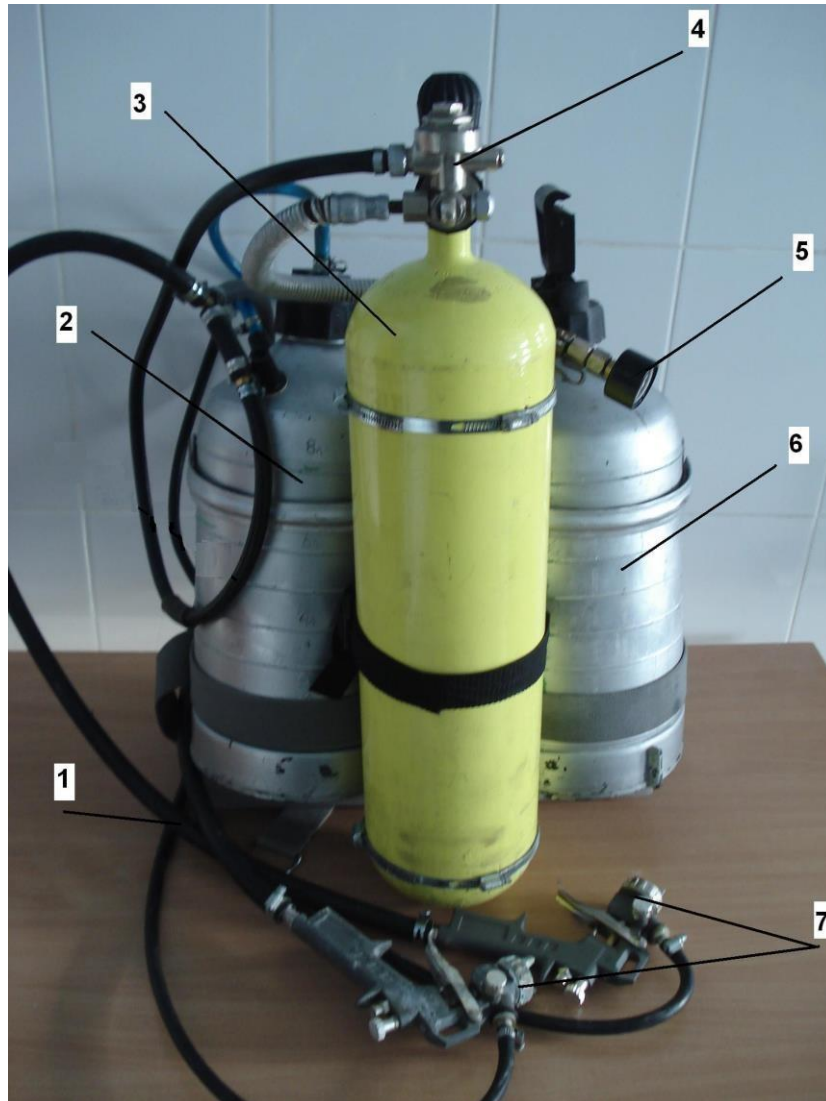


Рис. 4.2 – Зовнішній вигляд автономної установки пожежогасіння АУГГУС-П: 1 – система гнучких шлангів; 2 – ємність із розчином гелеутворювача; 3 – балон зі стисненим повітрям; 4 – редуктор; 5 – манометр високого тиску; 6 – ємність із розчином каталізатора гелеутворення; 7 – форсунки пневморозпилювання з пістолетними рукоятками

В якості каркасу обох установок було використано готовий каркас від ізолюючого протигаза фірми „Drager”. До нього кріпили дві пластмасові місткості на 8 літрів (корпусу оприскувачів „Туман-8”) і балон зі стисненим повітрям. Для установки АУГГУС використовували балон об’ємом 2 літри, а для установки АУГГУС-П – балон (ВМК 6,8 – 139-300) об’ємом 6,8 літра. Для забезпечення в місткостях з компонентами ГУС постійного тиску, що дорівнює 0,3 МПа, використовували редуктор прямої дії. В установці АУГГУС-П стиснене повітря так само подавали в розпилювачі під тиском 0,3 МПа. Компоненти ГУС і повітря подавали за допомогою системи гнучких шлангів із внутрішнім діаметром 5–8 мм. Обидві установки мають регульовану витрату компонентів ГУС, що дорівнює 5–12 кг/хв. З метою забезпечення швидкого відкриття й закриття кранів для подачі рідин і газів використовували пристрої

пістолетного типу, які забезпечували можливість як окремої, так і спільної подачі компонентів ГУС. Загальна маса компонентів ГУС в обох установках становить 12 кг (по 6 кг гелеутворювача й каталізатора гелеутворення). Загальна маса повністю заправлених установок АУГГУС і АУГГУС-П – 20 і 28 кг відповідно. Максимальна дальність подачі ВР для установки АУГГУС становить 5 м, а для АУГГУС-П – 7 м.

Установка АУГГУС забезпечує гідравлічне розпилювання ВР, а АУГГУС-П – пневматичне. В останній установці використовували форсунки пневморозпилювання СО-71, які дозволяли варіювати кут факела розпиленого струменя в межах 40–90 градусів. Ще однією особливістю установки АУГГУС-П є можливість її використання разом з ізолюючим протигазом. Запасу стисненого повітря в балоні вистачає на розпилювання ВР і дихання протягом не менше 20 хвилин.

Підготовка установок до роботи полягає в заповненні їх через верхні заливні горловини місткостей рідкими компонентами ГУС і закачуванні повітря в балон високого тиску до тиску 20 МПа.



Рис. 4.3 – Зовнішній вигляд установки МУРПК-ГЛП: 1 – ємність для компонентів бінарної системи; 2 – балон зі стиснутим повітрям; 3 – металева платформа з каркасом; 4 – редуктор; 5 – лінії подачі компонентів; 6 – насадки

За допомогою цих установок можна створити вогнезахисну смугу малих розмірів. Їх використовували під час проведення натурних випробувань в умовах лісу.

Для створення вогнезахисної смуги великих розмірів було розроблено й виготовлено мобільну установку з роздільною подачею компонентів для гасіння лісових пожеж (далі – МУРПК-ГЛП).

Установка належить до засобів гасіння пожеж в екосистемах шляхом утворення протипожежного бар'єру за допомогою компонентів гелеутворюючої системи. Може використовуватись для безпосереднього гасіння фронту полум'я, а також для попередження виникнення та поширення горіння.

Розчини компонентів системи заливаються у окремі ємності та за допомогою витискача (повітрям високого тиску) через понижуючий редуктор подаються на захищувану поверхню. Установка використовувалась шляхом встановлення її на рухомий транспорт для більшої маневреності.

Установка складається:

1. Ємність для компонентів бінарної системи.
2. Балон зі стисненим повітрям (витискач).
3. Металева платформа з каркасом.
4. Редуктор.
5. Лінії подачі компонентів.
6. Насадки.

Таблиця 4.3 – Техічні характеристики установки МУРПК-ГЛП

Маса установки (заправлена/не заправлена)	230 / 125 кг
Ємність балонів	2 балони по 50 л
Габаритні розміри	700x700x1000 мм
Робочий тиск	3 бар
Дальність подачі компактного струменя	8 м
Дальність подачі розпиленого струменя	6 м
Форсунки	6 одиниць, плоскорадіальні

4.3 Моделювання процесу гасіння низових лісових пожеж середньої й високої інтенсивності за допомогою бінарних вогнегасних систем із роздільним подаванням компонентів ГУС

Для гасіння низових лісових пожеж низької інтенсивності доцільно застосовувати активні методи гасіння. До активних методів належать нахльостування або закидання ґрунтом кромки низової лісової пожежі, гасіння водою або розчинами хімікатів [123]. Методи нахльостування або закидання ґрунтом кромки низової лісової пожежі не потребують застосування важкої техніки й доставки вогнегасних речовин, однак вони вимагають залучення значної кількості персоналу. Гасіння водою низової лісової пожежі доцільно застосовувати у випадку близької наявності джерел води. Розчини хімікатів, хоча й можуть спростити і прискорити процес гасіння, але різко його здорожують. Усі перераховані методи гасіння добре відпрацьовані. У деяких випадках доцільно не гасити низові лісові пожежі, а контролювати (управляти) пожежами з урахуванням їх різних наслідків. Таким чином, сучасні погляди на роль вогню у лісі з виключно шкідливого явища змінюються і активна боротьба

дещо стухає [101]. До цього вдаються, якщо така пожежа не пошкоджує наявну рослинність і немає передумов до збільшення її інтенсивності.

Значно складнішою проблемою є гасіння низових лісових пожеж середньої та високої інтенсивності. Такі лісові пожежі вимагають обов'язкової реакції, оскільки вони можуть завдати суттєвих збитків деревостою і є ймовірність переходу їх у верхову пожежу. Наявні на сьогодні методи гасіння таких пожеж мають суттєві недоліки (розд. 1).

Вибір конкретного методу гасіння низової лісової пожежі середньої та високої інтенсивності зумовлено значною кількістю умов: погодою, рельєфом місцевості, видом ґрунтів, характером деревостою, наявністю джерел водопостачання, наявністю та станом доріг і просік. Так, використання важкої техніки обмежене складним рельєфом місцевості (гори, глибокі яри), значною щільністю стояння великих дерев, наявністю кам'янистих ґрунтів, великим часом доставки при пожежах на віддалених ділянках лісу.

Використання для гасіння води й розчинів хімікатів має такі самі обмеження, як і у випадку низових пожеж низької інтенсивності. Використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів ГУС для гасіння лісових пожеж середньої та високої інтенсивності має схожі риси з гасінням водою й водними розчинами. Перевага використання ГУС для гасіння лісових пожеж середньої та високої інтенсивності полягає в суттєвому зменшенні необхідної кількості ВР. Це зумовлено зменшенням втрат ВР за рахунок стікання й більшими вогнезахисними властивостями ГУС.

Математичне моделювання широко використовують для опису й оптимізації різноманітних процесів. Особливо часто це роблять, досліджуючи процеси, які з тих чи тих причин важко відтворити експериментально, зокрема й лісові пожежі та їх гасіння.

Теоретичні моделі гасіння розглядають механізм гасіння на рівні аналізу основних механізмів припинення горіння. Для їх реалізації необхідно знати основні фізичні й хімічні характеристики процесу горіння, відповідні властивості ВР і взаємодій горючих матеріалів з вогнегасними речовинами. На сьогодні фізичні моделі, з огляду на їхню складність, розроблено тільки для вузького кола завдань. Однією з найбільших перешкод у створенні теоретичної моделі гасіння є те, що два з основних механізмів припинення горіння – ізоляція і хімічне інгібування – важко підлягають кількісному опису. Також значні труднощі виникають при оцінці втрат ВР у процесі гасіння.

Емпіричні моделі є результатом узагальнення експериментальних даних. Вони зазвичай не передбачають розгляд фізичних і хімічних складників процесу горіння та взаємодії ВР з горючими матеріалами. Удосконалення емпіричних моделей відбувається шляхом введення в них елементів фізичних моделей і отримання таким чином напівемпіричних моделей.

На думку авторів роботи [26], дотепер не розроблено загальноприйнятих принципів й кількісних закономірностей, які дозволяють апріорно розрахувати умови пожежогасіння. Це пов'язано з надзвичайним розмаїттям чинників, що визначають процес розвитку пожежі та її гасіння. Більшість розроблених на сьогодні моделей пожежогасіння мають напівемпіричний характер [51].

В монографії використано найпростіші математичні моделі гасіння

лісових пожеж, які базуються на властивостях ВР і враховують багату практику гасіння лісових пожеж, яка відображена в нормативних документах ДСНС України, Державного комітету лісового господарства України й Законі України «Про пожежну безпеку» [57; 123; 126].

Наявні на сьогодні нормативи не враховують появу нових засобів пожежогасіння, до яких належать, зокрема, ГУС. Вони мають суттєві відмінності в деяких характеристиках, порівняно з іншими ВР. Для них характерні низькі втрати речовини за рахунок стікання рідини з вертикальних і похилих поверхонь. Крім того, вони виявляють високі оперативні вогнезахисні властивості. Ці особливості ГУС мають бути враховані в математичній моделі гасіння пожеж з їх допомогою.

Оскільки ГУС не мають суттєвих переваг порівняно з водою під час застосування активних методів гасіння низових пожеж [157], розглянемо тільки пасивні методи. Суть пасивного методу гасіння низової пожежі за допомогою ГУС полягає у створенні вогнезахисної смуги шляхом нанесення шару гелю на горючі матеріали, що знаходяться на лісовій поверхні. Для цього як оптимальну суміш було обрано ГУС $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%) + \text{CaCl}_2(35\%)$ [149].

Розглянемо найпростіший математичний опис створення вогнезахисної смуги за допомогою пересувного пристрою, який забезпечує рівномірну подачу компонентів ГУС, що зберігають окремо, із заданими витратами в режимі роздільно-одночасної та роздільно-послідовної подачі. При цьому параметри вогнезахисної смуги встановлюють на підставі експериментальних результатів, представлених раніше (розд. 3) і в [60; 136; 137].

Основними параметрами вогнезахисної смуги є її ширина h й питома витрата вогнегасної речовини Φ :

$$\Phi = \frac{m}{S}, \quad (4.2)$$

де m – маса гелю;

S – площа обробленої підстилки.

З огляду на раніше отримані в лабораторних умовах і під час проведення натурального експерименту результати нанесення гелеутворюючої композиції на лісовий горючий матеріал доцільно зробити нерівномірним [139; 166; 198]. Смугу, яку передбачено створювати, розділяють на дві по-різному оброблені ділянки. Частина смуги шириною h_1 обробляють на всю глибину підстилки з питомою витратою Φ_1 , що забезпечує неможливість поширення горіння в шарах лісової підстилки під поверхневим шаром гелю. Для цього застосовують роздільно-послідовний спосіб подачі компонентів ГУС за допомогою спеціальної установки. [151]. Частина смуги шириною h_2 створюють способом роздільно-одночасної подачі компонентів ГУС із питомою витратою ГУС Φ_2 . У цьому випадку на поверхні підстилки утворюється шар гелю, який захищає її тільки від вторинних проявів горіння (іскор, теплового випромінювання та ін.).

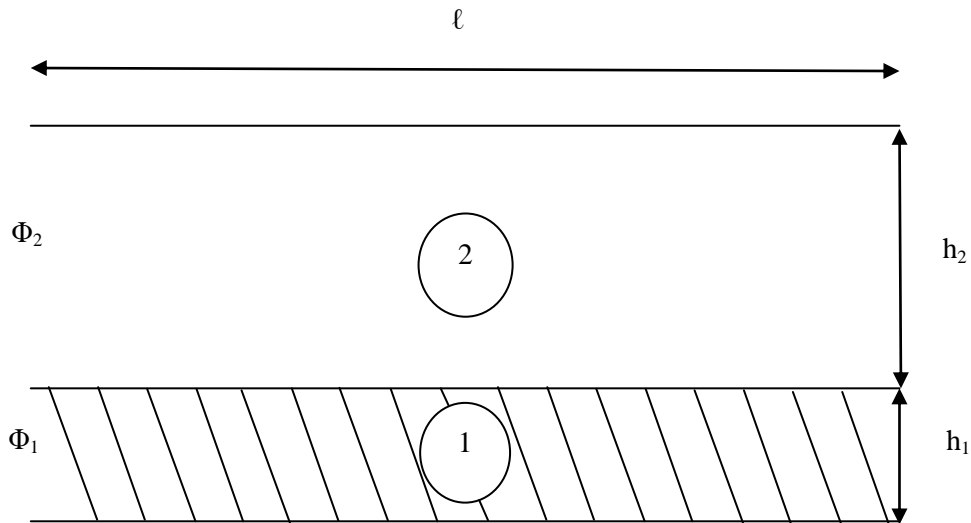


Рис. 4.4 – Схема створюваної за допомогою ГУС ХВС з двома ділянками: ℓ – довжина створюваної ХВС; h_1, h_2 – ширина ділянок вогнезахисної смуги; Φ_1, Φ_2 – питома витрата ГУС на ділянках ХВС

На рис. 4.4 показано схематичне розташування ділянки ХВС із нанесенням ГУС на всю глибину лісового горючого матеріалу (1) та ділянки з обробкою ЛГМ тільки на поверхні підстилки (2).

Введемо такі позначення:

Q – витрата вогнегасної речовини (ВР):

$$Q = \frac{m}{\tau},$$

де τ – час подачі ВР.

На подачу компонентів ГУС накладаються умови – необхідно одночасно забезпечити питому витрату Φ_1 на смузі шириною h_1 і Φ_2 на смузі шириною h_2 . Вибір параметрів Φ і h здійснюють залежно від параметрів низової пожежі [126].

Щоб рух пересувного пристрою забезпечував задані значення Φ_1 і Φ_2 , необхідно витримати співвідношення у витратах ВР, яку подають у зону 1 і 2.

Виразимо швидкість руху пристрою U через інші параметри вогнезахисної смуги й засоби подачі:

$$m = Q \cdot \tau \tag{4.3}$$

$$S = v \cdot \tau \cdot h$$

(4.4)

Використовуючи співвідношення 4.1–4.4, отримаємо

$$\Phi = \frac{m}{S} = \frac{Q \cdot \tau}{S} = \frac{Q \cdot (\ell/v)}{S} = \frac{Q \cdot \ell}{S \cdot v} = \frac{Q \cdot \ell}{\ell \cdot h \cdot v}. \quad (4.5)$$

Із співвідношення (4.5) отримаємо

$$v = \frac{P}{h \cdot \Phi}. \quad (4.6)$$

Оскільки створення смуги на ділянках 1 і 2 відбувається одночасно, то швидкість руху пристрою однакова $U_1 = U_2$, отже:

$$\frac{Q_1}{h_1 \cdot \Phi_1} = \frac{Q_2}{h_2 \cdot \Phi_2}; \quad (4.7)$$

або

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{h_1 \cdot \Phi_1}{h_2 \cdot \Phi_2}. \quad (4.8)$$

Необхідно відзначити, що витрати ВР Q_1 і Q_2 можуть бути відрегульовані кількістю форсунок і тиском у системі подачі компонентів ГУС.

З відношення (4.5) розрахуємо час, потрібний для забезпечення заданих значень Φ . На підставі цього можна розрахувати час, необхідний для обробки вогнезахисної смуги довжиною ℓ :

$$\tau = \frac{\ell}{v} = \frac{\ell \cdot h \cdot \Phi}{P}. \quad (4.9)$$

4.4 Розрахунок витрат вогнегасних речовин та часу на створення вогнезахисної смуги під час гасіння низової лісової пожежі за допомогою ГУС

Початковим етапом вибору параметрів вогнезахисної смуги є вибір місця її облаштування. Це питання не розглядатимемо, оскільки вибір місця створення не відрізняється від випадку застосування наявних на сьогодні засобів пожежогасіння низових лісових пожеж. Те саме стосується й вибору ширини вогнезахисної смуги – вона регламентована нормативними документами [126]. Відповідно до них ширину вогнезахисної смуги приймають рівною подвоєній висоті полум'я низової лісової пожежі.

Ураховуючи те, що вогневий вплив полум'я низової лісової пожежі на захищену смугу не однаковий, доцільно всю ширину вогнезахисної смуги розбити на дві ділянки. Першу ділянку, яка безпосередньо примикає до лісової підстилки, що горить, обробляють так, щоб гарантовано не дати поширитися полум'ю ні поверхнею підстилки, ні в її глибині. Для того, щоб забезпечити ці умови для лісової підстилки товщиною 5 см, необхідно забезпечити питому витрату ГУС, що дорівнює $0,7 \text{ г/см}^2$. Компоненти ГУС при цьому подають роздільно-послідовно. У випадку якщо товщина лісової підстилки відрізняється від 5 см, то пропорційно змінюється й питома витрата ГУС:

$$\Phi_1 = 0,7 \cdot A/5, (\text{г/см}^2), \text{ або } \Phi_1 = 7 \cdot A/5 = 1,4 \cdot A (\text{кг/м}^2), \quad (4.10)$$

де A – товщина лісової підстилки, см.

Ширину першої ділянки було встановлено [156] рівною $h_1 = 20$ см.

Друга ділянка, відділена від фронту полум'я першою, знаходиться під меншим тепловим впливом. Вона має бути захищена від теплового випромінювання полум'я й іскор, що розлітаються. Її ширина $h_2 = 2H - h_1$. При цьому подачу компонентів ГУС здійснюють роздільно-одночасним способом.

Важливою умовою створення вогнезахисної смуги із заданими параметрами є налаштування витрат засобів подачі на пересувному пристрої.

Розглянемо процес створення вогнезахисної смуги довжиною ℓ сильної низової лісової пожежі з висотою полум'я $H=2$ м. Для цього необхідно створити протипожежний бар'єр у вигляді вогнезахисної хімічної смуги шириною удвічі більшою за висоту полум'я – 4 м. Відповідно до отриманих результатів смуга буде прокладатися одночасно на двох ділянках з роздільно-послідовним і роздільно-одночасним способами подачі компонентів за допомогою спеціальної установки для подачі компонентів ГУС.

Для кількісних розрахунків задамося значеннями параметрів низової лісової пожежі та створюваної вогнезахисної смуги на підставі раніше отриманих результатів проведених експериментів (розд. 3):

довжина вогнезахисної ділянки $\ell = 1000$ м; ширина ділянки (1)

$$h_1 = 0,2 \text{ м};$$

ширина ділянки (2) $h_2 = 3,8$ м; товщина лісової підстилки $0,05$ м;

швидкість вітру – до 2 м/с;

вид ГУС: $(\text{CaCl}_2(35\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%))$;

питома витрата ГУС $\Phi_1 = 0,7 \text{ г/см}^2$.

Подача компонентів складу в розпиленому вигляді здійснюється за допомогою спеціальних розпилювачів або пожежних ручних стволів, наприклад, РСК-50 з розпилюванням. Стволи встановлені послідовно один відносно одного й паралельно під кожен компонент ГУС, витрата кожного ствола дорівнює 2 л/с [47]. Згідно зі співвідношенням (4.8) визначимо відношення витрат ГУС, що подають, на різних ділянках для забезпечення вогнезахисної смуги із заданими характеристиками.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{0,2 \cdot 7}{3,8 \cdot 2} = 0,18. \quad (4.11)$$

Визначимо витрати ГУС на двох ділянках за допомогою вибраних нами форсунок (РСК-50). Розрахунок необхідно здійснювати, урахувавши роздільну подачу компонентів системи по двох роздільних одна від одної форсунках. Прийmemo витрату на одному стволі розпилювача (РСК-50) рівною 2 кг/с. Тоді $Q_1 = 2 \cdot 2 = 4 \text{ кг/с}$. На підставі співвідношення (4.10) $Q_2 = 22 \text{ кг/с}$. Отже, сумарна витрата вогнегасної речовини (Q_1 і Q_2) для створення вогнезахисної смуги становитиме 26 кг/с.

Оскільки передбачено створити смуги одночасно на двох ділянках, то час їх створення однаковий $\tau_1 = \tau_2 = \tau$. Обчислимо час створення вогнезахисної смуги довжиною 1000 м на ділянці (1) зі співвідношення (4.9)

$$\tau_1 = \frac{1000 \cdot 0,2 \cdot 7}{4} = 350(\text{с}) = 5,8(\text{хв.}) \quad (4.12)$$

Очевидно, що час створення і для другої ділянки також дорівнюватиме 5,8 хв.

$$\tau_2 = \frac{1000 \cdot 3,8 \cdot 2}{22} = 346(\text{с}) = 5,8(\text{хв.}). \quad (4.13)$$

Швидкість створення такої смуги, з якою має рухатися платформа, розрахуємо за співвідношенням (4.6)

$$v_1 = \frac{4}{0,2 \cdot 7} = 2,85(\text{м/с}) = 10,2(\text{км/год}); \quad (4.14)$$

Визначимо загальну масу вогнегасної речовини для на 1000 м вогнезахисної смуги за співвідношенням (4.3):

$$m = Q \cdot \tau = 26 \cdot 350 = 9100 \text{ кг}. \quad (4.15)$$

Для створення ХОП нам необхідно мати 9100 кг загального запасу розчинів компонентів ГУС, а саме 4550 кг розчину гелеутворювача (5 % $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) і 4550 кг розчину каталізатора гелеутворення (35 % CaCl_2).

Оскільки компоненти ГУС використовують у різних концентраціях і основну масу становить вода, то перерахуємо розчини компонентів на масу сухої речовини використовуваного складу. Так, сухої речовини в розчині (5 % $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$) – 227,5 кг, а (35 % CaCl_2) – 1592,5 кг, загальна маса сухої речовини компонентів ГУС 1820 кг. Відповідно води необхідно 7280 кг.

Враховуючи той факт, що для гасіння лісових пожеж лісогосподарські служби використовують автомобілі високої прохідності, такі як АЦ-40(131)137А, місткість цистерни з водою яких становить не менше 2400 л і номінальна подача насоса 40 л/с [124], то необхідно чотири автомобілі цього типу.

Таким чином, для смуги довжиною 1000 м у випадку низової пожежі високої інтенсивності з висотою полум'я 2 м необхідно 9100 кг вогнегасних речовин.

4.5 Практичні рекомендації з гасіння низових лісових пожеж за допомогою бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів ГУС

Першим етапом у виборі тактики гасіння низової лісової пожежі середньої та високої інтенсивності за допомогою бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів ГУС є вибір міста розташування і параметрів вогнезахисної полоси. Вибір міста розташування вогнезахисної полоси не відрізняється від прийнятого для інших способів їх облаштування. У зв'язку з тим, що місце створення такої полоси звичайно обирається на рівній поверхні, прийmemo, що кут нахилу поверхні до горизонталі є близьким до нуля. Також розглянемо випадок, коли швидкість вітру не перевищує 4 м/с. При цьому треба взяти до уваги, що приземному шарі в лісі швидкість вітру рідко перевищує таку величину [142].

Загальна ширина вогнезахищеної смуги повинна бути рівною подвійній висоті полум'я (Н см). В такому випадку $h_1 = 20$ см, а $h_2 = 2H - h_1 = 2H - 20$. Згідно з рівнянням (4.10) питома витрата ВР для смуги (1) складає $\Phi_1 = 0,7 \cdot A/5$ (де А – товщина лісової підстилки, см). Питома витрата ВР для смуги – 2 $\Phi_2 = 2$ кг/м². Відповідні дані для вибору параметрів вогнезахисної смуги наведені в табл. 4.4 та 4.5.

Таблиця 4.4 – Потрібна питома витрата компонентів ГУС для ділянки – 1 (Φ_1) для різних товщин шару лісової підстилки (А) (ширина смуги 1 складає 20 см)

А, см	≤2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
-------	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

Φ_1 кг/м ²	2,8	4,2	5,6	7,0	8,4	9,8	11,2	12,6	14
-------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	----

Таблиця 4.5 – Потрібна ширина ділянки – 2 (h_2) для різної висоти полум'я (Н)

Н, см	50	60	70	80	90	100
h_2 , см	80	100	120	140	160	180
Н, см	110	120	130	140	150	
h_2 , см	200	220	240	260	280	

Вибір витрат ВР на засобах подачі.

Для ділянки 1 фіксованою є ширина ділянки, а змінною є питома витрата ВР. Для ділянки 2 фіксованою є питома витрата ВР, а змінною ширина ділянки. Підставляючи фіксовані значення в співвідношення (4.7), отримуємо:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{10 \cdot \Phi_1}{h_2}, \quad (4.16)$$

де значення h_2 беремо в сантиметрах.

Для вибору значення співвідношення Q_1/Q_2 треба підставити обрані в табл. 4.4 і 4.5.

Як приклад розглянемо такі параметри пожежі:

$H=150$ см, $A = 10$ см. В такому випадку $\Phi_1 = 14$ кг/м², $h_2 = 280$ см.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{10 \cdot 14}{280} = 0,5$$

Якщо всі розпилювачі забезпечують однакові витрати ВР, то відношення кількостей розпилювачів для ділянок 1 і 2 складуть 1/2. Якщо витрата ВР на одному розпилювачі дорівнює Q_0 , то $Q_1=n \cdot Q_0$ і $Q_2=2n \cdot Q_0$.

Швидкість руху пересувного засобу подавання ВР розраховується за співвідношенням

$$v = \frac{100 \cdot Q_1}{h_1 \cdot \Phi_1} = \frac{100 \cdot Q_2}{h_2 \cdot \Phi_2} = \frac{100 \cdot n \cdot Q_0}{h_1 \cdot \Phi_1} = \frac{100 \cdot 2n \cdot Q_0}{h_2 \cdot \Phi_2}, \quad (4.17)$$

де h_{21} і h_2 беруться в см; n – кількість розпилювачів.

Час на створення вогнезахисної смуги розраховується за співвідношенням (4.9).

4.6 Економічні параметри запропонованої вогнегасної системи

Невід'ємною частиною розробки будь-якого технічного рішення є встановлення економічної доцільності його впровадження та використання. Для

оцінки економічної ефективності використання запропонованої бінарної вогнегасної системи потрібно провести порівняльну оцінку фінансових витрат на використання запропонованого методу гасіння низових лісових пожеж з існуючими методами. Таке порівняння буде коректним у разі однакових умов гасіння. Це в свою чергу потребує порівняння запропонованого методу з методами гасіння низових лісових пожеж з використанням хімічних речовин. Такі методи реалізуються в разі створення хімічних вогнезахисних або опорних хімічних смуг. Для створення таких смуг раніше використовували спеціально розроблені вогнезахисні засоби ОС-5, ОС-5У, ОС-А1, бішофіт, метафосил, антипіреново-антисептичну просочувальну композицію для деревини «Агуспрофи», «Фаєсорб» тощо. Але провести коректне порівняння фінансових витрат таких засобів гасіння низових лісових пожеж неможливо, тому що відсутні дані з вартості таких засобів, їх кількісного та якісного складу або їх потрібної питомої кількісної витрати на створення вогнезахисних смуг. Тому нижче будуть наведені відповідні економічні розрахунки для запропонованої вогнегасної системи.

При проведенні таких розрахунків використаємо дані з оптових цін на відповідні речовини та матеріали станом на 09.2019 [167]:

- кальцій хлорид гранульований (кристалогідрат ~ 50 % CaCl_2) – 10500 грн/т (використовується 35 % розчин);
- рідке скло (~ 36 % $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) – 10080 грн/т (використовується 5 % розчин).

Фінансові витрати на ВР (Е) розраховано за рівнянням:

$$E = \Sigma(G \cdot e), \quad (4.18)$$

де G – загальна витрата ВР, т;

e – вартість 1 т ВР.

Розрахунки проведемо без урахування вартості води. Візьмемо, що витрати ВР такі, як наведено у прикладі в розділі 4.4. В такому випадку маси сухих речовин становлять $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ – 227,5 кг, а CaCl_2 – 1592,5 кг. Тоді вартість гранульованого хлориду кальцію становить:

$$\text{вартість}(\text{CaCl}_2) = \frac{1592,5 \cdot 10500}{500} = 33443 \text{ грн.}$$

Вартість рідкого скла становить:

$$\text{вартість}(\text{PC}) = \frac{227,5 \cdot 10080}{360} = 6370 \text{ грн.}$$

Загальна вартість обох компонентів складе 39813 грн. Ці фінансові витрати розраховано на 4000 м². Таким чином на 1 м² вогнезахисної смуги

витрати складуть: $39813/4000 = 9,95$ грн, або $39813/1000 = 39,81$ грн у розрахунку на 1 м фронту пожежі.

ПІСЛЯМОВА

На основі аналізу практики гасіння низових лісових пожеж середньої та високої інтенсивності й основних механізмів припинення горіння лісових горючих матеріалів обґрунтовано доцільність використання пасивних методів гасіння шляхом створення хімічної вогнезахисної смуги. Обґрунтовано доцільність використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів гелеутворюючої системи для створення хімічної вогнезахисної смуги. Розроблено методи подавання вогнегасних речовин, які дозволяють забезпечити високі вогнезахисні властивості лісової підстилки за рахунок підвищення проникної здатності гелю, що досягається послідовно-роздільним подаванням гелеутворювача й каталізатора гелеутворення. На основі математичних методів планування та обробки результатів експерименту встановлено оптимальний склад гелеутворюючої композиції – CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %), який забезпечує збереження вогнезахисних властивостей лісової підстилки за питомої витрати $0,7 \text{ г/см}^2$ на час до чотирьох годин. Установлено, що для запобігання займанню ділянки лісової підстилки поза зоною основної вогнезахисної смуги під одночасним впливом теплового випромінювання, фрагментів тліючих гілочок та іскор потрібно нанести ГУС CaCl_2 (35 %) + $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ (5 %) з питомою витратою $0,2 \text{ г/см}^2$. Запропоновано мобільний пристрій для організації роздільно-послідовного та роздільно-одночасного подавання компонентів гелеутворюючої системи на лісову підстилку в умовах реальної лісової пожежі та спосіб використання такої установки. Обґрунтовано доцільність створення хімічної вогнезахисної смуги, яка складається з двох ділянок. Перша ділянка забезпечує неможливість поширення горіння в шарах лісової підстилки під поверхневим шаром гелю, подавання компонентів ГУС на цю ділянку здійснюють роздільно-послідовним способом. Друга ділянка, відділена від фронту полум'я першою ділянкою, захищає лісову підстилку від теплового випромінювання полум'я й іскор, що розлітаються. Компоненти ГУС на цю ділянку подають роздільно-одночасним способом. Запропонований спосіб довів свою ефективність і економічність під час гасіння низових лісових пожеж.

Авторський колектив вдячний рецензентам за цінні зауваження, які були зроблені під час обговорення монографії та, особливо, за запропонований подальший розвиток відповідних досліджень.

Авторський колектив буде вдячний читачам за повідомлені слушні зауваження, які можуть виникнути у процесі читання та аналізу монографії.

Автори сподіваються, що читачі, а монографія орієнтована на наукових і практичних працівників органів і підрозділів служби цивільного захисту, викладачів, ад'юнктів і слухачів відповідних вищих освітніх закладів, будуть зацікавлені запропонованою тематикою та оцінять, за необхідності, докладну бібліографію, яка може бути корисною для їх подальшої роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абдурагимов И. М. Лесные пожары нельзя разбомбить. *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Т. 21. № 2. С. 64–68.
2. Абдурагимов И. М. Прорывные технологии пожаротушения. *Лесной комплекс Сибири*. 2015. № 5. С. 80–85.
3. Абдурагимов И. М. Эффективные технологии ликвидации лесных пожаров : сб. ст. СПб. – М., 2014. 130 с.
4. Абдурагимов И. М., Куприн Г. Н., Куприн Д. С. Механизм огнетушащего действия быстротвердеющих пен на основе структурированных частиц кремнезёма. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2016. № 4. С. 50–56.
5. Абрамов Ю. А., Киреев А. А. Гелеобразующие огнетушащие и огнезащитные средства повышенной эффективности применительно к пожарам класса А : монография. Харьков : НУГЗУ, 2015. 254 с.
6. Абрамов Ю. А., Киреев А. А., Александров А. В. Исследование повторного воспламенения древесины, потушенной гелеобразующими составами. *Проблемы пожарной безопасности*. 2006. Вып. 20. С. 86–89.
7. Абрамов Ю. А., Киреев А. А., Бондаренко С. Н. Экспериментальное исследование охлаждающего действия гелеобразующих огнетушащих составов, содержащих сульфат аммония. *Проблемы пожарной безопасности*. 2008. Вып. 23. С. 3 – 8.
8. Абрамов Ю. А., Росоха В. Е., Тарасенко А. А. Влияние пространственных флуктуаций пирологических параметров среды на интегральные характеристики низового лесного пожара и условия его тушения. Харьков : АЦЗУ, 2004. 142 с.
9. Абрамов Ю. О., Киреев О. О., Щербина О. М. Дослідження впливу товщини шару гелю на його вогнезахисні властивості. *Пожарна безпека*. 2006. № 8. С. 159–162.
10. Айвазов Б. В. Практикум по химии поверхностных явлений и адсорбции. М. : Высш. шк., 1973. 208 с.
11. Амосов Г. А. Возникновение лесных пожаров. М., 1964.
12. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2018 рік / Держ. служба з надзвичайних ситуацій; Укр. н.-д. ін-т цивільного захисту. К., 2019.
13. Антипіреново-антисептична просочувальна композиція для деревини: пат. 99800 Україна, МПК C09D 5/18, № 99800, заявл. 29.12.2014 опубл. 25.06.2015. Бюл. № 12.
14. Анцышкин С. П. Противопожарная охрана лесов. М. – Л. : Гослесбумиздат, 1957. 185 с.
15. Арцыбашев Е. С. Лесные пожары и борьба с ними. М. : Лес. пром-сть, 1974. 152 с.

16. Асовский В. П. Особенности тушения лесных пожаров вертолётами с использованием подвесных водосливных устройств. *Науч. Вестн. МГТУ ГА*. 2009. № 138. С. 142 – 149.

17. Бабенко О. В., Кіреєв О. О., Муравйов С. Д. Використання гелеутворюючих систем для попередження, локалізації та ліквідації пожеж та загорянь. *Зберігання та переробка зерна*. 2003. № 12. С. 52 – 54.

18. Билкун Д. Г., Казаков Н. В., Пешков В. В. Тушение древесины водой с низкомолекулярными добавками. *Теоретические и практические вопросы пожаротушения : сб. науч. тр.* М. : ВНИИПО, 1982. С. 99 – 105.

19. Богданова В. В., Кобец О. И. Локализация и тушение торфяных пожаров с применением огнетушащих составов. *Пожежна безпека – 2007 : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.* Черкаси, 2007. С. 334 – 335.

20. Богданова В. В., Кобец О. И. Регулирование эффективности огнезащитных составов для лесных горючих материалов. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. тез. докл. 4 Междунар. науч.-практ. конф.* Минск, 2007. Т. 1. С. 136 – 139.

21. Богданова В. В., Лахвич В. В. Применение жидкостных химических составов в переносных установках пожаротушения. *Пожежна безпека – 2007: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.* Черкаси, 2007. С. 330–331.

22. Богданова В. В., Лахвич В. В., Врублевский А. В. Исследование эффективности применения жидкостных химических составов при тушении тлеющих материалов. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. тез. докл. 4 Междунар. науч.-практ. конф.* Минск, 2007. Т. 1. С. 142–144.

23. Большая советская энциклопедия. М.: Сов. энцикл., 1969 – 1978.

24. Борисов Н. Д., Гуревич А. В., Милих Г. М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. М. : ИЗМИРАН, 1986. 348 с.

25. Брюханов А. В. Применение авиатанкерной техники для борьбы с пожарами в природной среде. *Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы науч.-практ. конф.* М. : ВНИИПО, 2008. Ч. 2. С. 51 – 63.

26. Бубнов В. П., Шишканов М. Н. Разработка модели определения эффективного способа и средств тушения пожара. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : тез. докл. 2 междунар. науч.-практ. конф.* Ч. 1. Минск, 2003. С. 170 – 172.

27. Валендик Э. Н. Борьба с крупными лесными пожарами. Новосибирск : Наука, 1990. 193 с.

28. Валендик Э. Н., Гевель Н. Ф. О полноте сгорания некоторых лесных горючих материалов. *Проблемы лесной пирологии*. Красноярск, 1975. С. 127 – 137.

29. Валендик Э. Н., Матвеев П. М., Софронов М. А. Борьба с крупными лесными пожарами. М. : Наука, 1979. 146 с.

30. Валендик Э. Н., Матвеев П. М., Софронов М. А. Крупные лесные пожары. М. : Наука, 1979. 198 с.

31. Винарский В. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев : Техника, 1975. 168 с.
32. Вопросы лесной пирологии : сб. ст. Красноярск : СО АН СССР, 1972. 236 с.
33. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы. М. : ДЭКС-ПРЕСС, 2004. 312 с.
34. Говаленков С.В., Дубинин Д.П. Применение взрывного способа для борьбы с лесными пожарами *Системи обробки інформації*. –2009. – № 2 (76). – С. 135 – 139.
35. Говаленков С.В. Дубинин Д.П. Анализ применения взрывного способа для локализации низовых лесных пожаров *Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту: II міжнар. наук.-практ. конф.: тези допов.* – Черкаси, 2008. – С. 40 – 42.
36. Гомонай В. І. Фізична та колоїдна хімія : підруч. для студ. вищ. навч. закл. Вид. 2-ге, перероб. і допов. Вінниця : Нова Книга, 2012. 496 с.
37. ГОСТ 7193-74 Анемометр ручной индукционный. Технические условия. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200024110>
38. Государственное агентство лесных ресурсов Украины Лесистость территории Украины по природным зонам. URL:http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/ru/publish/article;jsessionid=9F676F0240E1ECA0F3F00BEE4DF015FB.app1?art_id=82061&cat_id=82060.
39. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. М. : Наука, 1992. 480 с.
40. Гришин В. В., Панин Е. Н., Петров И. И. Проблемы повышения огнетушащих свойств воды. *Теоретические и экспериментальные вопросы пожаротушения : сб. науч. тр.* М. : ВНИИПО, 1982. С. 81 – 95
41. Гунар С. В., Денисов А. Н. О кодексе управления пожарами. *Пожаровзрывобезопасность*. 2007. Т. 16. № 5. С. 10 – 15.
42. Гусев В. Г., Лопухов Е. Л., Дубовый В. К. Классификация и общие свойства лесных горючих материалов. *Лесной журн.* 2012. № 1. С. 134 – 145.
43. Демидов П. Г. Горение и свойства горючих веществ. М. : Изд-во М-ва коммун. хоз-ва РСФСР, 1962.
44. Дослідження властивостей розчинів гелеутворюючих систем та установка для його здійснення / О. О. Кіреєв, М. Ф. Бронжаєв, Т. В. Мішурова, О. В. Бабенко. *Проблеми пожежної безпеки*. 2002. Вып. 13. С. 52 – 56.
45. Дослідження вогнегасної дії гелеутворюючих систем на основі силікатів / Ю. О. Абрамов, О. О. Кіреєв, О. М. Щербина, А. О. Бедзай. *Пожежна безпека*. 2007. № 11. С. 100 – 104.
46. Дослідження теплозахисної дії гелевих плівок / О. О. Кіреєв, О. В. Савченко, Г. В. Тарасова та ін. *Проблеми пожежної безпеки*. 2005. Вып. 18. С. 82 – 86.
47. ДСТУ 2112-92 (ГОСТ 9923-93) Стволи пожежні ручні. Технічні умови. Чинний від 01.01.94. К., 1993. 15 с.

48. ДСТУ 3404-96. Лісівництво. Терміни та визначення. К., 1997. 43 с.
49. Дячук А. О. Види та характеристика пожеж в екосистемах та їх вплив на загальний стан екологічної безпеки хмельницької області. *Зб. наук. пр. Військ. ін-ту Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка*. 2016. Вип. 54. С. 223 – 229.
50. Експериментальне визначення впливу розведення розчинів вогнезахисних засобів на ефективність загороджувальних смуг / Р. В. Ліхнівський та ін. *Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 1. С. 55 – 59.
51. Жартовский В., Цапенко А., Стеценко В. Дослідження процесів пожежегасіння комбінаціями деяких вогнегасних речовин. *Пожежна безпека*. 2003. № 7(46). С. 28 – 29;
52. Жуковская В. И. Увлажнение и высушивание гигроскопических лесных горючих материалов. *Вопросы лесной пирологии*. Красноярск : Институт леса, 1970. С. 105 – 141.
53. Журавлева Л. А., Ковалев А. Н. Тушение низовых лесных пожаров водяным паром. *Вестн. Саратов. гос. аграр. ун-та им. Н. И. Вавилова*. 2014. № 2. С. 45 – 51
54. Загороджувальні смуги як спосіб локалізації пожеж у природних екосистемах / Р. В. Ліхнівський та ін. *Цивільний захист та пожежна безпека : наук. вісн.* 2016. № 2. С. 55 – 59.
55. Захматов В. Д., Откидач Н. Я., Щербак Н. В. Новые методы и техника для тушения лесных пожаров. *Пожаровзрывобезопасность*. 1998. № 4. С. 69 – 77.
56. Иванников В. П., Ключ П. П. Справочник руководителя тушения пожара. М. : Стройиздат, 1987. 288 с.
57. Иванников В. П., Ключ П. П., Мазур Л. К. Справочник по тушению пожаров. Киев: РИО МВД УССР, 1975. 226 с.
58. Иванова Г. А., Иванов В. А. Пожары в сосновых лесах средней Сибири. Новосибирск : Наука, 2015. 240 с.
59. Инструкция по применению огнетушащих химических веществ при борьбе с лесными пожарами. Гос. ком. лесного хозяйства совета министров СССР. М., 1976. 28 с.
60. Исследование огнезащитного действия гелеобразующих составов по отношению к хвойной лесной подстилке / Д. И. Савельев, С. Н. Бондаренко, А. А. Киреев, К. В. Жерноклёв. *Проблемы пожарной безопасности*. 2017. Вып. 41. С. 147 – 153.
61. Исследование эксплуатационных и теплоизоляционных свойств огнезащитного покрытия СК-1 / А. А. Чернуха, А. А. Киреев, И. Э. Казимагомедов, Т. А. Костюк. *Наук. вісн. будівництва*. 2009. Вип. 54. С. 357 – 361.
62. Карпов А. Крылатые огнеборцы. *Пожарное дело*. 2003. № 1. С. 42 – 43.

63. Киреев А. А. Оценка огнетушащего действия гелеобразующих составов на модельных очагах пожара класса А с высокой плотностью укладки. *Проблемы пожарной безопасности*. 2010. Вып. 27. С. 77 – 82.

64. Киреев А. А. Оценка охлаждающего действия растворов солей используемых на этапах предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2006. Вип. 3. С. 161 – 169.

65. Киреев А. А. Применение гелеобразующих составов при тушении пожаров на химически опасных объектах. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2008. Вип. 7. С. 7 – 77.

66. Киреев А. А. Экспериментальное исследование охлаждающего действия гелеобразующих огнетушащих составов. *Проблемы пожарной безопасности*. 2007. Вып. 22. С. 87 – 93.

67. Киреев А. А., Бондаренко С. Н. Исследование огнетушащего действия гелеобразующих огнетушащих составов. *Проблемы пожарной безопасности*. 2008. Вып. 24. С. 44 – 49.

68. Киреев А. А., Касян Н. А. Экспериментальное определение охлаждающего действия гелей, используемых при ликвидации чрезвычайных ситуаций. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2007. Вип. 5. С. 93 – 98.

69. Киреев А. А., Коленов А. Н. Исследование пенообразования в пенообразующих системах. *Проблемы пожарной безопасности*. 2009. Вып. 25. С. 59 – 64.

70. Киреев А. А., Коленов А. Н. Пути повышения эффективности пенного пожаротушения. *Проблемы пожарной безопасности*. 2008. Вып. 24. С. 50 – 53.

71. Киреев А. А., Савельев Д. И. Гелеобразные покрытия – эффективные средства оперативной огнезащиты. Обзор. *Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. пр.* Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2015. № 20. С. 33 – 41.

72. Киреев А. А., Савельев Д. И., Жерноклёв К. В. Выбор эффективных огнетушащих средств для тушения лесных пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. 2015. Вип. 38. С. 77 – 82.

73. Киреев А. А., Сумцов Ю. А., Александров А. В. Гелеобразующие составы перспективные средства тушения лесных пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. 2004. Вып. 14. С. 94 – 98.

74. Кириченко И. К., Мунтян В. К., Мелещенко Р. Г. Моделирование параметров сброса воды с пожарного самолета АН-32П на основании данных, полученных CUP-AND-GRID методом. *Проблемы пожарной безопасности*. 2010. Вып. 28. С. 86 – 92.

75. Киреев О. О. Вогнезахисні властивості силікатних гелеутворюючих систем. *Наук. вісн. будівництва*. 2006. Вип. 37. С. 188 – 192.

76. Киреев О. О. Гелеутворюючі вогнегасні і вогнезахисні засоби

підвищеної ефективності стосовно пожеж класу А : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.02. Х., 2014. 37 с

77. Кіреєв О. О., Бабенко О. В. Аналіз шляхів підвищення вогнегасної ефективності рідинних засобів пожежогасіння. *Проблемы пожарной безопасности*. 2002. Вып. 11. С. 10 – 104.

78. Кіреєв О. О., Бабенко О. В. Експериментальні дослідження утримання води у плівках вогнегасних гелів при сушці в природних умовах. *Проблемы пожарной безопасности*. 2004. Спец. вып. 11. С. 57 – 60.

79. Кіреєв О. О., Бабенко О. В. Обґрунтування вибору систем для дослідження явища гелеутворення при розробці нових складів рідинних засобів пожежогасіння. *Проблемы пожарной безопасности*. 2002. Вып. 12. С. 107 – 110.

80. Кіреєв О. О., Бабенко О. В. Оптимізація складу гелеутворюючих вогнегасних систем. *Проблемы пожарной безопасности*. 2004. Вып. 15. С. 103 – 106.

81. Киреев А.А., Коленов А.Н. Пути повышения эффективности пенного пожаротушения. *Проблемы пожарной безопасности*. 2008. Вып. 24. С. 50 – 53.

82. Кіреєв О. О., Муравйов С. Д., Бабенко О. В. Використання гелеутворюючих систем для попередження, локалізації та ліквідації пожеж та загорянь. *Хранение и переработка зерна*. 2003. № 12. С. 52 – 54.

83. Кіреєв О. О., Романов В. М., Бабенко О. В. Дослідження концентраційних областей гелеутворення вогнегасних складів. *Проблемы пожарной безопасности*. 2003. Вып. 14. С. 109 – 112,

84. Кіреєв О. О., Савченко О. В. Оптимізація кількісного складу гелеутворюючої системи для гасіння пожеж об'єктів житлового сектору. *Проблемы пожарной безопасности*. 2009. Вып. 25. С. 162 – 166.

85. Класифікаційні ознаки надзвичайних ситуацій, затвержені Наказом МНС України від 12.12.2012 № 1400.

86. Копылов Н. П., Монахов Н. А., Боркин С. Т. Интенсивность подачи огнетушащих веществ при локализации и ликвидации пожаров на складах лесоматериалов. *Горение и тушение жидкостей, полимерных материалов и металлов: сб. науч. тр.* М. : ВНИИПО, 1990. С. 45 – 50.

87. Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов. *Вопросы лесной пирологии*. Красноярск : ИЛиД СО АН СССР, 1970. С. 5 – 58.

88. Курбатский Н. П. Итоги и перспективы исследований природы лесных пожаров. *Горение и пожары в лесу*. Красноярск, 1973. С. 9 – 26.

89. Курбатский Н. П. О классификации лесных пожаров. *Лесное хоз-во*. 1970. № 3. С. 68 – 73.

90. Курбатский Н. П. Проблема лесных пожаров. *Возникновение лесных пожаров : сб. ст.* / АН СССР. М., 1964. С. 5 – 60.

91. Курбатский Н. П. Терминология лесной пирологии. *Вопросы лесной пирологии : сб. ст.* Красноярск : ИЛиД СО АН СССР, 1972. С. 171 – 231.

92. Курбатский Н. П. Техника и тактика борьбы с лесными пожарами. М.: Гослесбумиздат, 1962. 164 с.
93. Курбатский Н. П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962. 154 с.
94. Кустов М. В. Современные способы искусственного инициирования осадков для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: монография. Харьков: НУГЗУ, 2016. 130 с.
95. Кустов М. В., Калугин В. Д. Повышение огнетушащей эффективности истинных растворов с помощью добавок электролитов. *Проблемы пожарной безопасности*. 2008. Вып. 24. С. 38 – 43.
96. Кустов М. В., Калугин В. Д. Вплив фізико-хімічних властивостей істинних розчинів на їх вогнегасну ефективність. *Проблемы пожарной безопасности*. 2007. Вып. 22. С. 126 – 134.
97. Кустов М. В., Калугин В. Д. Встановлення зв'язку між часом пожежегасіння та фізико-хімічними властивостями вогнегасних речовин на основі води. *Проблемы пожарной безопасности*. 2007. Вып. 21. С. 126 – 131.
98. Кустов М. В., Поспелов Б. Б. Дослідження процесів штучної стимуляції опадів при частковій іонізації атмосфери електромагнітним випромінюванням. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2003. Вып. 17. С. 72 – 81.
99. Левицкий В. А., Тришевская Т. Г. Исследования в области создания технологии производства огнетушащих порошков. *Хімічна промисловість України*. 1998. № 3. С. – 48-54.
100. Левицкий В. А., Тришевская Т. Г., Шихов Б. А. Разработки харьковского НПО „Карбонат” в области создания новых средств пожаротушения. *Проблемы пожарной безопасности*. 1993. Вып. 2. С. 288 – 289.
101. Лісові горючі матеріали: навч. посіб. / В. В. Левченко, О. А. Борсук, А. А. Борсук. К.: НУБіП України, 2015. 237 с.
102. Ліхнівський Р.В., Білошицький М.В., Боровиков В.О., Жартовський С.В., Копильний М.І., Корнієнко О.В. Загороджувальні смуги як спосіб локалізації пожеж у природних екосистемах. – *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Вип. № 2 (2). 2016. С. 55 – 59.
103. Ліхнівський Р.В., Білошицький М.В., Жартовський С.В., Копильний М.І., Корнієнко О.В. Експериментальне визначення впливу розведення розчинів вогнезахисних засобів на ефективність загороджувальних смуг. – *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Вип. № 1 (3). 2017. С. 55 – 59.
104. Лобанов Ф. И. Использование полимерных материалов в пожаротушении. *Пожаровзрывобезопасность*. 2004. Т. 13. № 1. С. 64 – 68.
105. Математическое моделирование воздействия объемного шлангового заряда на лесной фитоценоз и растительный покров / Ю. А. Скоб, К. В. Корытченко, М. Л. Угрюмов, С. А. Вамболь. *Проблемы пожарной безопасности*. 2009. Вып. 26. С. 134 – 140.
106. Отчет вызовов, пожаров, их жертв и гибели пожарных в странах и

городах мира за 2013-2017 г.г. Международная ассоциация пожарно-спасательных служб (КТИФ) *Мировая пожарная статистика отчет*. 2019. Вып. № 24. С. 64.

107. Мелехов И. С. Влияние пожаров на лес. М. – Л. : Гослестехиздат, 1948. 44 с.

108. Мелехов И. С. Леса и лесные пожары. Архангельск : ОГИЗ, 1947.

109. Мелехов И. С. Лесная пиронология. М. : МЛТИ, 1983. Вып. 5. 60 с.

110. Мелехов И. С. О теоретических основах лесной пиронологии. Архангельск: АЛТИ, 1944. 20 с.

111. Мелехов И. С. Об отложении лесной подстилки в зависимости от типа леса. *Тр. Арханг. лесотехнич. ин-та им. В. В. Куйбышева*. 1957. Т. XVIII. С. 132 – 137.

112. Мелехов И. С. Природа леса и лесные пожары. Архангельск : ОГИЗ, Арханг. книж. изд-во, 1947.

113. Мелехов И. С., Душа-Гудым С. И. Лесная пиронология. М. : МЛТИ, 1980. Вып. 3. 89 с.

114. Мелехов И. С., Душа-Гудым С. И., Сергеева Е. П. Лесная пиронология. М. : МЛТИ, 1982. Вып. 4. 66 с.

115. Мелещенко Р. Г. Визначення швидкості створення протипожежного бар'єра із застосуванням літаків АН-32П для локалізації природних пожеж (на прикладі чагарниково-трав'яних пожеж) : дис. канд. ... техн. наук : 21.06.02. Х., 2015. 154 с.

116. Методичні рекомендації щодо зниження небезпеки пливу лісових пожеж на арсенали, бази і склади боєприпасів, що розташовані в лісових масивах. Затверджено Наказом МНС України від 25.08.2011 № 890 <http://www.dsns.gov.ua/files/2011/8/26/890.pdf>

117. Митрофанов Д. П. Сравнение пирологических характеристик некоторых лесных горючих материалов. *Вопросы лесной пирологии : сб. ст.* Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1972. С. 77 – 102.

118. Моделирование областей обрыва ЛГМ, формируемой при взрыве топливовоздушных зарядов в лесном фитоценозе / К. В. Корытченко и др. *Проблемы пожарной безопасности*. 2010. Вып. 27. С. 109 – 117.

119. Москвиллин Е. А. Применение авиации для тушения лесных пожаров. *Пожарная безопасность*. 2009. № 1. С. 89 – 92.

120. Мощность лесной подстилки сосновых насаждений в условиях длительного техногенного процесса / С. А. Чжан, Е. М. Рунова, О. А. Пузанова, Л. А. Чжан. *Системы. Методы. Технологии*. Братск : БрГУ, 2011. № 4. С. 157 – 162.

121. О повышении эффективности и коэффициента использования огнетушащих составов при тушении пожаров ТГМ / И. М. Абдурагимов, С. К. Вильчковский, К. М. Ринков, Г. А. Яворский. *Тр. ВИПТШ МВД СССР* М., 1978. Вып. 3. С. 10 – 12.

122. Овсянников И. В. Противопожарное устройство лесов. М., 1978. 112

с.

123. Пожежна тактика / П. П. Ключ, В. Г. Палюх, А. С. Пустовой, Ю. М. Сенчихін. Х. : Основа, 1998. 592 с.

124. Пожежні машини : навч. посіб. / О. М. Ларін та ін. Х. : НУЦЗУ. – К. : МПБП „Гордон”, 2016. 279 с.

125. Похітон П. П. Запас підстилки під різними деревними і чагарниковими породами. *Питання лісового ґрунтознавства та екології лісу : пр. ін-ту лісівництва*. Т. V. К. : Вид-во АН УРСР, 1953. С. 3 – 17.

126. Правила пожежної безпеки в лісах України. НАПБ А.01.002-2004. Затверджено Наказом Держкомлісгоспу України 27.12.2004 № 278; зареєстровано в Міністерстві юстиції України 24 березня 2005 р. за № 328/10608.

127. Применение добавок для повышения огнетушащей способности водоаэрозольных установок / И. А. Корольченко, В. Г. Кузьмин, А. Н. Егоров, С. В. Зенков. *Пожаровзрывобезопасность*. 1998. № 2. С. 64 – 70.

128. Применение твердеющей химической пены для локализации лесных пожаров / Н. А. Мотин, Н. П. Копылов, С. Т. Боркин, Б. Н. Фролов. *Сб. науч. тр. ВНИИПО „Пожаротушение”*. М. : ВНИИПО, 1985. С. 27 – 36.

129. Про затвердження класифікаційних ознак надзвичайних ситуацій : Наказ МВС України від 06.08.2018 р. № 658. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0969-18/paran7#n7>

130. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо зниження небезпеки впливу лісових пожеж на арсенали, бази і склади боєприпасів, що розташовані в лісових масивах: Наказ МНС України від 25.08.11 № 890. URL: <http://www.dsns.gov.ua/files/2011/8/26/890.pdf>

131. Про затвердження Порядку організації та застосування авіаційних сил та засобів для гасіння лісових пожеж : Наказ МВС України від 13.04.2017 № 311, зареєстрований в Міністерстві юстиції України 13 травня 2017 р. За № 595/30463.

132. Про затвердження Правил пожежної безпеки в лісах України : Наказ Державного комітету лісового господарства України від 27.12.2004 № 278.

133. Пути повышения эффективности тушения полимерных материалов / А. А. Киреев, А. Б. Каракулин, К. В. Жерноклёв, М. А. Чиркина. *Проблемы пожарной безопасности*. 2013. Вып. 34. С. 71 – 77.

134. Рева Г. В. Метод розрахунку циліндричних відбивачів вибухових хвиль для гасіння лісових пожеж : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.01.01. Донецьк, 2000. 18 с.

135. Рекомендации по обнаружению и тушению лесных пожаров. Утверждено Рослесхозом 17.12.1997.

136. Савельев Д. И., Киреев А. А., Жерноклёв К. В. Повышение эффективности использования гелеобразующих составов при борьбе с низовыми лесными пожарами. *Проблемы пожарной безопасности*. 2016.

Вып. 39. С. 237 – 242.

137. Савельев Д. И., Киреев А. А., Жерноклёв К. В. Экспериментальное исследование огнепреграждающих свойств лесной подстилки, обработанной пенообразующими системами. *Проблемы пожарной безопасности*. 2016. Вып. 40. С. 169 – 173.

138. Савельев П. С. Пожары-катастрофы. М. : Стройиздат, 1994.

139. Савельев Д.И., Чиркіна М.О. Дослідження вогнезахисної дії гелеутворювального складу на хвойній лісовій підстильці в лабораторних умовах. *Пожежна безпека*. 2017. ЛДУБЖ. Вип. 31. С. 110-114.

140. Савельев Д. И., Чиркіна М. А. Дослідження можливості використання гелеутворюючих вогнезахисних складів під час гасіння лісової хвойної підстилки в реальних умовах. *Проблемы пожарной безопасности*. 2018. Вып. 44. С. 119 – 123.

141. Савельев Д. И., Чиркіна М. А. Моделювання тушіння низових лісових пожеж за допомогою гелеутворюючих систем шляхом створення вогнезахисної хімічної смуги. *Проблемы пожарной безопасности*. 2019. Вып. 45. С. 142 – 148.

142. Савельев Д. И., Борисенко В. Г., Барабаш І. О. Вогнезахисні властивості гелеутворюючих систем на модельному вогнищі низової лісової пожежі великих розмірів. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. Вип. 46. С. 168 – 173.

143. Бинарные огнетушащие системы с отдельной подачей как наиболее актуальные системы для ликвидации лесных пожаров / Д. И. Савельев, Е. В. Христинич, А. А. Киреев, М. А. Чиркина. *The European Journal of Technical and Natural Sciences, Premier Publishing s.r.o. Vienna*. 1. 2018. P. 31 – 36.

144. Савельев Д. И., Киреев А. А. Пути повышения эффективности тушения лесных пожаров. *Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы*: сб. материалов X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов): в 2 ч. Ч. 1. Минск: КИИ, 2016. – С. 159.

145. Савельев Д. И., Киреев А. А. Применение пенообразующих систем в тушении лесных пожаров. *Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций*: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, 2016. С. 220.

146. Савельев Д. И., Киреев А. А., Чиркина М. А. Изучение проникающих свойств бинарных огнетушащих составов при тушении лесного горючего материала. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали VII між нар. наук.-практ. конф. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. С. 177 – 179.

147. Савельев Д. И. Повышение эффективности лесных пожаров путем применения бинарных огнетушащих систем. *Проблемы гражданской защиты: управление, предупреждение, аварийно-спасательные и специальные работы*: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Кокшетау: РГУ „КТИ КЧС МВД Республики Казахстан”, 2017. С. 248 – 250.

148. Савельев Д. И. Тушение лесных пожаров путем создания защитных полос с помощью пенообразующих составов. *Проблеми цивільного захисту: управління, попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи*: зб. матеріалів наук.-практ. семінару. Х.: НУЦЗУ, 2017. С. 125 – 126

149. Савельев Д. И., Кіреєв О. О. Гасіння лісових пожеж шляхом створення захисних смуг за допомогою бінарних вогнегасних систем. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності*: зб. наук. пр. XII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів: в 2 ч. Ч. 1. Л.: ЛДУ БЖД, 2017. С. 168 – 169.

150. Савельев Д.И. Тушение лесных пожаров путем создания защитных полос с помощью пенообразующих составов. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених. Х.: НУЦЗУ, 2017. С. 482.

151. Савельев Д.И. Тушение лесных пожаров путем использования гелеобразующего огнезащитного состава с раздельной подачей. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*: матеріали XIX Всеукр. наук.-практ. конф. К.: ІДУЦЗ, 2017. С. 386 – 388.

152. Савельев Д. И., Чиркіна М. А. К вопросу изучения гелеобразующих огнетушащих составов при тушении лесных низовых пожаров. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 86 – 87.

153. Савельев Д. И. Гелеобразующая система как эффективное средство для тушения лесных пожаров. *Пожежна безпека: проблеми та перспективи*: зб. тез доп. Всеукр. наук.-практ. конф. Х.: НУЦЗУ, 2018. С. 118 – 120.

154. Савельев Д. И., Чиркіна М. А. Спосіб гасіння лісових пожеж за допомогою гелеутворюючих систем. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*: матеріали XX Всеукр. наук.-практ. конф. К.: Вид. дім „Гельветика”, 2018. С. 385 – 388.

155. Савельев Д. И. Розробка способу роздільної подачі бінарної вогнегасної системи для гасіння лісових пожеж. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених. Х.: НУЦЗ України, 2018. С. 105.

156. Савельев Д. И. Применение гелеобразующих огнетушащих систем с раздельной подачей для тушения низового лесного пожара. *Огнезащита и тушение твердых горючих материалов*: материалы Междунар. заочной науч.-практ. конф. Минск: УГЗ, 2018. С. 20 – 22.

157. Савельев Д. И., Чиркіна М. А. Дослідження можливості застосування гелеутворюючих складів під час гасіння хвойної підстилки в реальних умовах. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 160 – 162.

158. Савченко О. В., Кіреєв О. О., Альбоций В. М. Дослідження

- вогнезахисної дії гелевих плівок на матеріалах, розповсюджених у житловому секторі. *Проблемы пожарной безопасности*. 2006. Вып. 19. С. 127 – 131.
159. Савченко О. В., Кіреєв О. О., Шаршанов А. Я. Модель гасіння пожежі постійної площі з урахуванням часу повторного займання, кількісного і якісного складу горючого навантаження. *Проблемы пожарной безопасности*. 2007. Вып. 22. С. 161 – 165.
160. Софронов М. А. Еще раз о классификациях лесных пожаров. *Лесное хоз-во*. 1971. № 2. С. 22 – 25.
161. Софронов М. А. Лесные пожары в горах Южной Сибири. М. : Наука, 1967. 148 с.
162. Свириденко В. Є., Бабіч О. Г., Швиденько А. Й. Лісова пірологія : підручник / за ред. В. Є. Свириденка. К. : Агропромвидав України, 1999. 172 с.
163. Сергиенко В. Н. Борьба с лесными пожарами, проблемы и перспективы. *Лесное хозяйство*. 1999. № 4. С. 47 – 51.
164. Слепченко В. Ф., Жартовский В. М. Огнетушащий состав, вспенивающийся в очаге пожара. *Чрезвычайные ситуации, их предупреждение и ликвидация* : тез. докл. II Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. Минск, 2003. С. 330 – 332.
165. Смирнов Н. Как защитить лес от пожаров. *Пожарное дело*. 2003. № 1. С. 10 – 13.
166. Спосіб гасіння низових лісових пожеж за допомогою бінарних гелеутворюючих систем: пат. 120982 Україна: МПК (2006.01) А62С 3/02 № u 2017 05311, заявл. 30.05.2017, опубл. 27.11.2017. Бюл. № 22.
167. Спосіб гасіння пожежі та склад для його здійснення: декларац. пат. на винахід. 60882А Україна, МПК7 А62С 1/00, № 2003032600, заявл. 25.03.2003, опубл. 15.10.2003. Бюл. №10-2с.
168. Способ тушения лесных пожаров: пат. 2147901 Россия: МПК7 А62 С3/02, № 98118527/12, заявл. 12.10.1998, опубл. 27.04.2000. Бюл. № 12.
169. Способ тушения пожара и состав для его осуществления: пат. 2264242 Российская федерация. МПК7 А62С, 5/033, заявка № 2003237256/12, заявл. 23.12.2003, опубл. 20.11.10.2005. Бюл. № 32.
170. Стародубцева Н. И., Жучков Е. А., Степанов А. С. Мощность лесной подстилки в сосняках Джабык-Карагайского бора. *Лес-2003* : материалы IV междунар. науч. конф. Брянск, 2003.
171. Сумцов Ю. А., Киреев А. А., Александров А. В. Использование гелеобразующих составов для борьбы с верховыми лесными пожарами. *Проблемы пожарной безопасности*. 2008. Вып. 23. С. 180 – 185.
172. Сумцов Ю. А., Киреев А. А., Бабенко А. В. Совершенствование жидкостных средств тушения лесных пожаров. *Пожарна безпека*. 2005. № 6. С. 29– 31.
173. Сумцов Ю. А., Киреев А. А., Жерноклєв К. В. Использование гелеобразующих составов для борьбы с низовыми лесными пожарами. *Проблемы пожарной безопасности*. 2007. Вып. 22. С. 175 – 179.

174. Сумцов Ю. А., Киреев А. А., Жерноклёв К. В. Оценка массы гелеобразующего состава для тушения верхового лесного пожара. *Проблемы пожарной безопасности*. 2010. Вып. 27. С. 192 – 197.
175. Сумцов Ю. А., Киреев А. А., Тарасова Г. В. Исследование времени работоспособности гелеобразующих составов при борьбе с лесными пожарами. *Проблемы пожарной безопасности*. 2006. Вып. 20. С. 197 – 202.
176. Сухин А. И., Конев Э. В. О механизме горения сосновой хвои. *Вопросы лесной пирологии : сб. ст.* Красноярск : ИЛиД СО АН СССР, 1972. С. 7 – 51.
177. Тарахно О. В. Теоретичні основи пожежовибухонебезпеки. Х. : АЦЗУ, 2006. – 395 с.
178. Товарянський В. І., Паснак І. В. Експериментальні дослідження пожежної небезпеки хвої у лабораторних та польових умовах. *Пожежна безпека*. 2018. ЛДУБЖ. Вип. 33. С. 107-111.
179. Тушение горючих жидкостей распыленной водой с самовспенивающейся добавкой / А. Ф. Шараварников, В. П. Аксёнов, В. Ф. Слепченко, Н. И. Михайлова. *Пожарная техника. Средства и способы пожаротушения: сб. науч. тр.* М.: ВНИИПО, 1992. С. 148 – 151.
180. Чиркина М. А., Савельев Д. И., Питак О. Я. Возможность использования экологически чистых пенообразователей для тушения пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. 2017. Вып. 42. С. 169 – 173.
181. Carlson G. P. What's all the talk about class A foam. *Fire engineering*. 1991. V. 144. №. 10. P. 10 – 12.
182. Clemens W. Colloid Chemistry // Gels. 2018 – Vol. 2. Is. 64. DOI - 10.3390/gels4030064
183. Cowan G. Wawe of future is class „A” foam. *Fire Fight. Can.* 1995. V. 39, № 2. P. 18 – 19.
184. De-xu Du, Xu-hai Pan, Min Hua Experimental Study on Fire Extinguishing Properties of Compound Superfine Powder. *Procedia Engineering*. 2018. Vol 211. pp. 142-148
185. Effectives Loschen. *Bevelkenugshyzt Magazin fur Zivil und Katastrophenchuts*. 2001. № 1. S. 22.
186. Frájová Z., Koščák P. The use of aviation equipment in extinguishing spread fires. *Acta Avionica*. 2013. Vol. 15(27).
187. George Ch., Blakely A. D. An evaluation of the drop characteristics and ground distribution patterns of forest fire retardants. Res. Pap. INT-134. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Intermountain Forest and range Experiment Station, 1973. 60 p.
188. Hansen R. Estimating the amount of water required to extinguish wildfires under different conditions and in various fuel types. *International Journal of Wildland Fire*. 2012. Vol 21(5). DOI: [10.1071/WF11022_CO](https://doi.org/10.1071/WF11022_CO).
189. Hodgso B. S. A procedure to evaluate ground distribution patterns for

water dropping aircraft. Inf. Rep. FF-X-9. Ottawa, Canada: Canadian Department of Forestry and Rural Development? Forest Fire Research Institute, 1967. 41 p.

190. Kuti Rajmund Characteristics of forest fires and their impact on the environment. Academic and Applied Research in Military Science. 2016. Vol 15 (1). Pp. 5-17

191. Leidenfrost, JG De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus (Дуйсбург, 1756). URL: https://reader.digitale-sammlungen.de/de/fs1/object/display/bsb11269073_00005.html

192. Matt P. Criteria and methodology for evaluating aerial wildfire suppression. International Journal of Wildland Fire. 2013. Vol. 22(8)

193. Minas J., Hearne J. Handmer J. A review of operations research methods applicable to wildfire management. International Journal of Wildland Fire. 2012. Vol 21. Pp. 189-196.

194. Polymer dispersions for fire prevention and firefighting: пат. 8.475,675 В2 США МПК А62Д 1 / 02 (2006.01), № 12/046,574, заявл. 12.03.08, опубл. 02.07.13. Бюл. № 3.

195. Rawet D., Smith R., Kravaninis G. A comparison of water additions for mopping up after forest fire. *International Journal Wildland Fire*. 1996. V. 6. № 1. P. 37– 43.

196. Rochnu R. High expansion foam as a fire break. *Wildfire*. 1999. V. 8. № 3. P. 27 – 30.

197. Rudolh S, Braun U. Schaum und Wasser. *Braundwatsh*. 2002. V. 57. № 2. P. 58 – 59.

198. Saveliev D. I. Influence of consumption rate and drying time of gel-forming systems on thier fire retardant properties when applied to coniferous forest litter. *Проблеми пожежної безпеки*. 2017. Вип. 42. С. 115 – 120.

199. Waldron J. D., Xi W. M. Forest Restoration: Simple Concept, Complex Process. *Forest Research*. – 2013. Vol. 2. Iss. 1. doi:10.4172/2168-9776.1000e104

200. Wasserloscher fast universell. *Horian Hessen*. 1990. Apr. P. 6.

201. Zhou X.M., Liao G.X., Cai B. Improvement of Water Mist's Fire-extinguishing Efficiency with MC Additive. *Fire Safety Journal*. 2006. Vol. 41. Pp. 39- 45.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Ліцензія: Наказ МОН України від 17.02.2017 № 33-л

Навчальний заклад готує фахівців для підрозділів ДСНС України та підприємств усіх форм власності

Спеціальність	Спеціалізація	Інформація за телефонами
Екологія	•Екологічна безпека	Факультет техногенно-екологічної безпеки (057) 707-34-31 +38-067-422-96-63 +38-066-738-40-14 +38-063-772-91-75
Цивільна безпека	•Охорона праці	
Хімічні технології та інженерія	•Радіаційний та хімічний захист	Факультет оперативно-рятувальних сил +38-093-682-13-88 +38-095-927-58-00 +38-095-606-71-79
Цивільна безпека	•Цивільний захист •Телекомунікаційні системи в управлінні	Факультет цивільного захисту +38-099-620-10-25 +38-093-965-71-88 +38-067-427-57-05 +38-093-312-37-12 +38-093-407-47-46 +38-067-950-94-28
	•Інженерне забезпечення саперних, піротехнічних та вибухових робіт	
Туризм	•Туризм	
Психологія	•Екстремальна та кризова психологія	Соціально-психологічний факультет: (057) 707-34-60 +38-093-312-35-40 +38-093-406-84-36
	•Робота з персоналом	
Пожежна безпека	•Пожежна безпека	Факультет пожежної безпеки (057) 707-34-80 +38-067-571-90-10 +38-063-776-80-59 +38-067-900-47-52 +38-093-940-91-29
	•Автоматичні системи пожежної та технологічної безпеки	
	•Аудит пожежної та техногенної безпеки	
	•Пожежна безпека	Факультет оперативно-рятувальних сил
	•Пожежогасіння та аварійно-рятувальні роботи	+38-093-682-13-88 +38-095-927-58-00 +38-095-606-71-79

Здобувачі вищої освіти мають можливість навчатись на військовій кафедрі підготовки офіцерів запасу

Приймальна комісія – (057)704-14-32, (057)707-34-06



Наукове видання

Савельєв Дмитро Ігорович
Кіреєв Олександр Олександрович
Назаренко Сергій Юрійович
Чіркїна Марина Анатоліївна

**ЕФЕКТИВНЕ ГАСІННЯ НИЗОВИХ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ШЛЯХОМ
ВИКОРИСТАННЯ БІНАРНИХ ВОГНЕГАСНИХ СИСТЕМ З
РОЗДІЛЬНИМ ПОДАВАННЯМ**

Монографія

Підписано до друку 25.07.21. Формат 60x84/16.
Папір 80 г/м². Ум.друк. арк. 8,5
Тираж прим. Вид. № 34/19. Обл.вид арк. 5,0
Сектор редакційно-видавничої діяльності
Національного університету цивільного захисту України
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

www.nuczu.edu.ua