

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

**САВЕЛЬСВ ДМИТРО ІГОРОВИЧ**

УДК 614.84

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

Спеціальність 21.06.02 – пожежна безпека

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій, м. Харків.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, доцент  
**Кірсєв Олександр Олександрович**  
Національний університет цивільного захисту України,  
м. Харків, професор кафедри спеціальної хімії та  
хімічної технології

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Жартовський Сергій Володимирович**  
Український науково-дослідний інститут цивільного  
захисту, головний науковий співробітник науково-  
випробувального центру

кандидат технічних наук  
**Товарянський Володимир Ігорович**  
Львівський державний університет безпеки  
життєдіяльності, старший викладач кафедри  
експлуатації транспортних засобів та пожежно-  
рятувальної техніки

Захист відбудеться 23 квітня 2020 р. о 14.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94 та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 за електронною адресою: <http://nuczu.edu.ua>

Автореферат розіслано 21 березня 2020 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 64.707.01



А. О. Михайлюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Значну частину лісового фонду України (понад 40 %) становлять хвойні ліси, з яких 60 % – молоді насадження, що їх найбільше вражають лісові пожежі.

Лісові пожежі переважно починаються з низових пожеж, оперативне гасіння яких може запобігти переходу пожежі у верхову. Крім того, поширення верхової лісової пожежі, яке відбувається в більшості випадків завдяки прогріву крон дерев конвективними потоками від низової пожежі, можна зупинити шляхом припинення низової.

Найбільшу небезпеку становлять низові лісові пожежі середньої та високої інтенсивності. Для їх гасіння використовують різноманітні методи. Методи гасіння низових лісових пожеж і пожеж за участю рослинних та целюлозовмісних горючих матеріалів розробляли І. Абдурагімов, Ю. Абрамов, А. Беліков, М. Білошицький, В. Боровиков, Е. Валендик, А. Грішін, Д. Дубінін, С. Жартовський, Е. Конев, А. Кузик, М. Курбатський, О. Коваль, Р. Ліхнівський, Р. Мелещенко, Г. Рева, О. Тарасенко, В. Товарянський, G. Carlson, R. Ries, W. Rosenstock, V. Schattl, E. Wagner та ін.

Використанню бінарних вогнегасних, а саме гелеутворюючих систем (ГУС) в пожежогасінні присвячено роботи О. Бабенка, О. Кіреєва, О. Савченка, Ю. Сумцова.

Загалом проблема запобігання й гасіння лісових пожеж, незважаючи на значну увагу до неї, досі далека від вирішення, що зумовлює актуальність удосконалення методів і засобів пожежогасіння низових лісових пожеж.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано в межах науково-дослідних робіт „Підвищення ефективності гасіння лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням” (НДР № 01170 U 002009), у яких автор був відповідальним виконавцем.

**Мета й завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням для вдосконалення наявних методів ліквідації низових лісових пожеж.

Для досягнення мети необхідно вирішити так завдання:

- на основі аналізу основних механізмів припинення горіння обґрунтувати вибір засобу з високими вогнезахисними властивостями щодо матеріалу лісової підстилки, який забезпечує тривалий захист лісових горючих матеріалів від займання, та показати переваги гелеутворюючих систем;
- розробити методи подавання гелеутворюючих систем, які дозволяють забезпечити високу проникаючу здатність у матеріал лісової підстилки;
- розробити експериментальні методи визначення вогнезахисних властивостей гелевих композицій щодо лісових горючих матеріалів, на основі яких оцінити відповідні характеристики;

- на основі математичних методів планування й обробки результатів експерименту обрати оптимальний склад гелеутворюючої композиції;
- обґрунтувати параметри пристрою для організації подавання компонентів гелеутворюючої системи на лісову підстилку в реальних умовах лісової пожежі;
- обґрунтувати раціональні параметри вогнезахисної смуги, яка утворюється за допомогою гелеутворюючих систем;
- розробити практичні рекомендації щодо гасіння низових лісових пожеж за допомогою вогнегасних засобів на основі гелеутворюючих систем.

**Об’єкт дослідження** – пожежогасіння низових лісових пожеж з використанням вогнегасних засобів з роздільним подаванням компонентів на основі гелеутворюючих систем.

**Предмет дослідження** – вплив параметрів вогнегасного засобу з роздільним подаванням компонентів гелеутворюючих систем щодо матеріалу лісової підстилки.

**Методи дослідження.** У роботі використано:

- хімічні методи – кислотно-основного титрування, гравіметричний, індикаторний метод визначення рН для аналізу розчинів компонентів ГУС, контролю їхніх хімічних характеристик;
- фізичні методи – денсиметрії, методи визначення реологічних властивостей для визначення фізичних властивостей компонентів гелеутворюючих систем;
- методики визначення вогнезахисних характеристик речовин для встановлення витрат компонентів вогнегасної системи, потрібних для забезпечення умов вогнеперешкодження;
- методи математичного моделювання для оцінки умов забезпечення створення вогнезахисної смуги з заданими параметрами та раціонального планування експерименту й узагальнення його результатів.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У роботі одержано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують вирішення актуального наукового завдання – підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням.

У результаті *вперше* отримано такі наукові результати:

- 1) розроблено вогнегасну систему на основі ГУС з високою здатністю проникати в глибину лісової підстилки, що досягається шляхом роздільно-последовного подавання компонентів ГУС;
- 2) встановлено оптимальний склад гелеутворюючої композиції –  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%), який забезпечує збереження вогнезахисних властивостей лісової підстилки при питомій витраті  $0,7 \text{ г/см}^2$  на час до чотирьох годин;

- 3) встановлено, що для запобігання займання ділянки лісової підстилки поза зоною основної вогнезахисної смуги під одночасним впливом теплового випромінювання, фрагментів тліючих гілочок та іскор потрібно нанести ГУС  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%) з питомою витратою 0,2 г/см<sup>2</sup>;
- 4) виявлено вплив швидкості вітру й куту нахилу поверхні на вогнезахисні властивості гелів щодо матеріалу лісової підстилки.

*Подальшого розвитку* набули:

- 1) експериментальні методи визначення вогнезахисних властивостей гелевих шарів щодо лісових горючих матеріалів;
- 2) методи подавання компонентів ГУС на поверхню лісової підстилки.

*Удосконалено* мобільний пересувний засіб для транспортування й роздільного подавання компонентів ГУС на лісову підстилку з регульованою витратою компонентів, який забезпечує змінну ширину захисної смуги.

**Практичне значення отриманих результатів.** Використання розробленої вогнегасної системи дозволяє підвищити ефективність процесу гасіння низових лісових пожеж. Загальні масові витрати компонентів вогнегасної системи на основі ГУС на порядок менші, ніж відповідний показник для води, а за часом вогнезахисної дії ця система у два – три рази перевищує наявні хімічні засоби пожежогасіння низових лісових пожеж.

Результати проведених досліджень є основою для впровадження розробленої системи в практику пожежогасіння низових лісових пожеж підрозділами ДСНС України. Реалізацію висновків і результатів роботи здійснено шляхом прийняття до впровадження в практику пожежогасіння Рубіжанським міським управлінням ГУ ДСНС України в Луганській області (акт упровадження від 04.07.2019); 21-ою Державною пожежно-рятувальною частиною ГУ ДСНС України у Луганській області (акт упровадження від 11.09.2019); Державним підприємством „Новоайдарське лісомисливське господарство” (акт упровадження від 28.05.2019); Державним підприємством „Сєверодонецьке лісомисливське господарство” (акт упровадження від 22.07.2019) та Державним підприємством „Кремінське лісомисливське господарство” (акт упровадження від 09.04.2019).

Результати дослідження впроваджено в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України під час вивчення дисциплін „Теорія розвитку та припинення горіння” в розділі „Особливості розвитку пожеж класу А на відкритому просторі”, „Припинення горіння методом охолодження”, „Ізолюючі вогнегасні речовини”, „Особливості припинення горіння водовмісними засобами” (акт упровадження від 01.08.2019).

Результати роботи втілено в розробку патенту України на корисну модель щодо способу гасіння низових лісових пожеж за допомогою використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів гелеутворюючих систем.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є результатом самостійної роботи автора. Особистий внесок здобувача в працях, написаних у співавторстві, полягає в такому:

У роботах [1; 15] розглянуто основні способи гасіння лісових пожеж; відзначено основні недоліки наявних вогнегасних засобів, використовуваних для гасіння верхових і низових лісових пожеж; запропоновано для підвищення ефективності гасіння лісових пожеж спільне використання гелеутворюючих і піноутворюючих вогнегасних засобів.

У роботах [13; 14] розглянуто основні характеристики оперативних вогнезахисних властивостей гелеподібних покриттів, які формуються на захищуваних поверхнях шляхом одночасно-роздільного подавання компонентів ГУС; показано перспективу застосування такого способу оперативного вогнезахисту для гасіння різних видів пожеж, зокрема лісових.

У роботах [2; 16; 17] наведено результати лабораторних досліджень запобігання поширенню стійких низових лісових пожеж з використанням гелеутворюючих вогнегасних систем  $\text{Na}_2\text{O} - 2,7\text{SiO}_2$  (5%) +  $\text{CaCl}_2$  (5%),  $\text{Na}_2\text{O} - 2,7\text{SiO}_2$  (5%) +  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  (5%),  $\text{Na}_2\text{O} - 2,7\text{SiO}_2$  (15%) + амофос (15%),  $\text{Na}_2\text{O} - 2,7\text{SiO}_2$  (15%) +  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  (15%); експериментально вивчено вогнезахисні властивості лісових підстилок, оброблених гелеутворюючими системами при одночасно-роздільному та послідовному подаванні компонентів; встановлено витрати вогнегасної речовини, які забезпечують нерозповсюдження низової лісової пожежі.

У роботах [3; 18; 20] наведено результати лабораторних досліджень запобігання поширенню стійких низових лісових пожеж з використанням піноутворюючих вогнегасних систем  $\text{NaHCO}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ;  $\text{NaHCO}_3 + (\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$ ;  $\text{NaHCO}_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ;  $\text{NH}_4\text{HCO}_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ;  $\text{NH}_4\text{HCO}_3 + (\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$ ;  $\text{NH}_4\text{HCO}_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  при роздільно-одночасному і роздільно-послідовному подаванні компонентів.

У роботах [4; 11; 19] експериментально досліджено вогнезахисну дію гелеутворюючої системи ( $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ ) щодо хвойної лісової підстилки; отримано регресійне рівняння, що описує вплив концентрації компонентів системи, маси нанесеного покриття й часу сушіння обробленого лісового горючого матеріалу на час її займання.

У роботі [6] наведено результати лабораторних досліджень з розробки екологічно безпечної повітряно-механічної піни; встановлено, що використання екстракту мильного кореня як піноутворювача забезпечує отримання піни з достатніми фізико-хімічними властивостями.

У роботах [5; 7; 22] проаналізовано результати експериментальних досліджень вогнезахисної дії гелеутворюючої системи ( $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ ) щодо хвойної лісової підстилки; на основі отриманого регресійного рівняння вивчено вплив концентрації компонентів системи, маси нанесеного покриття й часу сушіння обробленого лісового горючого матеріалу на час її вогнезахисної дії; розглянуто залежність часу вогнезахисної дії від питомої витрати ГУС і часу сушіння обробленої ділянки лісової підстилки.

У роботах [8; 23; 24] проаналізовано результати експериментальних досліджень вогнезахисної дії гелеутворювальної системи ( $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ ) щодо хвойної лісової підстилки в реальних умовах; встановлено оптимальні значення питомої витрати ГУС, що запобігають поширенню пожежі як на рівнинній місцевості, так і на схилах під кутом  $30^\circ$ .

У роботах [12; 25] розглянуто результати дослідження можливості підвищення ефективності гасіння лісових пожеж за рахунок застосування під час створення загороджувальних смуг бінарних вогнегасних систем з високими оперативними вогнезахисними властивостями (піноутворюючих систем із зовнішнім піноутворенням та гелеутворюючих систем); експериментально визначено функціональні характеристики запропонованих композицій; оптимізовано склад, запропоновано метод й апробовано установку з роздільним подаванням вогнегасної речовини для гасіння пожеж гелеутворюючими складами.

У роботах [9; 26] розроблено математичну модель створення хімічної вогнезахисної смуги й розрахунку на її підставі часу створення вогнезахисної смуги для гасіння низових лісових пожеж за допомогою гелеутворюючої системи (5 %)  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + (35 \%) \text{CaCl}_2$  та запропоновано роздільно-послідовний спосіб нанесення компонентів для створення вогнезахисної смуги для гасіння низової лісової пожежі [12].

У роботах [10; 27] проаналізовано результати експериментальних досліджень вогнезахисної дії гелеутворюючої системи ( $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ ) щодо хвойної лісової підстилки; розглянуто залежність часу вогнезахисної дії від швидкості потоку повітря й нахилу поверхні імітованого рельєфу.

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи висвітлено в доповідях та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня:

*міжнародних:* „Обеспечение безопасности жизнедеятельности (Мінськ, 2016); „Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций” (Казахстан, Кокшетау, 2016); „Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій” (Черкаси, 2016, 2017, 2019); „Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності” (Львів, 2017); „Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту” (Харків, 2017, 2018); „Проблеми гражданской защиты: управление, предупреждение, аварийно-спасательные и специальные работы” (Казахстан, Кокшетау, 2017); „Огнезащита и тушение твердых горючих материалов” (Мінськ, 2018);

*всукраїнських:* „Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку” (Київ, 2017, 2018); „Пожежна безпека: проблеми та перспективи” (Харків, 2018);

*науково-практичному семінарі* „Проблеми цивільного захисту: управління, попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи” (Харків, 2017).

**Публікації.** Основні положення й наукові результати дослідження висвітлено у 12 наукових статтях, з яких 10 – у фахових виданнях України, 1 – у закордонному виданні, 1 – в інших виданнях України; 14 тезах доповідей на науково-технічних конференціях і 1 патенті України на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків списку використаних літературних джерел з 201 найменувань, містить 170 сторінку друкованого тексту (з них 137 сторінок основного тексту), 17 таблиць, 19 рисунків та 3 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету й завдання, визначено об'єкт і предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про апробацію та оприлюднення результатів дослідження.

У **першому розділі** „Шляхи підвищення ефективності методів і засобів гасіння лісових пожеж” відзначено, що проблема ефективного гасіння лісових пожеж є актуальною в багатьох країнах, зокрема в Україні, але, незважаючи на значну увагу до неї, вона до сьогодні далека від вирішення. Багато в чому це зумовлено різноманітністю умов виникнення й поширення лісових пожеж, а також великими масштабами цього лиха.

Проаналізовано літературні джерела, у яких запропоновано й досліджено різні засоби гасіння низових лісових пожеж. Установлено основні області застосування вогнегасних засобів, їхні переваги й недоліки. У табл. 1 підсумовано відомості про позитивні властивості й недоліки різних методів і вогнегасних речовин, що їх використовують для гасіння низових лісових пожеж.

З'ясовано, що одним з найсуттєвіших недоліків рідкофазних хімічних засобів у випадку їх застосування для створення протипожежного бар'єру є високі втрати рідини за рахунок стікання її з вертикальних і похилих поверхонь. Цього недоліку значною мірою позбавлені швидкотвердіючі піни (ШТП), та два види бінарних вогнегасних систем (БВС) піноутворюючі (ПУС) та гелеутворюючі (ГУС) системи. Водночас такі види систем мають інший недолік – низьку проникну здатність. Це не дозволяє забезпечити ефективний вогнезахист лісової підстилki великої товщини – полум'я може пройти під шаром гелю або піни. Зроблено висновок, що подолання цього недоліку з одночасним забезпеченням малих втрат вогнегасної речовини (ВР) дозволить підвищити ефективність гасіння низових лісових пожеж.



Позитивні властивості та недоліки засобів і методів  
під час гасіння низових лісових пожеж

Метод або вогнегасна речовин	фактори, що визначають ефективність пожежогасіння					
	коєф. використання	проникна 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				-	++	+
закидання грунтом				++	++	±
створення протипожежних бар'єрів					++	++
створення протипожежних бар'єрів хімічними засобами	+	++	++	+	-	-
відпал				+	+	+
авіаційні методи (вода)	-	+	+	-	-	-

де „+++” – дуже висока, „+” – висока, „±” – середня, „-”, „--” – низька.

У другому розділі „Шляхи підвищення ефективності методів і засобів гасіння лісових пожеж” на основі аналізу механізмів припинення горіння й сучасних тенденцій розвитку засобів гасіння горючих речовин обрано принципову схему вогнегасної системи для гасіння низових лісових пожеж.

По-перше, на основі загальновідомого факту, що для гасіння низових лісових пожеж середньої та високої інтенсивності доцільно використовувати пасивні методи, було обрано метод створення протипожежного бар'єру шляхом оброки лесових горючих матеріалів (ЛГМ) розчинами хімікатів. По-друге, для зменшення втрат вогнегасних речовин для гасіння низових лісових пожеж було обґрунтовано використання двох видів БВС ПУС і ГУС. По-третє, було поставлено завдання підвищити проникні властивості вогнегасних речовин (ВР) у матеріал лісової підстилки.

Як ГУС було обрано систему  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2+\text{CaCl}_2$ , яка показала високі вогнезахисні властивості. Оскільки для ПУС раніше не було проведено досліджень вогнезахисних властивостей, то сформульовано потребу вивчення вогнезахисних властивостей усіх відомих ПУС:  $\text{NaHCO}_3+\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{NaHCO}_3+(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$ ,  $\text{NaHCO}_3+\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{NH}_4\text{HCO}_3+\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{NH}_4\text{HCO}_3+(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$ ,  $\text{NH}_4\text{HCO}_3+\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ .

Для забезпечення глибинного просочування лісової підстилки запропоновано використовувати роздільно-послідовне подавання компонентів БВС. Також обґрунтовано потребу в оптимізації складів БВС та порівнянні їхніх вогнезахисних властивостей щодо матеріалу лісової підстилки.

У третьому розділі „Дослідження вогнезахисних характеристик БВС по відношенню до матеріалу лісової підстилки” проведено експериментальні дослідження проникаючих і вогнезахисних властивостей ГУС і ПУС щодо матеріалу лісової підстилки при роздільно-послідовному й роздільно-одночасному подаванні компонентів. Установлено, що ГУС і ПУС можуть забезпечити проникнення вогнегасної речовини вглиб лісової підстилки в разі використання роздільно-послідовного способу подавання компонентів.

Також на основі результатів лабораторних досліджень установлено, що ГУС і ПУС мають близькі вогнезахисні властивості щодо хвойної лісової підстилки при малому часі сушіння, а при часі сушіння більше 0,5 години ГУС виявляють суттєву перевагу щодо вогнезахисних властивостей порівняно з ПУС. На основі цього факту вогнегасною системою було обрано ГУС.

Для встановлення оптимального складу ГУС  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2+\text{CaCl}_2$  було досліджено вплив відкритого полум'я на лабораторне модельне вогнище низової лісової пожежі малого розміру (10x10 см), яке складалось із соснового опаду товщиною 5 см. Підстилка була сформована на металевій решітці й підвішена на спеціальній установці (рис. 1).

Попередньо зважені модельні вогнища обробляли з розпилювачів ОП-301 розчинами каталізаторів гелеутворення, а потім гелеутворювачем. Кількісним показником вогнезахисної дії ГУС було прийнято час займання верхньої частини модельного вогнища низової лісової пожежі в умовах дії відкритого полум'я. Вибір параметрів ГУС і обробку отриманих результатів виконано з використанням методів теорії планування експерименту. З урахуванням хімічної сумісності компонентів ГУС та умови можливості швидкого гелеутворення було визначено рівні варіювання чотирьох чинників – концентрації компонентів ГУС  $C_{\text{Si}}$  і  $C_{\text{Ca}}$  (%), питомої поверхневої витрати вогнегасного засобу  $m$  (г/см<sup>2</sup>) і часу сушіння  $t$  (хв.) (табл. 2).



Рис. 1. Лабораторні дослідження вогнезахисної дії лісової підстилки, обробленої ГУС при прямому впливі полум'я

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, яку доповнено сімома дослідями в центрі плану й вісьмома дослідями в зоряних точках з плечем, що дорівнює двом інтервалам варіювання.

Таблиця 2

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	Зоряні точки
Концентрація $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ , %, ( $C_{\text{Si}}$ )	$x_1$	15	5	20	10	25	5
Концентрація $\text{CaCl}_2$ , %, ( $C_{\text{Ca}}$ )	$x_2$	20	7,5	27,5	12,5	35	5
Маса нанесеного покриття, $\text{г/см}^2$ , ( $m$ )	$x_3$	0,7	0,15	0,85	0,55	1	0,4
Час сушіння ЛГМ, хв., ( $t$ )	$x_4$	30	15	45	15	60	0

Виконавши розрахунок значень коефіцієнтів регресії та оцінивши їхню значимість за критерієм Стьюдента, ми отримали рівняння регресії залежності часу займання ( $T_B$ ) лабораторного модельного вогнища ЛГМ у кодованих координатах:

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

або в натуральних координатах:

$$T_B = 15,45 - 0,1013 \cdot C_{Si} + 0,5232 \cdot C_{Ca} - 38,847 \cdot m - 0,238 \cdot t - 0,0211 \cdot C_{Si} \cdot C_{Ca} - 0,804 \cdot C_{Si} \cdot m + 0,01025 \cdot C_{Si} \cdot t - 0,00352 \cdot C_{Ca} \cdot t + 0,0144 \cdot C_{Si}^2 + 42,93 \cdot m^2 + 0,0020044 \cdot t^2. \quad (2)$$

Таблиця 3

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

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$T_B$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$T_B$
-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	4,0
-1	-1	-1	+1	5,0	0	0	0	0	3,66
+1	-1	-1	+1	5,0	0	0	0	0	4,16
-1	+1	-1	+1	6,83	0	0	0	0	4,0
+1	+1	-1	+1	3,6	0	0	0	0	4,81
-1	-1	+1	+1	8,0	0	0	0	0	4,33
+1	-1	+1	+1	3,0	0	0	0	0	3,16
-1	+1	+1	+1	9,8	0	0	0	0	3,33
+1	+1	+1	+1	4,4					

Максимальне значення функції (1) 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.

Аналіз рівнянь (1; 2) показав, 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 при мінімальних значеннях концентрації  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  і часу сушіння обробленої ділянки, а також при максимальних значеннях концентрації  $\text{CaCl}_2$  (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. Найкращі вогнезахисні властивості для лісової підстилки забезпечує ГУС  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%).

На рис. 2 представлено залежність часу вогнезахисної дії ГУС  $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  від концентрацій рідкого скла  $C_{\text{Si}}$  і хлориду кальцію  $C_{\text{Ca}}$  при фіксованих питомій витраті ГУС та часі сушіння.

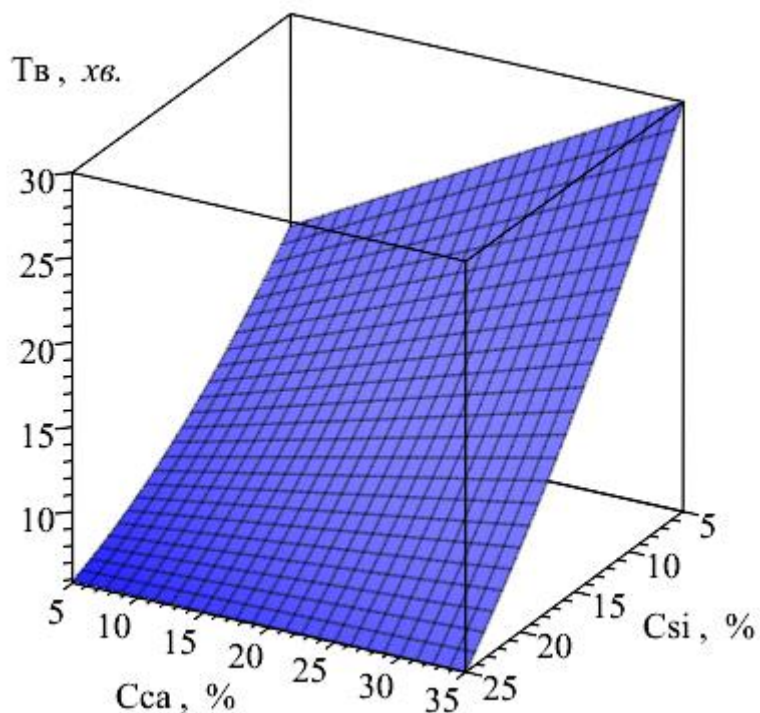


Рис. 2. Графік залежності (2) при  $m=1 \text{ г/см}^2$  та  $t=0 \text{ хв.}$

На рис. 3 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.

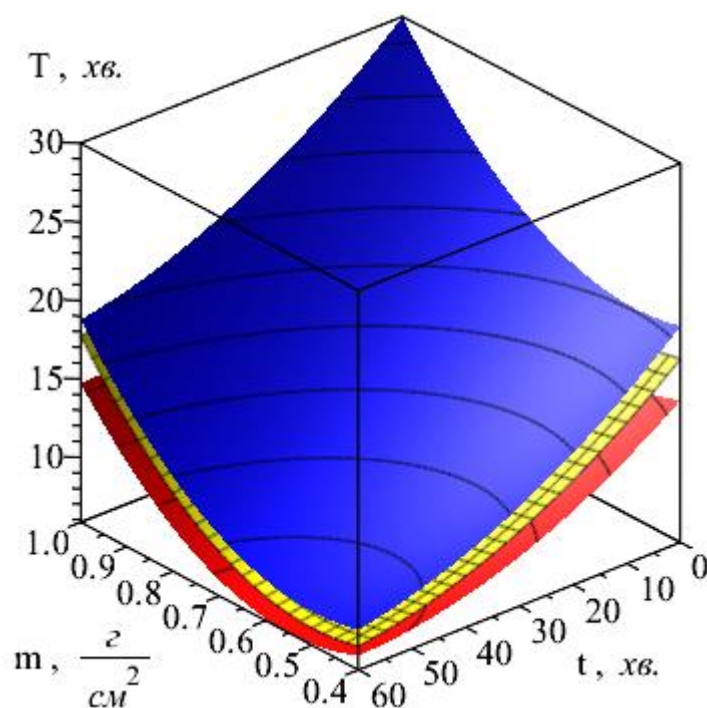


Рис. 3. Графік залежності (2) при: 1 –  $C_{\text{Si}}=5\%$ ,  $C_{\text{Ca}}=35\%$ ; 2 –  $C_{\text{Si}}=5\%$ ,  $C_{\text{Ca}}=30\%$ ; 3 –  $C_{\text{Si}}=10\%$ ,  $C_{\text{Ca}}=35\%$

На рис. 4 представлено 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 перестають змінюватися. Це надалі було підтверджено експериментальними дослідженнями.

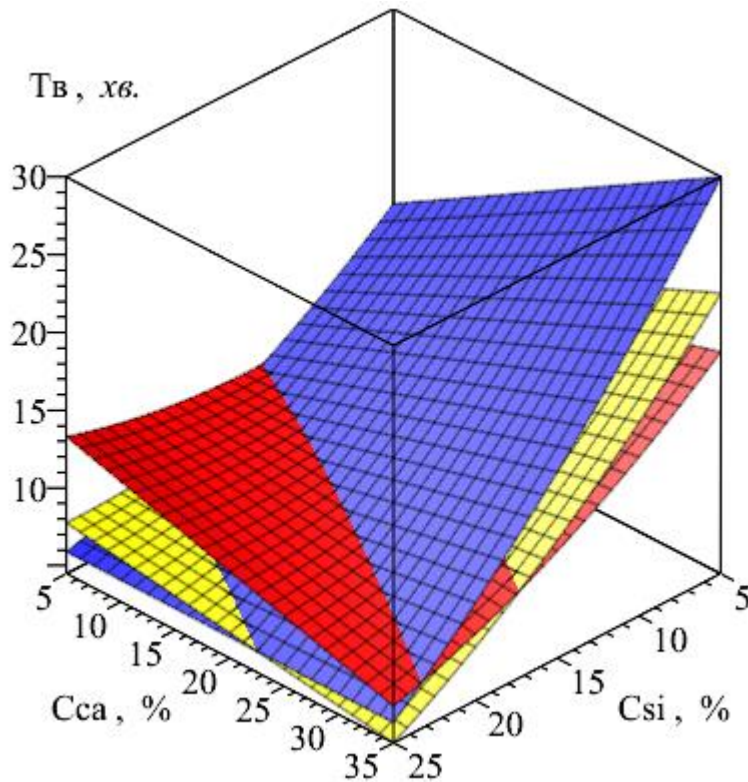


Рис. 4. Графік залежності (2) при: 1 –  $m=1$  г/см<sup>2</sup>,  $t=0$  хв.; 2 –  $m=1$  г/см<sup>2</sup>,  $t=30$  хв.; 3 –  $m=1$  г/см<sup>2</sup>,  $t=60$  хв.

Для наближення умов гасіння модельних вогнищ пожежі малих розмірів до умов гасіння реальних пожеж було досліджено вогнезахисні властивості ГУС на модельному вогнищі низової лісової пожежі в лабораторних умовах. Розмір робочої поверхні установки для досліджень низових лісових пожеж становить 4,5х2 метрів. Робоча поверхня дозволяє змінювати її кут нахилу, а також є можливість створювати повітряні потоки в межах від 0 до 4 м/с.

Основні параметри проведення експерименту на модельному вогнищі пожежі великого розміру:

- швидкість потоку повітря на виході – від 0 до 4 м/с;
- розмір підстилки – 1000х500 мм;
- товщина шару лісової підстилки – 50 мм;
- маса підстилки – 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 градусів;



- склад підстилки: суха соснова хвоя, дрібні гілочки й шишки;
- ГУС – 5%  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + 35\% \text{CaCl}_2$ .

Результати проведеного експерименту дозволяють зробити такі висновки:

- оброблена ГУС 5%  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + 35\% \text{CaCl}_2$  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 градусів;
- нанесення шару гелю з питомою витратою  $0,2 \text{ г/см}^2$  достатньо для захисту від впливу іскор і фрагментів тліючих гілочок при всіх вивчених швидкостях вітрового потоку.

Також було проведено натурні експерименти (рис. 5) після 17 днів стійкої спекотної погоди при температурі 28 – 33°C, відносній вологості повітря 30 – 35 %, швидкості вітру 2 – 5 м/с.



а)



б)

Рис. 5. Зовнішній вигляд лісової хвойної підстилки:

а) під час проведення дослідження; б) після завершення експерименту

Основними висновками за результатами натурального експерименту є такі:

- питомої витрати ГУС  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%), що дорівнює  $0,7 \text{ г/см}^2$ , 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  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%) з питомою витратою  $0,2 \text{ г/см}^2$ .

У четвертому розділі „Гасіння низових лісових пожеж за допомогою бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів” розглянуто питання щодо практичного використання запропонованої вогнегасної системи для гасіння низових лісових пожеж середньої та високої інтенсивності.

Обґрунтовано, що робочі розчини – складники ГУС – можна готувати як завчасно, так і безпосередньо перед гасінням пожежі.

Показано, що за токсикологічними параметрами запропоновані ГУС відповідають вимогам для рідинних засобів пожежогасіння, тому робота з ними вимагає застосування тільки найпростіших засобів захисту особового складу й техніки.

На основі математичного моделювання процесу створення хімічної вогнезахисної смуги (ХВС) установлено, що ця смуга має складатися з двох ділянок (рис. 6). Першу ділянку шириною  $h_1$  обробляють на всю глибину підстилки з питомою витратою  $\Phi_1$ , що забезпечує неможливість поширення горіння в шарах лісової підстилки під поверхневим шаром гелю. Для цього застосовують роздільно-послідовний спосіб подавання компонентів ГУС. Другу ділянку шириною  $h_2$  створюють способом роздільно-одночасного подавання компонентів ГУС з питомою витратою ГУС  $\Phi_2$ . У цьому випадку на поверхні підстилки утворюється шар гелю, який захищає її тільки від вторинних проявів горіння (іскор, теплового випромінювання та ін.).

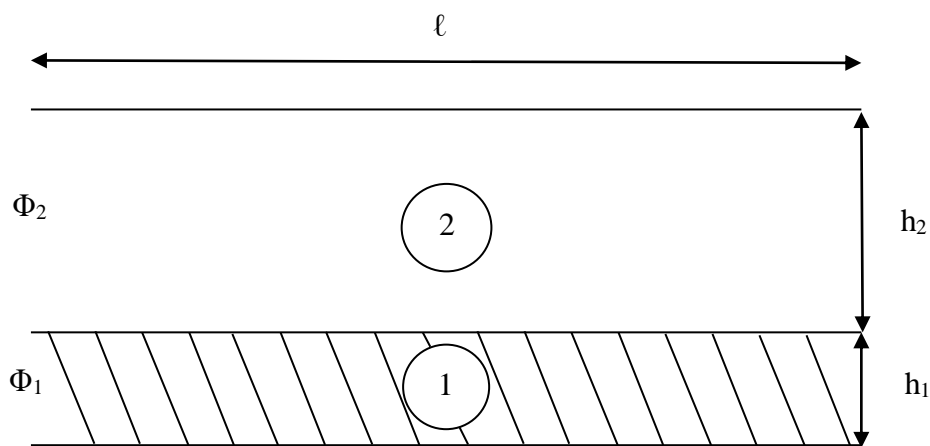


Рис. 6. Схема ХВС, що створена за допомогою ГУС з двома ділянками:

$\ell$  – довжина створюваної ХВС;  $h_1$ ,  $h_2$  – ширина ділянок вогнезахисної смуги;  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  – питома витрата ГУС на ділянках ХВС

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

$$\frac{Q_1}{h_1 \cdot \Phi_1} = \frac{Q_2}{h_2 \cdot \Phi_2}, \quad (3)$$



де  $Q$  – витрата вогнегасної речовини (ВР),  $\Phi_1, \Phi_2$  – питома поверхнева витрата вогнегасної речовини,  $h_1, h_2$  – ширина смуги:

$$Q = \frac{m}{\tau}, \quad (4)$$

де  $m$  – маса вогнегасної речовини, поданої за час  $\tau$ ,  $\Phi$  – питома поверхнева витрата вогнегасної речовини:

$$\Phi = \frac{m}{S}, \quad (5)$$

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

На підставі запропонованої моделі можна розрахувати час, необхідний для обробки вогнезахисної смуги довжиною  $\ell$ :

$$\tau = \frac{\ell}{v} = \frac{\ell \cdot h \cdot \Phi}{P}. \quad (6)$$

Для практичної реалізації запропонованого способу облаштування ХВС сконструйовано й виготовлено мобільну установку з роздільним подаванням компонентів для гасіння лісових пожеж МУРПК-ГЛП (рис. 7). Технічні характеристики установки наведено в табл. 4.



Рис. 7. Зовнішній вигляд установки МУРПК-ГЛП

Для оцінювання масових витрат ВР для улаштування ХВС було прийнято такі параметри: довжина вогнезахисної ділянки  $\ell=1000$  м; ширина ділянки (1)  $h_1=0,2$  м; ширина ділянки (2)  $h_2=3,8$  м; товщина лісової підстилки  $0,05$  м; швидкість вітру до  $2$  м/с.

Для таких самих параметрів ХВС було оцінено фінансові витрати на хімічні речовини, які потрібні на улаштування вогнезахисної смуги за допомогою запропонованого методу гасіння низових лісових пожеж. Вони становлять на  $1 \text{ м}^2$  вогнегасної смуги  $\sim 10$  грн. або  $\sim 40$  грн. на  $1$  м фронту низової лісової пожежі.

Розрахунки витрат ВР дали такі результати: 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%  $\text{CaCl}_2$ ). У перерахунку на сухі речовини: (5%  $\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2$ ) – 227,5 кг, (35%  $\text{CaCl}_2$ ) – 1592,5 кг, загальна маса сухої речовини компонентів ГУС – 1820 кг. Відповідно води необхідно 7280 кг.

Також у розділі 4 надано практичні рекомендації для гасіння низових лісових пожеж середньої та високої інтенсивності за допомогою БВС на основі ГУС (табл. 5 і 6).

Таблиця 4

## Технічні характеристики установки МУРПК-ГЛП

Маса установки (заправлена/не заправлена)	230 / 125 кг
Ємність балонів	2 балони по 50 л
Габаритні розміри	700x700x1000мм
Робочий тиск	3 бар
Дальність подавання компактного струменя	8м
Дальність подавання розпиленого струменя	6м
Форсунки	6 одиниць, плоскорадіальні

Таблиця 5

Потрібна питома витрата компонентів ГУС для ділянки – 1 ( $\Phi_1$ ) для різної товщини шару лісової підстилки (А) (ширина смуги 1 становить 20 см)

А, см	$\leq 2$	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
$\Phi_1$ кг/м <sup>2</sup>	2,8	4,2	5,6	7,0	8,4	9,8	11,2	12,6	14

Таблиця 6

Потрібна ширина ділянки – 2 ( $h_2$ ) для різної висоти полум'я (Н). Питома поверхнева витрата ВР для смуги – 2  $\Phi_2 = 2$  кг/м<sup>2</sup>

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	

## ВИСНОВКИ

У дисертації, яка є завершеним науковим дослідженням, одержано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності забезпечують вирішення актуального науково-практичного завдання – підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів.

За підсумками виконання наукової роботи зроблено такі висновки:

1. 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.

2. Розроблено методи подавання вогнегасних речовин, які дозволяють забезпечити високі вогнезахисні властивості лісової підстилки за рахунок підвищення проникаючої здатності гелю, що досягається послідовно-роздільним подаванням гелеутворювача й каталізатора гелеутворення.

3. На основі математичних методів планування та обробки результатів експерименту встановлено оптимальний склад гелеутворюючої композиції –  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%), який забезпечує збереження вогнезахисних властивостей лісової підстилки при питомій витраті  $0,7 \text{ г/см}^2$  на час до чотирьох годин.

4. Установлено, що для запобігання займання ділянки лісової підстилки поза зоною основної вогнезахисної смуги під одночасним впливом теплового випромінювання, фрагментів тліючих гілочок та іскор потрібно нанести ГУС  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%) з питомою витратою  $0,2 \text{ г/см}^2$ .

5. 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.

6. 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.

### **Список публікацій здобувача, у яких висвітлено основні наукові результати дисертації**

#### **Статті у вітчизняних наукових фахових виданнях**

1. Киреев А.А. Выбор эффективных огнетушащих средств для тушения лесных пожаров / А.А. Киреев, Д.И. Савельев, К.В. Жерноклев // Проблемы пожарной безопасности. – 2015. – Вып. 38. – С. 77-82.

2. Савельев Д.И. Повышение эффективности использования гелеобразующих составов при борьбе с низовыми лесными пожарами /

Д.И. Савельев, А.А. Киреев, К.В. Жерноклев // Проблемы пожарной безопасности. – 2016. – Вып. 39. – С. 237 – 242.

3. Савельев Д. И. Экспериментальные исследования огнепреграждающих свойств лесной подстилки, обработанной пенообразующими системами / Д.И. Савельев, А.А. Киреев, К.В. Жерноклев // Проблемы пожарной безопасности. – 2016. – Вып. 40. – С. 169-173.

4. Савельев Д.И. Исследование огнезащитного действия гелеобразующих составов по отношению к хвойной лесной подстилке / Д.И. Савельев, С.Н. Бондаренко, А.А. Киреев, К.В. Жерноклев // Проблемы пожарной безопасности. – 2017. – Вып. 41. – С. 147-153.

5. Saveliev D.I. Influence of consumption rate and drying time of gel-forming systems on their fire retardant properties when applied to coniferous forest litter / D.I. Saveliev // Проблемы пожарной безопасности. – 2017. – Вып. 42. – С. 115-120.

6. Чиркина М.А. Возможность использования экологически чистых пенообразователей для тушения пожаров / М.А. Чиркина, Д.И. Савельев, О.Я. Питак // Проблемы пожарной безопасности. – 2017. – Вып. 42. – С. 169-173.

7. Савельев Д.І. Дослідження вогнезахисної дії гелеутворювального складу на хвойній лісовій підстильці в лабораторних умовах / Д.І. Савельєв, М.О. Чіркина // Пожежна безпека. – 2017. – Вып. 31. – С. 110-114.

8. Савельев Д.І. Дослідження можливості використання гелеутворюючих вогнезахисних складів під час гасіння лісової хвойної підстилки в реальних умовах / Д.І. Савельєв, М.О. Чиркина // Проблемы пожарной безопасности. – 2018. – Вып. 44. – С. 119-123.

9. Савельев Д.І. Моделювання тушіння низових лісових пожеж за допомогою гелеутворюючих систем шляхом створення вогнезахисної смуги / Д.І. Савельєв, М.О. Чіркина // Проблемы пожарной безопасности. – 2019. – Вып. 45. – С. 142-148.

10. Савельев Д.І. Вогнезахисні властивості гелеутворюючих систем на модельному вогнещі низової лісової пожежі великих розмірів / Д.І. Савельєв, В.Г. Борисенко, І.О. Барабаш // Проблемы пожарной безопасности. – 2019. – Вып. 46. – С. 168-173.

### **Статті в міжнародних виданнях**

11. Савельев Д.И. Бинарные огнетушащие системы с раздельной 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, – С. 31 – 36.

### **Патенти**

12. Пат. 120982 Україна, МПК (2006.01) А62С 3/02. Спосіб гасіння низових лісових пожеж за допомогою бінарних гелеутворюючих систем / Кіреєв О.О., Савельєв Д.І., Трегубов Д.Г., Онацька А.О.; Заявник та потентовласник Національний університет цивільного захисту України. - № u 2017 05311, заяв. 30.05.2017, опубл. 27.11.2017, бюл.№ 22.

### Статті в інших виданнях

13. Киреев А.А. Гелеобразующие покрытия – эффективные средства оперативной огнезащиты. Обзор / А.А. Киреев, Д.И. Савельев // Пожежна безпека: теорія і практика : збірник наукових праць. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2015. – № 20. – С. 33-41.

### Матеріали науково-технічних конференцій

14. Савельев Д.И. Пути повышения эффективности тушения лесных пожаров / Д.И. Савельев, А.А. Киреев / Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов X Международной научно-практической конференции молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) : В 2-х ч. Ч. 1. – Минск : КИИ, 2016. – С. 159.

15. Савельев Д.И. Применение пенообразующих систем в тушении лесных пожаров / Д.И. Савельев, А.А. Киреев / Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Материалы VII Международной научно-практической конференции. 13-14 октября 2016 г. – Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, 2016 – С. 220.

16. Савельев Д.И. Изучение проникающих свойств бинарных огнетушащих составов при тушении лесного горючего материала / Д.И. Савельев, А.А. Киреев, М.А. Чиркина / Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. – С. 177-179.

17. Савельев Д.И. Повышение эффективности лесных пожаров путем применения бинарных огнетушащих систем/ Д.И. Савельев / Проблемы гражданской защиты: управление, предупреждение, аварийно-спасательные и специальные работы. Материалы Международной научно-практической конференции. 17 марта 2017 г. – Кокшетау, РГУ «КТИ КЧС МВД Республики Казахстан». – 2017. – С. 248-250.

18. Савельев Д.И. Тушение лесных пожаров путем создания защитных полос с помощью пенообразующих составов /Д.И. Савельев / Проблеми цивільного захисту: управління, попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи: збірник матеріалів науково-практичного семінару. – Харків: НУЦЗУ, 2017. – С. 125-126

19. Савельев Д.И. Гасіння лісових пожеж шляхом створення захисних смуг за допомогою бінарних вогнегасних систем / Д.І. Савельєв, О.О. Кіреєв / Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Зб. наук. праць XII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів: [в 2 ч.]. Ч. 1. – Львів: ЛДУ БЖД, 2017. – С. 168-169.

20. Савельев Д.И. Тушение лесных пожаров путем создания защитных полос с помощью пенообразующих составов / Д.И. Савельев / Проблеми та

перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. – Харків: НУЦЗУ, 2017. – С. 482.

21. Савельєв Д.И. Тушение лесных пожаров путем использования гелеобразующего огнезащитного состава с отдельной подачей / Д.И. Савельєв / Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: Матеріали 19 Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Київ: ІДУЦЗ, 2017. – С. 386-388.

22. Савельєв Д.И. К вопросу изучения гелеобразующих огнетушащих составов при тушении лесных низовых пожаров / Д.И. Савельєв, М.А. Чиркіна / Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. – С. 86-87.

23. Савельєв Д.И. Гелеобразующая система как эффективное средство для тушения лесных пожаров / Пожежна безпека: проблеми та перспективи: збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Х.: НУЦЗУ, 2018. – С. 118-120.

24. Савельєв Д.І. Спосіб гасіння лісових пожеж за допомогою гелеутворюючих систем / Д.І. Савельєв, М.А. Чиркіна / Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: Матеріали 20 Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Київ, 9-10 жовт. 2018 р. – Київ: Видавничий дім «Гельветика», 2018. – С. 385-388.

25. Савельєв Д.І. Розробка способу роздільної подачі бінарної вогнегасної системи для гасіння лісових пожеж / Д.І. Савельєв / Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. – Харків: НУЦЗ України, 2018. – С. 105-106.

26. Савельєв Д.И. Применение гелеобразующих огнетушащих систем с отдельной подачей для тушения низового лесного пожара Международной заочной научно-практической конференции: Огнезащита и тушение твердых горючих материалов – Минск: УГЗ, 2018. – С. 20-22.

27. Савельєв Д.І. Дослідження можливості застосування гелеутворюючих складів під час гасіння хвойної підстилки в реальних умовах / Д.І. Савельєв, М.А. Чиркіна / Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. – С. 160-162.

## АНОТАЦІЯ

**Савельєв Д. І. Підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. Національний університет цивільного захисту України, Харків, 2020.

Дисертацію присвячено розв'язанню актуального науково-прикладного завдання в галузі пожежної безпеки – підвищенню ефективності гасіння низових лісових пожеж. Для цього запропоновано створювати хімічні вогнезахисні смуги шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням компонентів. На основі аналізу основних механізмів припинення горіння та інших чинників, що впливають на ефективність гасіння, у роботі обґрунтовано використання для гасіння низових лісових пожеж ГУС як засобу створення загороджувальних смуг.

Для підвищення проникаючої здатності гелю запропоновано застосовувати роздільно-послідовний спосіб подавання компонентів ГУС, що дозволило забезпечити проникнення вогнегасної речовини на всю глибину лісової підстилки й тим самим унеможливило розповсюдження полум'я через загороджувальну смугу. На основі експериментальних досліджень встановлено, що оптимальним за вогнезахисними властивостями є ГУС  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%).

Нанесення гелеутворюючої композиції на лісовий горючий матеріал було запропоновано проводити нерівномірно. Смугу, яку передбачають створювати, розділяють на дві по-різному оброблені ділянки. Частину смуги обробляють на всю глибину підстилки з питомою витратою  $0,7 \text{ г/см}^2$  при ширині смуги 20 см, яка забезпечує неможливість поширення горіння в шарах лісової підстилки, під поверхневим шаром гелю. Для цього застосовують роздільно-послідовний спосіб подавання компонентів ГУС. Другу частину смуги створюють способом роздільно-одночасного подавання компонентів ГУС з питомою витратою  $0,2 \text{ г/см}^2$ .

Установлено області застосування та переваги запропонованого засобу гасіння низових лісових пожеж порівняно з наявними засобами. На основі отриманих результатів розроблено практичні рекомендації щодо застосування ГУС для гасіння низових лісових пожеж.

**Ключові слова:** низові лісові пожежі, хімічні вогнезахисні смуги, бінарні вогнегасні системи, гелеутворюючі складки.

## АННОТАЦІЯ

**Савельев Д. И. Повышение эффективности тушения низовых лесных пожаров путем использования бинарных огнетушащих систем с раздельной подачей компонентов.** – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидат технических наук по специальности 21.06.02 – пожарная безопасность. Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи в сфере пожарной безопасности – повышению эффективности гашения низовых лесных пожаров. Для этого предложено создавать химические огнезащитные полосы путем использования бинарных огнетушащих систем с отдельной подачей компонентов. На основе анализа основных механизмов прекращения горения и других факторов, влияющих на эффективность гашения, в работе обосновано использование для гашения низовых лесных пожаров ГУС как средства создания заградительных полос.

Для повышения проникающей способности геля предложено применять раздельно-последовательный способ подачи компонентов ГУС, что позволило обеспечить проникновение огнетушащего вещества на всю глубину лесной подстилки и тем самым сделало невозможным распространение пламени через заградительную полосу. На основе экспериментальных исследований установлено, что оптимальным по огнезащитным свойствам является ГУС  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%).

Нанесение гелеобразующей композиции на лесной горючий материал было предложено проводить неравномерно. Полоса, которую предусматривается создавать, разделяется на два по-разному обработанных участка. Часть полосы обрабатывается на всю глубину подстилки с удельным расходом  $0,7 \text{ г/см}^2$  при ширине полосы 20 см, которая обеспечивает невозможность распространения горения в слоях лесной подстилки, под поверхностным слоем геля. Для этого применяется раздельно-последовательный способ подачи компонентов ГУС. Вторая часть полосы создается способом раздельно-одновременной подачи компонентов ГУС с удельным расходом  $0,2 \text{ г/см}^2$ .

Установлены области применения и преимущества предложенного средства гашения низовых лесных пожаров по сравнению с существующими средствами. На основе полученных результатов разработаны практические рекомендации относительно применения ГУС для гашения низовых лесных пожаров.

**Ключевые слова:** низовые лесные пожары, химические огнезащитные полосы, бинарные огнетушащие системы, гелеобразующие составы.

## ANNOTATION

**Saveliev D. I. Improving forest fires suppression effectiveness by means of applying binary fire-extinguishing systems with separate discharge.** – Qualifying research paper. Manuscript.

Thesis for a candidate degree in Technology in speciality 21.06.02 – Fire Safety. National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, 2020.



This thesis is focused on dealing with one of the topical issues in theoretical and applied fire safety, namely improving the effectiveness of forest fires suppression by means of applying binary fire extinguishing systems with separate discharge of the components of the gel-forming compositions (GFC).

The approaches to suppressing ground forest fires which are used at present are not very effective in fighting ground forest fires even if large forces are involved and various means of suppression are applied.

Taking into account the mechanisms which stop combustion, as well as some other factors which influence the effectiveness of ground forest fires suppression, the use of GFC as a means of creating fire breaks was justified in this thesis. The fire-retardant properties of the layers of gel can be explained by the presence of water in their composition which is a substance with an abnormally high cooling action. In order to decrease the consumption of water through its evaporation from the gel due to the influence of natural factors the addition of a highly hygroscopic substance – calcium chloride – to the GFC was suggested.

One of the disadvantages of using the layers of gel as a means of creating fire breaks is the possibility that the fire might spread under it. This phenomenon was observed when the thickness of the forest litter exceeded 3 cm and the gel could not penetrate into its layers properly. In order to deal with the above-mentioned disadvantage two methods were put forward such as the use of foam-forming systems (FFS) and separate and consecutive application of the components of the gel-forming systems (GFS). Both approaches helped to ensure the complete penetration of the fire retardant into the forest litter which prevented the spread of fire across the fire break.

In the course of laboratory experiments with the use of small-scale model fires the fire retardant properties of the two types of binary systems – GFS and FFS – applied to forest litter were tested. Their comparison allowed us to make the following conclusions:

- GFSs and FFSs can ensure the penetration of a fire retardant through the forest litter if they are discharged in a separate and consecutive way;
- GFSs and FFSs have similar fire retardant properties when applied to forest litter if the drying time is not very long;
- GFS have considerable advantages over FFSs in terms of their fire retardant properties if the drying time exceeds 30 minutes.

With regard to the above said the GFS  $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  was selected for further experiments. The mathematical methods of experimental planning allowed to determine the relation between the time of ignition of the forest litter covered with the GFS and the concentrations of  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ , the consumption surface rate of the GFS and the drying time.

This GFS was used for further studies of its fire retardant properties when applied to model ground fires of ~1 m at varying airflow rates and angles of surface

inclination. As a result, it was concluded that the GFS  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%) with the consumption rate of  $0,7 \text{ gr/cm}^2$  applied to a 20-centimetre-wide firebreak created a fire barrier which would last from 1 to 4 hours with the surface inclination of  $40^\circ$  to the horizon. It was also discovered that in order to prevent the ignition of the forest litter which was not part of the firebreak, but was under the simultaneous influence of thermal radiation, fragments of smoldering spines, and sparks, it was necessary to discharge the GFS  $\text{CaCl}_2$  (35%) +  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$  (5%) with the consumption rate of  $0,2 \text{ gr/cm}^2$ .

Therefore, this GFS can be used to create a fire retardant barrier preventing the spread of medium and high intensity ground forest fires. We also came to the conclusion that there was no need in applying the GFS with the highest consumption rate to all areas of the fire break. Thus, the first 20-centimetre-wide zone has to be covered with the GFS with the consumption rate of  $0,7 \text{ gr/cm}^2$ , and the penetration of the gel into all the layers of the forest litter for this part of the firebreak is required. This zone is supposed to guarantee that the combustion will not spread across the forest litter under the surface layer of the gel. The components of the GFS should be discharged separately and consecutively. The other part of the break is created with the help of separate, but simultaneous discharge of the GFS components with the consumption rate of  $0,2 \text{ gr/cm}^2$ . The width of this part of the break will depend of the height of the flame. The layer of the gel which is created on the surface of the forest litter protects it from the secondary manifestations of combustions (sparks, thermal radiation et al.).

We worked out a range of practical recommendations for the use of the GFS to extinguish ground forest fires. Thus, the above-described fire-extinguishing system when used for creating a firebreak has a number of advantages:

- in comparison with water as to the mass of a fire-extinguishing substance, the time of its action and, in case of long distances to the source of water, the application of the GFS ensures less expenditure on dealing with high intensity forest fires;
- in contrast to the use of heavy excavating machinery the GFS allows to create a firebreak in a shorter period of time and with no restrictions as to the relief, types of ground and the peculiarities of the forest;
- as opposed to water and chemical solutions, the use of the GFS is more economical and environmentally friendly;
- compared to backfires, the application of the GFS allows to make the loss of forests not so large-scale;
- in contrast to the use of aviation, the GFS helps to decrease the financial expenditure, as well as avoid the involvement of additional manpower and fire-extinguishing means.

Therefore, one of the topical scientific and practical tasks in the field of fire safety was solved, which is improving the effectiveness of ground forest fires suppression by applying binary fire-extinguishing systems with separate and consecutive as well as separate and simultaneous discharge of the GFS components.

The approach suggested has a range of advantages over the approaches currently used as it is more effective, economical, and environmentally friendly.

**Key words:** ground forest fires, a firebreak, separate and successive discharge of components, separate and simultaneous discharge of components, gel forming systems.

Підписано до друку 18.03.2020. Формат 60x84/16.  
Папір 80 г/м<sup>2</sup>. Друк ризограф. Авт. арк. 1,6.  
Тираж 100 прим. Вид. № 110/14. Зам. № 697/14.  
Сектор редакційно-видавничої діяльності  
Національного університету цивільного захисту України  
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94