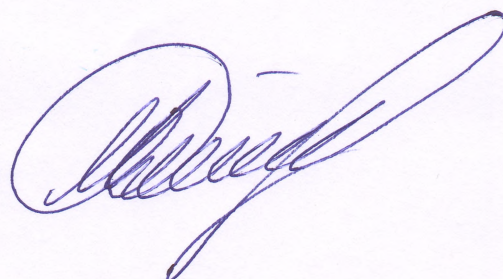


**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ**

ЛАГНО Денис Вікторович



УДК 614.842.6:614.8.086

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ
У ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ЛІСАХ**

21.06.02 – пожежна безпека

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2026

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
КОСТЕНКО Віктор Климентович,
Донецький національний технічний університет
Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри
природоохоронної діяльності.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ШНАЛЬ Тарас Миколайович
Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України, професор кафедри
будівельних конструкцій та мостів

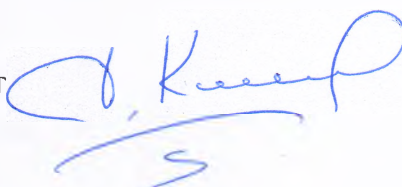
кандидат технічних наук, доцент
МАЛАДИКА Ігор Григорович,
Черкаський державний технологічний університет
Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри
геодезії, землеустрою, будівельних конструкцій та безпеки
життєдіяльності

Захист відбудеться «03» вересня 2026 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 35.874.01 у Львівському державному університеті безпеки
життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського державного
університету безпеки життєдіяльності за адресою: вул. Клепарівська, 35, м. Львів,
79007, а також на сайті спеціалізованої вченої ради Д 35.874.01, за електронною
адресою: <https://ldubgd.edu.ua/content/zahisti-disertacy-2>.

Автореферат розісланий «24» липня 2026 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, доцент



Дмитро КОБИЛКІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ліси, забруднені радіонуклідами (зокрема внаслідок аварії на ЧАЕС), становлять серйозну екологічну загрозу при виникненні лісових пожеж. Горіння органічних матеріалів у таких зонах призводить до повторного вивільнення радіоактивних частинок у повітря, що може спричинити радіаційне забруднення нових територій та загрозу для життя й здоров'я людей. З огляду на зміну клімату та зростання кількості пожеж, питання підвищення ефективності їх гасіння в радіоактивно забруднених регіонах є надзвичайно актуальним для екологічної безпеки країни та збереження природних ресурсів.

Дослідженням пожежної небезпеки, пожеж та їх наслідків у лісах, забруднених радіонуклідами, присвячені праці багатьох науковців, зокрема С. В. Зібцева, С. І. Азарова, В. В. Поповича, О. М. Сошенського, В. В. Гуменюка, В. А. Кашпарова та ін. Процеси виникнення, поширення та гасіння пожеж у лісових екосистемах досліджували М. Е. Alexander, R. L. Andrews, R. C. Rothermel, В. В. Ковалишин, Р. Ю. Сукач та ін. Але більшість наукових праць не стосувалися підвищення ефективності та захисту пожежників від негативного впливу радіації та підвищенню ефективності гасіння пожеж в забруднених радіонуклідами лісах. Це зумовлює актуальність дисертаційного дослідження, спрямованого на підвищення ефективності гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано відповідно до основних напрямів наукової діяльності Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України у 2016-2020 та 2021-2025 роках; Державної стратегії управління лісами України до 2035 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2021 року № 1777-р.; програми науково-дослідної роботи «Розробка методики формування дослідницької компетентності майбутніх фахівців з пожежної безпеки ЗВО ДСНС України» (державний реєстраційний номер 0121U108942), у якій здобувач був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є розроблення та обґрунтування ефективних методів і засобів гасіння лісових пожеж у зонах, забруднених радіонуклідами, з урахуванням специфіки радіаційної небезпеки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи, протипожежну техніку та обладнання для гасіння лісових пожеж у радіаційно забруднених зонах.

2. Визначити основні ризики та небезпеки, пов'язані з гасінням пожеж на таких територіях.

3. Оцінити ефективність протипожежної техніки та обладнання для роботи пожежних підрозділів у забруднених радіонуклідами лісах.

4. Запропонувати метод і розробити математичну модель поширення та гасіння лісової пожежі для оцінювання часу її локалізації з урахуванням сил і засобів.

5. Розробити рекомендації для оперативного реагування, безпеки під час гасіння та мінімізації екологічних наслідків, зокрема обґрунтувати метод осадження продуктів горіння та пилу з вмістом радіонуклідів та захисту пожежних рукавів та

розробити пристрій для створення водяної завіси, порівнявши його з існуючими розпилювачами.

6. Обґрунтувати метод підвищення ефективності роботи пожежників, що базується на покращенні орієнтації у просторі під час гасіння в умовах задимлення на основі розробленої системи та пристрою, який вимірює відстані до об'єктів за допомогою ультразвукових хвиль.

Об'єкт дослідження – процес гасіння лісових пожеж на забруднених радіонуклідами територіях.

Предмет дослідження – методи, технології та організаційно-технічні рішення щодо підвищення ефективності гасіння пожеж у радіаційно небезпечних лісових зонах.

Методи дослідження. У роботі використано низку методів, зокрема: аналізу та синтезу наукових джерел, експериментальних досліджень, системного аналізу, математичного моделювання та статистичних методів обробки інформації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні закономірностей перебігу процесів та підвищення ефективності засобів і способів гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах.

При цьому *вперше*:

- за інтегральною оцінкою основних видів протипожежної техніки та обладнання (лафетних переносних та ручних стволів; літаків та гвинтокрилів) встановлено найбільш ефективні, які рекомендовано для гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах;

- на основі експериментальних досліджень та розробленої математичної моделі функціонування запропонованого пристрою для створення водяної завіси, осадження продуктів горіння і пилу з вмістом радіонуклідів та захисту пожежних рукавів від теплової дії лісової пожежі, отримано залежність інтенсивності зрошування поверхні $I=2,132P^{0,457}$ від напору;

- на основі математичної моделі поширення та гасіння лісової пожежі отримано залежність часу її локалізації з урахуванням сил і засобів, задіяних у процесі гасіння.

Удосконалено:

- методи та засоби орієнтування у просторі пожежників в умовах сильного задимлення на основі експериментальних досліджень з використанням розробленої системи та пристрою, який вимірює відстані до об'єктів за допомогою ультразвукових хвиль.

Набули подальшого розвитку

- способи пожежогасіння та захисту пожежників від радіаційного випромінювання у радіаційно забруднених лісах.

Практичне значення одержаних результатів полягає у рекомендаціях щодо вибору засобів і способів гасіння лісових пожеж в радіоактивно забруднених лісах та захисту від дії іонізуючого випромінювання осіб у складі пожежно-рятувальних підрозділів та залучених сил і засобів.

Результати проведених досліджень впроваджені в практичну діяльність Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника (акт

впровадження від 07.11.2025), а також в освітній процес Національного університету цивільного захисту України (акт впровадження від 05.12.2025).

Результати роботи можуть застосовуватися фахівцями пожежної безпеки, яких залучають до ліквідації лісових пожеж для підвищення безпеки та ефективності гасіння.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, теоретичні та практичні результати, що винесені на захист і наведені в дисертації, одержано здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачем особисто: в [1] розроблено методика експериментальних досліджень пристрою створення водяної завіси та за результатами експериментальних досліджень розроблено математичну модель інтенсивності зрошення від напору; в [2] здійснено постановку завдання, сформульовано параметри та взято участь у розробленні математичної моделі; в [3] проведено аналіз та запропоновано заходи щодо підвищення рівня безпеки особового складу під час ліквідації пожеж у забруднених радіонуклідами лісах; у [4] проведено аналіз методів та пристроїв для осадження радіоактивного пилу під час гасіння низових пожеж; в [5] розроблено метод та пристрій для орієнтування у задимленому середовищі, проведено аналіз роботи пристрою в залежності від температури середовища, взято участь в організації експериментальних досліджень та проаналізовано результати їх проведення; в [6] запропоновано будову пристрою для створення водяної завіси; в [7] запропоновано будову та принцип дії пристрою для орієнтації в умовах обмеженої видимості; в [8] проаналізовано загрози для людей і довкілля внаслідок міграції радіонуклідів під час пожеж у Чорнобильській зоні відчуження; у [9] проведено аналіз загроз для пожежників у забрудненій радіонуклідами зоні під час гасіння пожеж; в [10] прокласифіковано заходи щодо забезпечення радіаційної безпеки під час гасіння пожеж у зоні відчуження; в [11] встановлено ефективність методів та засобів осадження радіоактивного пилу та продуктів горіння при локальному використанні; в [12] проаналізовано спосіб гасіння пожеж у Чорнобильській зоні з використанням літальних апаратів та встановлено його найбільшу безпечність та доцільність; в [14] проведено аналіз традиційних методів і способів гасіння пожеж на радіаційно забруднених територіях; у [15] проведено аналіз наявних пристроїв для створення водяних завіс. Наукові праці [13], [16] підготовлені самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися, обговорювалися й отримали позитивне схвалення на міжнародних та національних науково-практичних конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасний стан і перспективи розвитку ландшафтної архітектури, садово-паркового господарства, урбоекології та фітомеліорації» (м. Львів, 4-5 квітня 2019 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 11-12 квітня 2019 р.); 21 Всеукраїнській науково-практичній конференції (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах» (м. Київ, 8 жовтня 2019 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 9-11 квітня 2020 р.); X Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю

«Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 29-30 жовтня 2020 р.); XII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 8-9 квітня 2021 р.); XI Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 28-29 жовтня 2021 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022») (м. Харків, 12 жовтня 2022 р.); XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 26 квітня 2022 р.).

Публікації. Основні положення дисертації знайшли відображення у 16 наукових працях, із них: 2 статті, що індексуються в наукометричних базах Scopus; 3 статті, що входять до переліку наукових фахових видань України; 2 патенти України на корисну модель, 9 матеріалів конференцій різного рівня.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (151 найменувань) і 5 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 171 сторінку, із них 125 сторінок основного тексту, 35 рисунків та 31 таблиця.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведено зв'язок з науковими програмами та планами, сформульовано мету та завдання досліджень, наукову новизну та практичне значення, наведено дані про апробацію та опублікування результатів дисертаційного дослідження.

У **першому розділі** – «Проблеми виникнення та ліквідації пожеж у забруднених радіонуклідами лісах» проаналізовано проблеми лісових пожеж та боротьби з ними, небезпек, пов'язаних з горінням радіоактивно забруднених горючих матеріалів..

У світі щороку лісові пожежі охоплюють значні території, їх площі сягають біля 400 млн га. Ця проблема гостро стоїть і в Україні, яка має значні площі, вкриті лісами. Загальна площа лісових ділянок, що належать до лісового фонду України, становить 10,4 млн га, у тому числі 9,6 млн га вкриті лісовою рослинністю. Упродовж 2024 року у лісах України виникли 1994 пожежі, які охопили площу 22 тис га. Орієнтовні збитки склали понад 13,8 млрд гривень. Для ліквідації 1117 лісових пожеж або у 57% випадків до їх гасіння залучалися підрозділи ДСНС України.

Статистика лісових пожеж свідчить про певне зменшення їх кількостей після 2010 року, але з певною періодичністю ці показники зростають (рис. 1).

Лісові пожежі призводять до значного забруднення навколишнього середовища продуктами горіння. У їх складі значними є викиди вуглецю. Проте значно більшою небезпекою для людей і довкілля є викиди у складі продуктів горіння радіоактивних елементів внаслідок пожеж на забруднених радіонуклідами територіях. Радіоактивні забруднення виникають внаслідок аварій на ядерних об'єктах, випробуванні ядерної зброї, у місцях добування і збагачення урану.

Чорнобильська катастрофа, яка сталася в квітні 1986 року, була найбільшою техногенно екологічно-гуманітарною катастрофою. Після аварії відбулося випадання величезної кількості радіації у вигляді радіоактивних аерозолів – приблизно $5 \cdot 10^{15}$ Бк,

з яких $3 \cdot 10^{13}$ Бк припадає на трансуранові елементи. Значення найбільшої густини забруднення ґрунту сягають для ^{137}Cs понад $8 \cdot 10^{12}$ Бк/км², для ^{90}Sr – $7 \cdot 10^{12}$ Бк/км² і плутонію – $3 \cdot 10^{10}$ Бк/км². Загальна площа Чорнобильської зони відчуження становить 259 837,8 га (2 600 км²), у тому числі: лісові масиви – 139,7 тис. га; перелоги – 71,4 тис. га; болота – 6,5 тис. га; торфосховища – 5,8 тис. га.

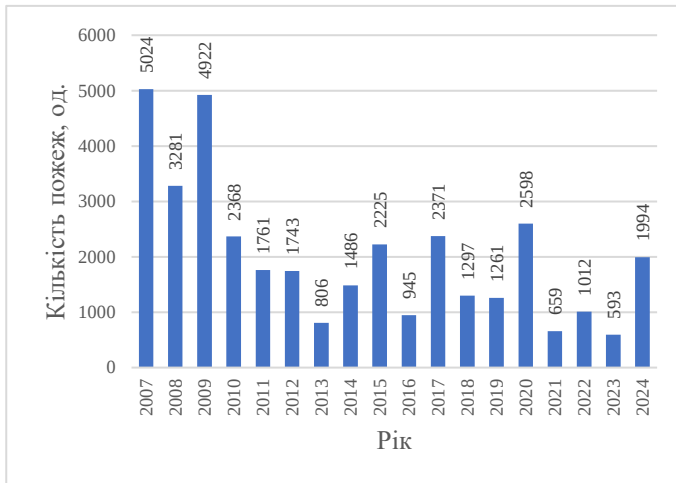


Рисунок 1. – Кількість лісових пожеж в Україні за період 2007-2024 рр.

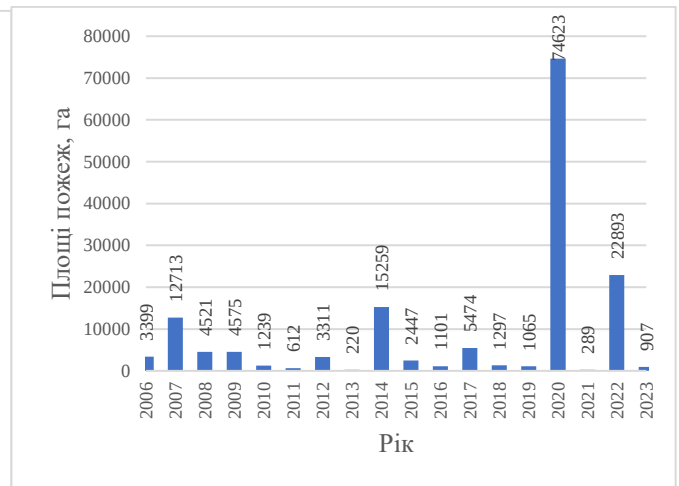


Рисунок 2 – Площі лісових пожеж в Україні у 2006-2024 роках

За даними Технічного звіту, виконаного Регіональним Східноєвропейським центром моніторингу пожеж статистика пожеж у Чорнобильській зоні наведена на рис. 3, свідчить про їх значну кількість та площі в окремі роки після аварії на ЧАЕС з 1992 по 2020 роки. Найбільші площі, охоплені пожежами на цій території зафіксовані у 2020 році (рис. 4).

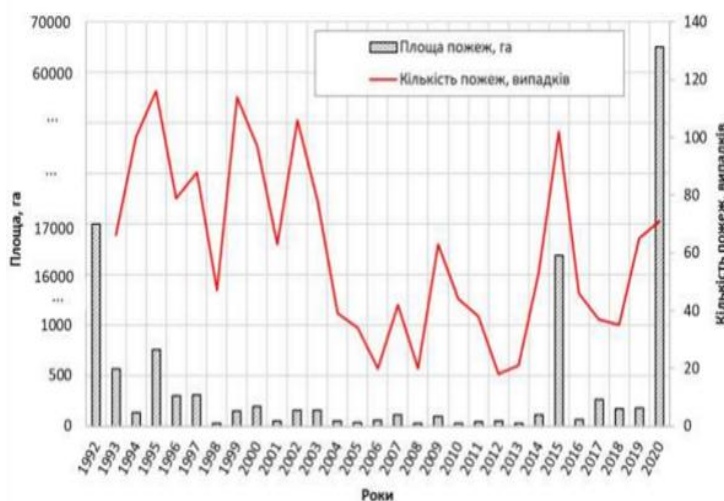


Рисунок 3 – Кількості і площі пожеж у природних ландшафтах на території Чорнобильської зони відчуження за період 1992-2020 рр.

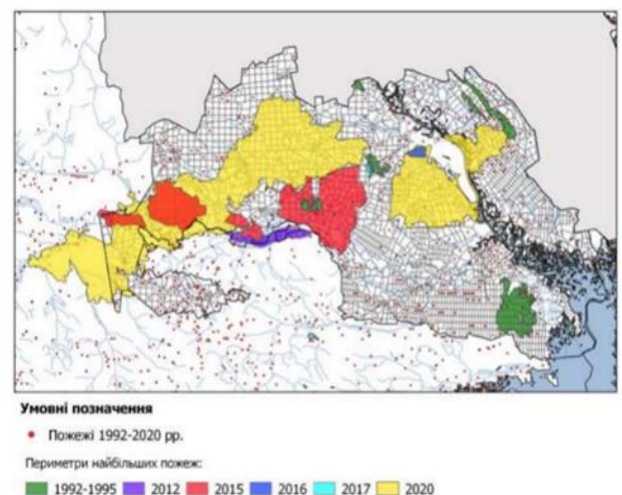


Рисунок 4 – Великі пожежі на території Чорнобильської зони відчуження за період 1992-2020 рр.

Особливо гостро постає питання гасіння пожеж у Чорнобильській зоні, які регулярно виникають на радіаційно забруднених територіях і є найбільш небезпечним явищем не лише у цих лісах, але і далеко за їх межами. Внаслідок лісових пожеж в зоні відчуження у 2020 р. в атмосферу було викинуто 0,7–1,2 ТБк ^{137}Cs . Стовпи диму частково поширювалися на південь і захід і сприяли виявленню ^{137}Cs в повітрі над територією України і аж до Західної Європи.

Слід відмітити суттєві особливості перебігу та гасіння пожеж у Чорнобильській зоні, а саме: міграцію радіонуклідів, як наслідок збільшення зони забруднення; ураження радіоактивним випромінюванням осіб, які проводять роботи по гасінню таких пожеж; необхідність використання спеціального одягу та спорядження для захисту, що ускладнює проведення робіт з ліквідації загорань, а також потребу своєчасного контролю та дезактивації людей і техніки після проведення робіт. Перелік наслідків дії іонізуючого випромінювання на людину постійно зростає та виявляється у низці захворювань: ураження гострою променевою хворобою; розвиток лейкозу, лейкемії та ін. пухлинних хвороб крові; виникнення злоякісних новоутворень (раків) будь-яких органів; порушення генетичного коду (мутаційні зміни); ураження нервової системи, кровоносних та лімфатичних судин; пошкодження органів зору, помутніння кришталика ока, розвиток катаракти; порушення обміну речовин та ендокринної рівноваги; виникнення тимчасової або постійної стерильності та імпотенції; розвиток імунодефіциту, підвищення чутливості організму до звичайних захворювань; порушення психічного та розумового розвитку; прискорення старіння організму.

Окрім захисту від іонізуючого випромінювання та уникнення пов'язаних з ним захворювань захисний одяг та взуття пожежників повинні захищати їх від теплової дії лісової пожежі, за засоби захисту органів дихання – від небезпечних продуктів горіння.

У другому розділі «Методи досліджень» наведено обрані методи та методики досліджень, зокрема аналізу та синтезу наукових джерел – для встановлення загроз для навколишнього середовища і людей радіоактивного забруднення та вирішення пов'язаних з ними проблем, узагальнення існуючих підходів до гасіння пожеж, системного аналізу – для оцінки комплексу чинників, що впливають на ефективність застосування обладнання та техніки для гасіння лісових пожеж на забруднених радіонуклідами територіях, математичного моделювання – для прогнозування поширення пожежі в умовах радіоактивного забруднення та на його основі оцінювання часу локалізації пожежі з урахуванням сил і засобів, оцінювання параметрів роботи запропонованого обладнання для створення водяної завіси, експериментальних досліджень – для перевірки ефективності запропонованих технічних рішень.

Оцінювання ефективності використання протипожежного обладнання та техніки з урахуванням різноманітних чинників здійснювали таксономічним методом з використанням інтегральних показників.

Дослідження процесів поширення та локалізації лісової пожежі на забруднених радіонуклідами територіях проводили методом математичного моделювання з урахуванням моделі Ротермелла, інших існуючих моделей поширення лісової

пожежі, найпоширенішою з яких є еліптична модель, та з урахуванням управлінських рішень керівника гасіння пожежі.

Дослідження ефективності розробленого пристрою створення водяної завіси здійснювали на стенді, який імітував роботу пожежної машини (рис. 5), основним елементом якого є насосний агрегат (рис. 6), що включає в себе асинхронний трифазний електродвигун потужністю 18 кВт і відцентровий рідинний насос, який може забезпечити витрату до 48 м³/год при тиску до 1 МПа і дозволяє проводити дослідження з різними видами гідравлічного ручного протипожежного обладнання.

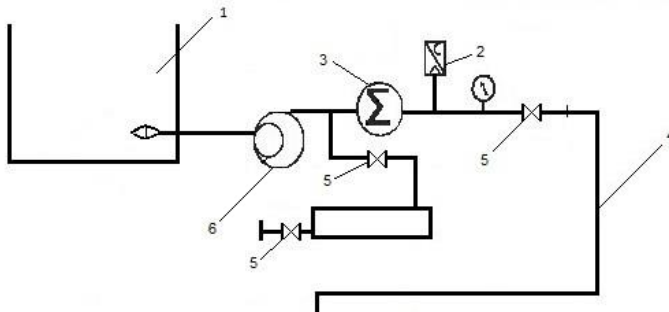


Рисунок 5 – Загальна схема експериментального стенду: 1 – ємність 1 м³; 2 – аналоговий перетворювач тиску; 3 – електромагнітний перетворювач потоку рідини; 4 – шланг для води Ø51 мм; 5 – запірний вентиль; 6 – відцентровий насос.



Рисунок 6 – Насосний агрегат експериментального стенду

Насосний агрегат через гідравлічну систему (витратомір, датчик тиску, напірні трубопроводи) підключається до струменеутворювального сопла. Управління електродвигуном здійснювалося за допомогою перетворювача частоти Danfos VLT 6000 HVAC. Для отримання даних витрати використано електромагнітний перетворювач витрати рідини СДМ-1, для вимірювання тиску – аналоговий датчик тиску НК1100С. Обробка сигналу датчика реалізована за допомогою плати Arduino Mega 2560 – на базі мікроконтролера ATmega2560, під'єднаної до комп'ютера через USB-порт з використанням плагіну PLX-DAQ для Microsoft Excel.

Дослідження ефективності роботи запропонованого пристрою для орієнтації в умовах обмеженої видимості проводили експериментальним методом на базі димокамери Навчально-тренувального комплексу навчальної пожежно-рятувальної частини на території ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України із залученням курсантів, з яких формували ланки для роботи у задимленому середовищі. Ланки виконували однакове завдання з використанням пристрою та без нього. Оцінювання ефективності здійснювали за часом виконання завдань. Аналіз результатів експериментальних досліджень проводили з використанням методів математичної статистики.

У третьому розділі – «Гасіння лісових пожеж на забруднених радіонуклідами територіях» встановлено ефективність протипожежної техніки та обладнання, що використовується для гасіння лісових пожеж в умовах радіоактивного забруднення.

Проведено аналіз тактико-технічних характеристик ручних пожежних стволів, комбінованих стволів Protek, лафетних стволів, пожежних стволів для отримання піни низької, середньої та високої кратності. За їх характеристиками з використанням таксономічного методу та інтегральних показників встановлено ефективності їх застосування. Враховувалися ті характеристики, які сприяють безпеці, ефективності використання, зокрема витрата води, дальність струменя і маса обладнання.

Інтегральні показники найбільш поширених переносних пожежних стволів (табл. 1) проранжовані за ефективністю.

Таблиця 1 – Інтегральні показники ефективності переносних пожежних стволів (витрата води - мінімум, дальність струменя - максимум та маса ствола - мінімум)

Вид струменю	Вид ствола					
	РСП-50	СРК-50	РСК-50	РС-Ам	РС-Бм	РСП-70
Суцільний	0,75	0,63	0,58	0,42	0,29	0,07
Розпилений	0,76	0,72	0,61	0,49	0,57	-0,03

За площею поверхні розпилення при напорі на стволі 0,4 МПа, максимальному куті факела захисної завіси та максимальній дальності розпиленого струменя ці стволи впорядковані в табл. 2.

Таблиця 2 – Площі поверхні розпилення переносних пожежних стволів

Вид ствола	РС-Ам	РС-Бм	СРК-50	РСК-50	РСП-50	РСП-70
Площа поверхні зрошення, м ²	113.0	78.5	75.4	73.9	42.2	28.3

Комбіновані стволи Protek за спаданням інтегрального показника наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Інтегральні показники ефективності комбінованих пожежних стволів Protek (максимальна витрата води - мінімум), дальність струменя - максимум, маса ствола - мінімум та кут розпилення - максимум)

Protek-366	Protek-360	Protek-368
0,71	0,62	0,46

Ефективність лафетних пожежних стволів Protek можна оцінити за інтегральними показниками у табл. 4.

Таблиця 4 – Інтегральні показники ефективності лафетних пожежних стволів Protek (максимальна витрата води - мінімум, дальність струменя - максимум, маса ствола - мінімум, кут повороту по вертикалі - максимум та кут повороту по горизонталі - максимум)

Protek Style 922	Protek Style 622-2	Protek Style 622-1	Protek Style 622-3	Protek Style 600
0,45	0,26	0,20	0,16	0,10

Ефективність пінних стволів низької, середньої та високої кратності наведена в табл. 5-7.

Таблиця 5 – Інтегральні показники ефективності пінних стволів низької кратності (максимальна витрата води по воді (розчину піноутворювача) - мінімум, дальність подачі піни - максимум, кратність піни - максимум і витрата по піноутворювачу - максимум)

СППЕ-4	СПП-4	СППЕ-8	СППЕ-2
0,27	0,25	0,22	0,03

Таблиця 6 — Інтегральні показники ефективності пінних стволів середньої кратності (максимальна витрата по воді - мінімум, дальність подачі піни - максимум, витрати по піні - максимум і маса - мінімум)

ГПС-600	ГПС-2000	ГПС-200
0,49	0,20	0,17

Таблиця 7 – Інтегральні показники ефективності пінних стволів високої кратності (максимальна витрата по воді - мінімум, дальність подачі піни - максимум і витрати по піні - максимум)

ГВП-50	ГВП-30	ГВП-70	ГВП-40
0,84	0,41	0,35	0,24

З пожежної техніки найпоширенішим видом, який застосовують для гасіння пожеж у Чорнобильській зоні, є пожежні автомобілі – універсальний засіб гасіння. Їх ефективність визначається чисельністю особового складу, запасом вогнегасних речовин, габаритними параметрами та прохідністю. Оскільки на теперішній час є значна кількість такого виду техніки вітчизняного та зарубіжного виробництва, тому оптимізація їх вибору може бути здійснена з урахуванням наявного набору у підрозділі з використанням таксономічного методу.

Броньована пожежна техніка також може ефективно застосовуватися в умовах радіонуклідного забруднення, оскільки вона забезпечує радіаційний захист особового складу та високу прохідність.

Із спеціалізованої пожежної техніки відзначимо всюдихід пожежний лісовий ВПЛ-149, який досить ефективний у забруднених радіонуклідами лісах завдяки високій прохідності. Використання пожежної машини порошкового гасіння УПГ-92 вважаємо недоцільним через підняття радіоактивного пилу внаслідок її роботи та ризик вторинного забруднення.

Пожежні поїзди можуть залучатися за наявності залізничних колій поблизу осередку пожежі, оскільки у Чорнобильській зоні відчуження існує відповідна інфраструктура. За тактико-технічними характеристиками більш ефективним є пожежний поїзд I категорії, який за більшістю показників перевершує поїзд II категорії.

Проте найбільш ефективною та безпечною для персоналу технікою для гасіння пожеж у забруднених радіацією лісах є авіаційна техніка: літаки та гвинтокрили. Їх інтегральні показники ефективності наведені в табл. 8.

Таблиця 8 – Інтегральні показники ефективності авіаційної техніки (запас води - максимум, крейсерська швидкість польоту - максимум, практична дальність польоту – максимум та максимальна висота польоту - максимум)

АН-32П	ЕС Н225 з водяним баком 4500 л	ЕС Н225 з СВ3000М	МІ-8МТ з ВЗП-5А
0,90	0,51	0,45	0,27

Для ефективного гасіння лісових пожеж важливим фактором є знання поведінки пожежі, зокрема її швидкості та напрямку поширення. Потрібну інформацію можна отримувати за результатами спостережень з літальних апаратів, пожежних вишок, а також із застосуванням моделювання. Більшість моделей описують процеси поширення пожеж, але не враховують змін, пов'язаних з їх локалізацією та ліквідацією.

Для оцінювання динаміки поширення лісової пожежі та її локалізації розроблено математичну модель, яка враховує управлінські рішення, що полягають у виборі засобу та способу гасіння і розстановці сил та засобів по периметру пожежі.

За припущенням Річардса лісова пожежа в умовах сталої швидкості та напрямку вітру поширюється однорідним горючим матеріалом у вигляді еліпса. Вважатимемо, що вітер східного напрямку та має швидкість v_B . (рис. 7).

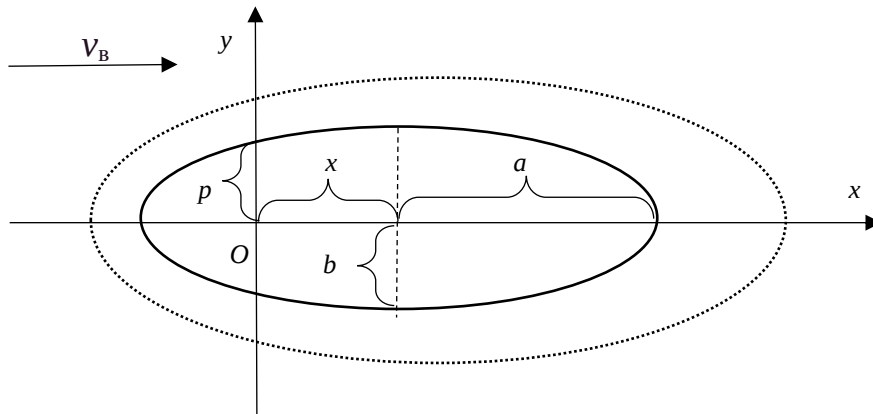


Рисунок 7 – Поширення лісової пожежі однорідним шаром горючого матеріалу за сталою швидкістю та відсутності ухилу

Швидкість поширення пожежі можна оцінити за удосконаленою моделлю Ротермелла з урахуванням ухилу та вітру:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \varphi_w + \varphi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}}, \quad (1)$$

де I_R – інтенсивність теплового потоку; ξ – коефіцієнт розповсюдження потоку; φ_w – коефіцієнт вітру; φ_s – коефіцієнт ухилу, ε – ефективне число нагріву; Q_{ig} – теплота попереднього займання.

Площа пожежі у формі еліпса з півосями $a = a(t)$ та $b = b(t)$ в момент часу t визначається за формулою

$$S(t) = \pi a(t)b(t) = \pi \frac{v_f + v_r}{2} \sqrt{v_r \frac{v_f + v_r}{2}} t^2, \quad (2)$$

де v_f – швидкість фронту у напрямку вітру, v_r – швидкість поширення у напрямку тилу та флангів (швидкості обчислюють з використанням (1)), t – час. Отримана залежність (2) є квадратичною функцією від часу t . Екстремум функції досягається у точці

$$t_{min} = 0. \quad (3)$$

Функція $S(t)$ є зростаючою для додатних значень t та опуклою донизу, що свідчить про постійне зростання швидкості збільшення площі пожежі до моменту прибуття підрозділу. Після прибуття пожежників, проведення розвідки та розгортання засобів пожежогасіння починається гасіння пожежі. Для забезпечення гасіння пожежі сили і засоби розташовують вздовж крайки пожежі та здійснюють гасіння її ділянки з відповідною лінійною швидкістю та на відповідній ділянці. Зробимо припущення: кожен пожежник з відповідним засобом гасіння (ствол, підручні засоби та ін.) здійснює гасіння ділянки лісу шириною l_i , яка знаходиться перед ним, із швидкістю v_i , що запобігає подальшому поширенню у відповідному секторі. Будемо вважати, що площа такої ділянки буде дорівнювати добутку ширини на швидкість гасіння та час, протягом якого воно здійснювалося. Тоді команда з n пожежників, яка розпочала гасіння дорівнює $t_{поч.гас}$, гасить ділянку, площа якої описується функцією

$$S_{\Gamma}(t) = \sum_{i=1}^n l_i v_i (t - t_{поч.гас}), \quad (4)$$

де i – номер пожежника, v_i – швидкість гасіння i -им пожежником з урахуванням засобу гасіння. Водночас кожен пожежник запобігає поширенню пожежі на площі у межах кутового сектора з центром в точці осередку пожежі O (рис. 7), яка обчислюється за формулою:

$$S_i(t) = \frac{1}{2} \int_{\alpha_i}^{\alpha_i + \delta_i} r^2(t, \theta) d\theta, \quad (5)$$

де α_i – початковий кут сектора у радіанах, δ_i – кут сектора.

З урахуванням площі гасіння команди з n пожежників та їх запобігання поширенню горіння від частини крайки пожежі у межах відповідних секторів, залежність площі пожежі після початку гасіння буде описуватися формулою

$$S(t) = \pi a b t^2 - S_{\Gamma}(t) - \sum_{i=1}^n (S_i(t) - S_i(t_{поч.гас})),$$

З урахуванням (4) та (5) ця формула матиме вигляд:

$$S(t) = \pi abt^2 - \sum_{i=1}^n l_i v_i (t - t_{\text{поч.гас}}) - (t^2 - t_{\text{поч.гас}}^2) \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left[\left(a^2 + \frac{1}{2} c^2 \right) \delta_i + 2ac(\sin(\alpha_i + \delta_i) - \sin \alpha_i) + \frac{1}{4} c^2 (\sin 2(\alpha_i + \delta_i) - \sin 2 \alpha_i) \right] \quad (6)$$

Для оцінювання процесу ліквідації пожежі знайдемо похідні 1-го та 2-го порядку від (5):

$$S'(t) = 2\pi abt - \sum_{i=1}^n l_i v_i - 2t \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left[\left(a^2 + \frac{1}{2} c^2 \right) \delta_i + 2ac(\sin(\alpha_i + \delta_i) - \sin \alpha_i) + \frac{1}{4} c^2 (\sin 2(\alpha_i + \delta_i) - \sin 2 \alpha_i) \right]. \quad (7)$$

$$S''(t) = 2\pi ab - \sum_{i=1}^n \left[\left(a^2 + \frac{1}{2} c^2 \right) \delta_i + 2ac(\sin(\alpha_i + \delta_i) - \sin \alpha_i) + \frac{1}{4} c^2 (\sin 2(\alpha_i + \delta_i) - \sin 2 \alpha_i) \right]. \quad (8)$$

Квадратична функція $S(t)$ після початку змінить величину опуклості, яка визначається величиною (8) і буде зменшувати швидкість зростання. Коли похідна (7) стане рівною 0, відбудеться локалізація пожежі. Для знаходження часу настання локалізації прирівняємо до нуля вираз (7) і знайдемо значення t :

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n l_i v_i}{2\pi ab - \sum_{i=1}^n \left[\left(a^2 + \frac{1}{2} c^2 \right) \delta_i + 2ac(\sin(\alpha_i + \delta_i) - \sin \alpha_i) + \frac{1}{4} c^2 (\sin 2(\alpha_i + \delta_i) - \sin 2 \alpha_i) \right]}. \quad (9)$$

У цей момент часу зростання площі пожежі повністю припиниться і дії пожежників будуть спрямовані лише на гасіння осередків у межах еліпса.

У четвертому розділі «Радіаційний захист і підвищення ефективності роботи персоналу в умовах лісових пожеж на забруднених радіонуклідами територіях» проведено аналіз індивідуального захисту пожежників, залучених до гасіння лісових пожеж в умовах радіоактивного забруднення. Одним із небезпечних для персоналу чинників, що спричиняє радіоактивне ураження, є продукти горіння та пил, що містять радіонукліди. Однією з форм захисту є осадження продуктів горіння та пилу, що здійснюють розпиленням води або створенням водяних завіс, які також зменшують інтенсивність інфрачервоного випромінювання. Розпилення води та створення водяних завіс здійснюють за допомогою спеціального обладнання – турбінних розпилювачів НРТ-5,10,20 і щілинних розпилювачів РВ-12. За таксономічним методом з урахуванням таких показників, як витрата води (мінімум), висота водяної завіси (максимум), товщина водяної завіси (максимум), площа захисної завіси (максимум) та маса (мінімум), встановлено, що найбільш ефективними є турбінні розпилювачі НРТ-20 та НРТ-10, меншу ефективність має НРТ-5, а найнижчу – щілинний розпилювач РВ-12.

З метою збільшення ефективності створення водяної завіси запропоновано пристрій створення водяної завіси (патент на корисну модель UA 146149) для попередження осадження радіоактивного пилу, хмари та захисту від теплового навантаження пожежних під час гасіння низових пожеж (рис. 8).

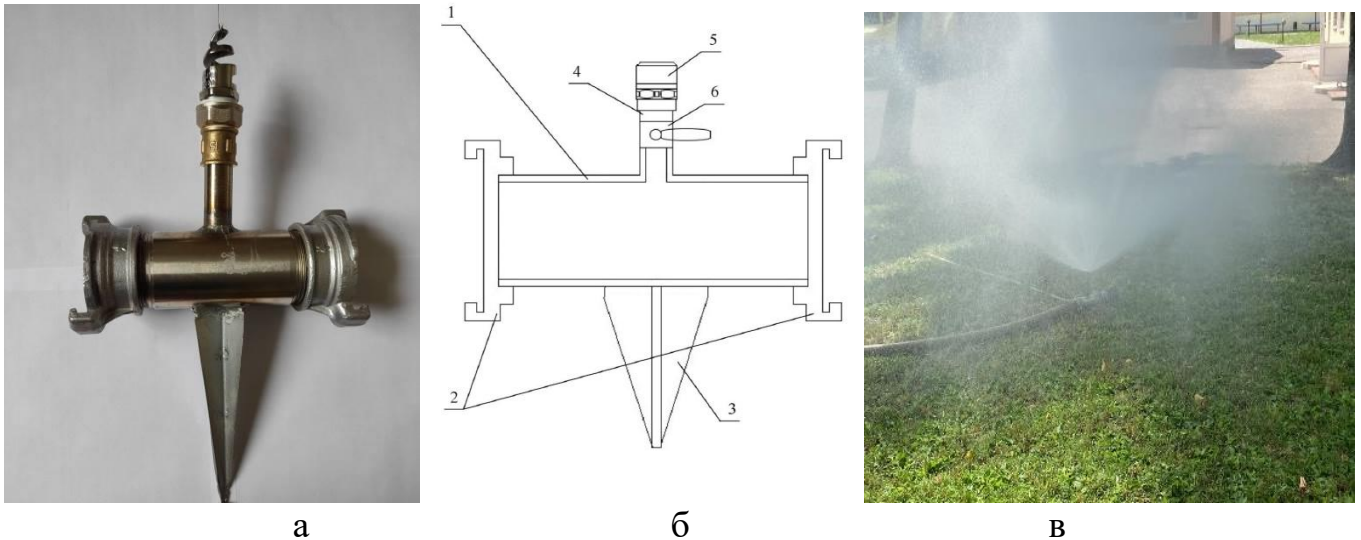


Рисунок 8 – Експериментальний взірець пристрою створення водяної завіси (а), його будова (б) та робота (в): 1 – металевий корпус, 2 – з'єднувальні головки, 3 – фіксуючий металевий стержень, 4 – штуцер, 5 – форсунка, 6 – кран.

За результатами дослідження ефективності пристрою створення водяної завіси на стенді (див. рис. 5) отримали залежності витрати рідини від часу (рис. 9), тиску від часу (рис. 10) та витрати рідини в залежності від тиску (рис. 11).

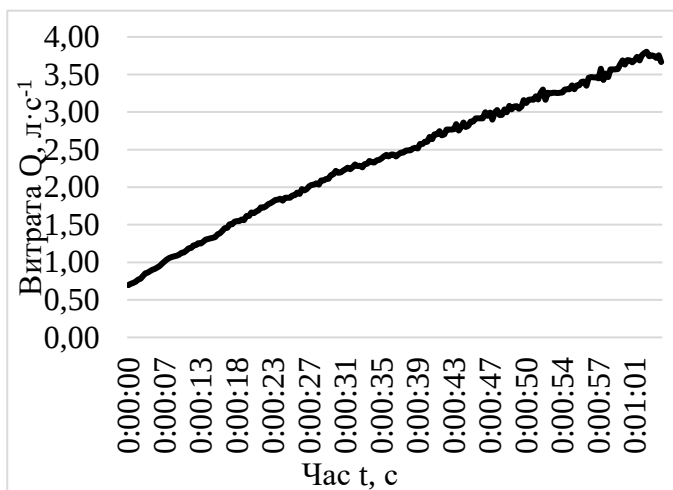


Рисунок 9 – Залежність витрати від часу роботи пристрою для створення водяної завіси

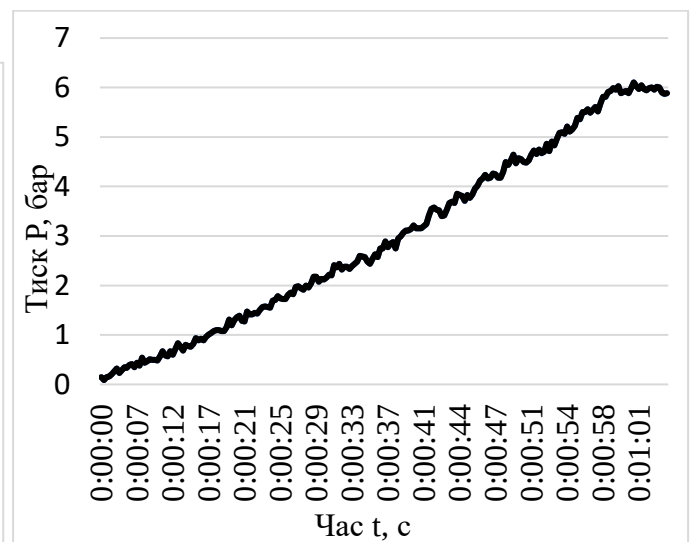


Рисунок 10 – Залежність тиску від часу роботи пристрою для створення водяної завіси

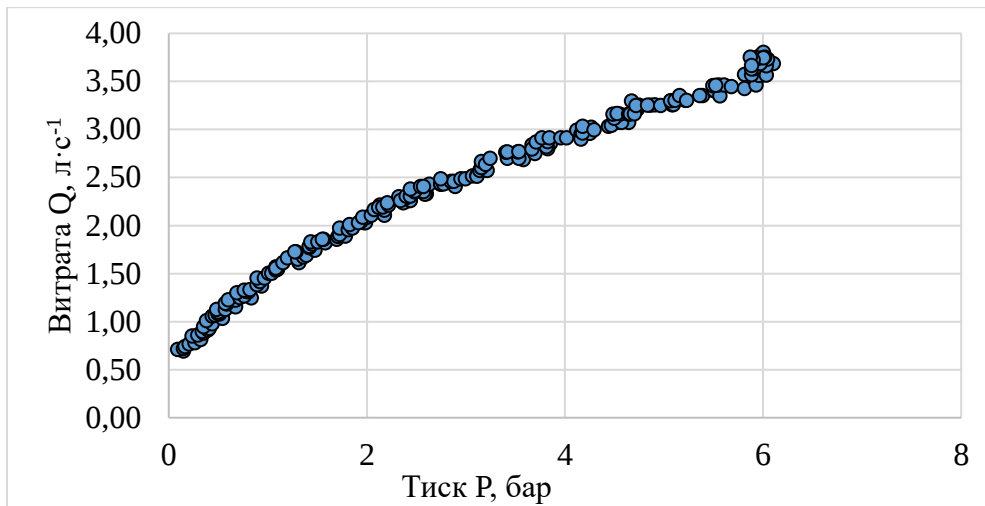


Рисунок 11 - Залежність витрати від тиску під час роботи пристрою для створення водяної завіси

За результатами експериментальних досліджень побудовано математичну модель зрошування пристроєм для створення водяної завіси:

$$\begin{aligned} Q &= 0,0126P^3 - 0,1599P^2 + 1,0164P + 0,5986 \\ R &= -0,0125P^3 + 0,1247P^2 + 0,2119P - 0,0433 \\ I &= \frac{0,0126P^3 - 0,1599P^2 + 1,0164P + 0,5986}{\pi(-0,0125P^3 + 0,1247P^2 + 0,2119P - 0,0433)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

де P – тиск, Q – витрата води, R – радіус зони розпилення, I – інтенсивність зрошування.

Застосувавши метод апроксимації степеневою функцією, останню формулу інтенсивності зрошування в (10) можна з високим коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,986$ подати у більш зручному для практичного використання вигляді

$$I = 2,132P^{0,457}. \quad (11)$$

Отриману залежність та її апроксимацію наведено на рис. 12.

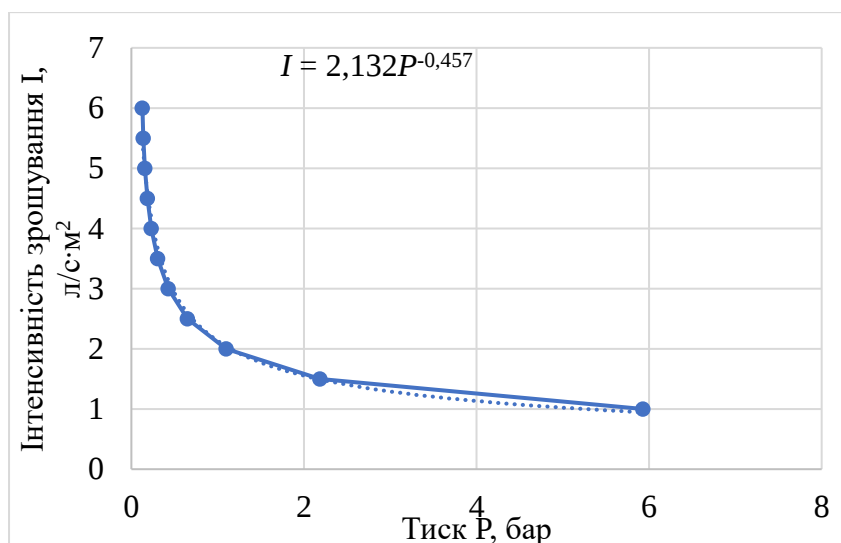


Рисунок 12 – Залежність інтенсивності зрошування пристроєм для створення водяної завіси від тиску (пунктиром зображено апроксимацію за формулою (11))

Порівняємо запропонований пристрій створення водяної завіси з існуючими розпилювачами за інтегральними показниками (табл. 9).

Таблиця 9 – Інтегральні показники ефективності розпилювачів НРТ-5, НРТ-10, НРТ-20, РВ-12 та запропонованого пристрою створення водяної завіси (витрата води - мінімум, висота водяної завіси - максимум, товщина водяної завіси - максимум, площа захисної завіси - максимум та маса - мінімум)

НРТ-20	НРТ-10	Пристрій створення водяної завіси	НРТ-5	РВ-12
0,46	0,46	0,32	0,23	0.09

Хоча за інтегральними показниками ефективності запропонований пристрій створення водяної завіси поступається НРТ-20 та НРТ 10, але загальна ефективність його використання для осадження радіоактивного пилу та диму буде вищою, оскільки до рукавної лінії можна підключити послідовно декілька таких пристроїв на відміну від інших існуючих.

Одним із шляхів зменшення шкідливого впливу радіації на людину є зменшення тривалості її перебування у зоні забруднення. Цього можна досягти зменшенням часу виконання завдань підвищенням ефективності роботи. Тому важливим завданням є використання пристроїв, за допомогою яких можна покращити орієнтування в умовах обмеженої видимості, що дозволяє значно зменшити час проведення розвідки пожежі, евакуації людей із задимленої зони та гасіння пожежі. Для підвищення ефективності дій пожежників в умовах задимлення запропоновано пристрій для орієнтації пожежного в мовах обмеженої видимості (патент на корисну модель UA 146540). Пристрій вбудовується в пожежну каску (рис. 13).

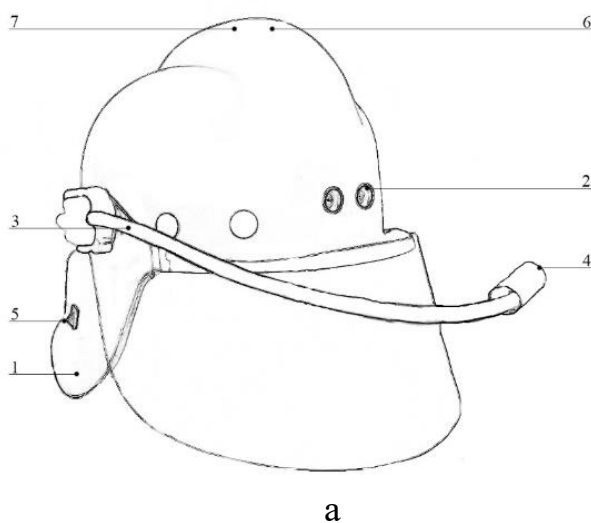


Рисунок 13 – Будова пристрою для орієнтації в умовах обмеженої видимості (а) та експериментальний візирець (б): 1 – каска, 2 – ультразвуковий датчик, 3 – гнучкий кронштейн, 4 – екран, 5 вимикач живлення, 6 – мікропроцесор (всередині каски), 7 – блок живлення (всередині каски).

Він розроблений на базі мікроконтролера ATmega328Pi ультразвукового датчика вимірювання відстані HC-SR04 та світлодіодного дисплею. Принцип роботи пристрою полягає у вимірюванні відстаней за допомогою ультразвукових хвиль та відображення значення на екрані, розташованому на кронштейні в полі зору пожежника. Алгоритм роботи системи орієнтування у задимленому середовищі на базі розробленого пристрою наведено на рис. 14.



Рисунок 14 – Алгоритм роботи системи орієнтування у задимленому середовищі.

Для перевірки роботи розробленої системи орієнтування в реальних умовах та визначення її параметрів проведені експериментальні дослідження в димокамері на базі навчально-тренувального комплексу навчальної пожежно-рятувальної частини на території ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (рис. 15).



Рисунок 15 – Дослідження ефективності системи орієнтування у задимленому просторі в теплодимокамері ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.

Метою проведення досліджень було встановлення здатності пожежників:

- орієнтуватися в просторі;

- виконувати оперативні завдання в умовах різного ступеня задимленості;
 - виконувати оперативні завдання в умовах обмеженого простору.
- Результати випробувань відображені в табл. 10.

Таблиця 10 – Час виконання завдання пожежниками у складі ланок без пристрою для орієнтування у задимленому середовищі, з його використанням та різниці значень часу

Умови виконання завдання	Час виконання завдання у складі ланки, с						
	Ланка 1	Ланка 2	Ланка 3	Ланка 4	Ланка 5	Ланка 6	Ланка 7
Без пристрою	581	517	692	534	476	502	461
З пристроєм	445	402	573	372	301	391	346
Різниця значень	136	115	119	162	175	111	115

Як видно з таблиці 10, час виконання завдань пожежниками у складі ланок із застосуванням системи орієнтування зменшився для усіх ланок.

Для аналізу обчислено статистичні характеристики отриманих результатів експериментальних досліджень ефективності застосування пристрою для орієнтування у задимленому середовищі під час виконання завдання без пристрою, з пристроєм та різниці значень (табл. 11).

Таблиця 11 – Статистичні характеристики результатів експериментальних досліджень ефективності застосування пристрою для орієнтування у задимленому середовищі під час виконання завдання

Умови виконання завдання	Середній час $\bar{t}$, с	Середньоквадратичне відхилення, σ , с	Коефіцієнт варіації V , %	Розмах R , с	Асиметрія Sk	Експес K
Без пристрою	537,57	78,62	14,63	231,00	1,45	2,21
З пристроєм	404,29	87,00	21,52	272,00	1,25	2,25
Різниця значень	133,29	25,63	19,23	64,00	0,97	-0,84

Як видно з табл. 11, середнє значення часу виконання завдання – показника, який підтверджує ефективність застосування запропонованого пристрою, зменшилося з 537,57 с до 404,29 с на 133,28 с або на 24,8 %. Середньоквадратичне відхилення незначно зросло на 8,37 с або на 10,7%, що може свідчити про незвичність застосування пристрою ланками. На це також вказує і зростання коефіцієнта варіації на 6,9% та розмаху на 41 с. Коефіцієнти варіації не перевищують 33%, що свідчить про однорідність сукупностей та надійність їх характеристик за допомогою середніх значень. Нормальність розподілів підтверджено за правилом «трьох сігм» та шляхом порівняння значень коефіцієнтів асиметрії та експесу з їх стандартними похибками.

У припущенні нормальностей розподілів обчислено коефіцієнт кореляції Пірсона для значень часу без застосування пристрою та із його застосуванням. Він становить $r = 0,96$ та характеризується як високий. Перевірка значущості коефіцієнта кореляції з використанням t -критерію підтвердила його значущість, що свідчить про залежність

часу виконання завдання від сформованих ланок, а саме компетентностей осіб, що входять до їх складу. Тому зменшення часу виконання завдання з використанням розробленого пристрою середнього значення свідчить про його ефективність для виконання завдань у задимленому середовищі.

ВИСНОВКИ

В дисертації, що є завершеним науковим дослідженням, наведено результати вирішення актуального науково-прикладного завдання – розроблення та обґрунтування ефективних методів та засобів гасіння лісових пожеж у зонах, забруднених радіонуклідами, з урахуванням специфіки радіаційної небезпеки та отримано такі науково-практичні результати:

1. Встановлено, що окрім традиційних загроз, пов'язаних з виконанням завдань щодо гасіння лісових пожеж, за наявності радіоактивного забруднення додатково слід враховувати чинники небезпеки, пов'язані з радіацією, і застосовувати відповідні засоби захисту. На основі аналізу засобів індивідуального захисту пожежників запропоновано використання захисного одягу та взуття, які обмежують потрапляння радіонуклідів на поверхні тіла пожежників, та індивідуальних пристроїв для вимірювання радіації під час гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах.

2. Обґрунтовано ефективність використання засобів пожежогасіння на основі інтегрального показника, що сукупно враховує їх характеристики, важливі в умовах роботи в зоні радіоактивного забруднення. Рекомендовано використання, як найбільш ефективних, ручних пожежних стволів РСП-50, СРК-50, РСК-50, комбінованих стволів Protek-366 та Protek-360, лафетних стволів Protek Style 922, Protek Style 622-2, Protek Style 622-1 та пінних стволів СПП-4, СППЕ-4, ГПС-600, ГПВ-50 і ГПВ-30.

3. За інтегральним показником встановлено найбільшу ефективність літака АН-32П, за ним слідує гвинтокрил ЕС Н225 з водяним баком та цей же апарат з водоскидним пристроєм СВ3000М, які рекомендовано використовувати для гасіння на забруднених радіонуклідами територіях.

4. Розроблено математичну модель поширення пожежі та її ліквідації, яка враховує кількість особового складу та площу гасіння кожним із пожежників і дозволяє оцінити динаміку поширення лісової пожежі та час її локалізації.

5. На основі аналізу технічних характеристик пристроїв розпилення за значеннями інтегральних показників встановлено, що з існуючих таких пристроїв найбільш ефективними є турбінні розпилювачі НРТ-20 та НРТ-10. Для збільшення ефективності та безпеки запропоновано метод осадження радіоактивних елементів під час гасіння лісових пожеж і охолодження рукавів із застосуванням розробленого пристрою. За результатами експериментальних досліджень дослідного зразка встановлено, що за інтегральними показниками ефективності у ранжуванні розпилювачів він буде третім після НРТ-20 та НРТ-10, однак конструктивні особливості допускають послідовне під'єднання декількох таких пристроїв до рукавної лінії. Отримано залежності витрати води від тиску $Q = 0,0126P^3 - 0,1599P^2 + 1,0164P + 0,5986$, радіуса зони розпилення від тиску $R = -0,0125P^3 + 0,1247P^2 + 0,2119P - 0,0433$, а також інтенсивності зрошування від тиску $I = 2,132P^{0,457}$.

6. З метою підвищення ефективності роботи та орієнтування пожежників в умовах недостатньої видимості, запропоновано удосконалений метод орієнтування у задимленому середовищі що базується на застосуванні розробленого пристрою для орієнтації в умовах обмеженої видимості на основі вимірювання відстані за допомогою ультразвукових хвиль. Встановлено, що на робочу відстань ультразвукового датчика впливає температура середовища, із зростанням якої згасання хвиль збільшується і максимальна відстань зменшується. Експериментально встановлено підвищення ефективності роботи пожежників у складі ланок з використанням запропонованого пристрою, що виражається зменшенням часу виконання завдань ланкою на 24,8%.

Список публікацій, що відображають основні наукові результати дисертації

Статті у періодичних виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. Pelypenko M., **Lahno D.**, Zemlianskyi O., Nozhko I., Bychenko A. Efficiency of using a water curtain device in forest fires. *Forestry ideas*. 2023. Vol. 29, No 2 (66). Pp. 258–271. (Scopus Q4).
2. Kuzyk A., **Lagno D.**, Popovych V., Ilyashevych M. Mathematical Modeling of the Development and Extinguishing of Forest Fires in Radionuclear Contaminated Areas. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*. 2025. Vol. 81, No. 4. Pp. 142–151. (Scopus Q3).

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України

3. Кузик А. Д., **Лagno Д. В.** Особливості процесу ліквідації пожежі у забруднених радіонуклідами лісах на території зони відчуження. *Пожежна безпека*. 2019. № 34. С.47-53.
4. **Лagno Д. В.**, Кузик А. Д., Биченко А. О., Ножко І. О. Методи осадження радіоактивного пилу та хмари, під час гасіння низових пожеж в Чорнобильській зоні. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідації*. 2020. Т. 4, №2. С. 35-41.
5. Бас О., **Лagno Д.**, Ножко І., Пелипенко М. Використання ультразвуку для орієнтування у задимленому середовищі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2021. Т. 5, № 1. С. 15-26.

Патенти на корисну модель

6. **Лagno Д. В.**, Ножко І. О., Биченко А. О., Землянський О. М., Кузик А. Д. Пристрій створення водяної завіси. *Патент України на корисну модель №146149*, опубл. 20.01.2021, бюл. № 3.
7. **Лagno Д. В.**, Бас О. В. Пристрій для орієнтації в умовах обмеженої видимості. *Патент України на корисну модель №146540*, опубл. 24.02.2021, бюл. № 8.

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Кузик А. Д., **Лагно Д. В.** Екологічні проблеми пожеж у природних екосистемах. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасний стан і перспективи розвитку ландшафтної архітектури, садово-паркового господарства, урбоекології та фітомеліорації»*. Львів, НЛТУ України, 2019. С. 254-256.
9. Кузик А. Д., **Лагно Д. В.** Загрози для пожежників, які гасять лісову пожежу в забрудненій зоні. *Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 139-141.
10. Кузик А. Д., **Лагно Д. В.** Особливості забезпечення радіаційної безпеки рятувальників під час гасіння пожеж у лісах на території зони відчуження. *Матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах»*. Київ: ІДУЦЗ, 2019. С. 152-154.
11. Кузик А., Биченко А., Ножко І., **Лагно Д.** Засоби зменшення впливу продуктів горіння на рятувальників під час гасіння пожежі в екосистемах. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 41-41.
12. **Лагно Д.**, Кузик А., Ножко І. Наслідки пожеж в лісах Чорнобильської зони та використання авіації під час розвідки та гасіння. *Матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 168-169.
13. **Лагно Д. В.**, Стан функціонування лісових пожежних станцій. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 31-33.
14. **Лагно Д.**, Пелипенко М., Ножко І. До питання гасіння лісових пожеж в умовах радіаційного забруднення. *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 113-114.
15. **Лагно Д. В.**, Пелипенко М. М., Ножко І. О. Аналіз існуючих пристроїв створення водяних завіс. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022»)*. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 196-197.
16. **Лагно Д.** Можливі наслідків дії іонізуючого випромінювання. *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 146-147.

АНОТАЦІЯ

Лагно Д.В. Підвищення ефективності гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека (К8 – Пожежна безпека). Національний університет цивільного захисту України ДСНС України, Черкаси, 2026.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання розроблення та обґрунтування ефективних методів і засобів гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах, зокрема підвищення ефективності роботи пожежників, захисту від радіонуклідів у повітрі створенням водяної завіси.

Проведено аналіз небезпек для пожежників під час гасіння лісових пожеж на забруднених радіонуклідами територіях. Таксономічним методом за інтегральними показниками оцінено ефективність використання техніки та обладнання, зокрема переносних, лафетних та пінних стволів, авіаційної техніки. Розроблено математичну модель поширення лісової пожежі та її локалізації з урахуванням управлінських рішень керівника гасіння пожежі щодо сил та засобів. Для осадження пилу та продуктів горіння з радіонуклідами, а також захисту рукавних ліній від теплової дії, розроблено пристрій для створення водяної завіси та побудовано математичну модель зрошування цим пристроєм. Для підвищення ефективності роботи пожежників розроблено пристрій для орієнтування в задимленому середовищі, який вимірює відстані до предметів ультразвуковим сенсором. Експериментальні дослідження в теплодимокамері виявили зменшення часу і підвищення ефективності роботи.

Ключові слова: лісові пожежі, радіоактивне забруднення, пожежогасіння, протипожежне обладнання, протипожежна техніка, математична модель, поширення пожежі, локалізація пожежі, осадження пилу та продуктів горіння, орієнтування у задимленому середовищі.

ABSTRACT

Lahno D.V. Increasing the efficiency of fire extinguishing in forests contaminated with radionuclides. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (PhD) in the specialty 21.06.02 – Fire Safety (K8 – Fire Safety). National University of Civil Defense of Ukraine. Cherkasy, 2026.

The dissertation is devoted to solving the current scientific problem of developing and substantiating effective methods and means of extinguishing forest fires in natural ecosystems contaminated with radionuclides, in particular, increasing the efficiency of firefighters' actions, protection against radionuclides during fire extinguishing by creating a water curtain for the deposition of dust and smoke.

An analysis of the dangers for firefighters during the extinguishing of forest fires in radionuclide-contaminated territories was carried out. In addition to the traditional threats associated with the thermal effects of fire, in the presence of radioactive contamination, additional radiation-related hazard factors should be taken into account and appropriate protective equipment should be used. Based on the analysis of personal protective equipment for firefighters, the use of protective clothing and footwear that limit the ingress of radionuclides onto the surface of the firefighters' bodies, and individual devices for measuring radiation were proposed.

Based on the taxonomic method, the effectiveness of the use of fire-fighting equipment and equipment, in particular portable, carriage-mounted and foam barrels, was assessed using integral indicators. For extinguishing fires in radioactively contaminated forests, it is

recommended to use, as the most effective, the hand-held fire branchpipes RSP-50, SRK-50, RSK-50, combined branchpipes Protek-366 and Protek-360, portable ground monitors Protek Style 922, Protek Style 622-2, Protek Style 622-1 and foam branchpipes of low multiplicity SPP-4, SPPE-4, medium multiplicity GPS-600 and high multiplicity GPV-50, GPV-30.

Of the fire equipment, the most common type used for extinguishing fires in the Chornobyl zone is fire trucks - a universal extinguishing agent. Their effectiveness is determined by the number of personnel, the stock of fire extinguishing agents, overall parameters and cross-country ability. Since at present there is a significant amount of this type of equipment of domestic and foreign production, their selection can be optimized taking into account the existing set in the unit using the taxonomic method.

Armored firefighting equipment can also be effectively used in conditions of radionuclide contamination, as it provides radiation protection for personnel and high cross-country ability. Of the specialized firefighting equipment, the all-terrain vehicle firefighting forest VPL-149 is effective and has high cross-country ability. We consider the use of the UPG-92 powder extinguishing fire engine to be inexpedient due to the raising of radioactive dust as a result of its operation and the risk of secondary contamination.

According to the integral indicator, the highest efficiency of the AN-32P aircraft was established, followed by the ES H225 helicopter with a water tank and the same device with a CB3000M water discharge device, which are recommended for extinguishing in radionuclide-contaminated territories.

A mathematical model of forest fire spread and its localization has been developed, taking into account the management decisions of the fire extinguishing manager regarding forces and means. The model is based on the assumptions of the homogeneity of the combustible material layer, flat terrain in the territory of the Chornobyl Exclusion Zone, and constant wind speed and direction. The spread rate is calculated using the improved Rothermell model. The model takes into account the number of personnel and the area of extinguishing by each firefighter and allows us to assess the dynamics of forest fire spread and the time of its localization. The model calculates the fire area, which is a quadratic function of time. It is increasing and convex downwards, which indicates a constant increase in the rate of increase in the fire area until the unit arrives. After the arrival of firefighters, reconnaissance and deployment of fire extinguishing means, fire extinguishing begins. To ensure fire extinguishing, forces and means are positioned along the edge of the fire and extinguish its area with the appropriate linear speed and in the appropriate area. Taking into account the extinguishing area of a team of n firefighters and their prevention of the spread of combustion from part of the fire edge within the relevant sectors, the dependence of the fire area after the start of extinguishing will be described by another formula, the quadratic function will change the value of the convexity and will characterize the decrease in the rate of growth of the fire area. At the time when the derivative of this function becomes equal to 0, the fire will be localized, and the localization time will be determined by the corresponding value of the argument.

In order to deposit dust and combustion products containing radionuclides, irrigation and the creation of water curtains are recommended during forest fires. Based on the analysis of the technical characteristics of spraying devices by the values of integral indicators, it was established that of the existing such devices, the most effective are turbine sprayers NRT-20 and NRT-10. To increase efficiency and safety, a method of depositing radioactive elements during forest fire extinguishing and cooling hoses using the developed device for creating a water curtain has been proposed. According to the results of experimental studies of the prototype, it was found that in terms of integral efficiency indicators in the ranking of

sprayers it will be third after the NRT-20 and NRT-10, however, the design features allow for the sequential connection of several such devices to the hose line, which makes it more effective and additionally protects the hose lines from the thermal effects of fire.

A study of the prototype of the device for creating a water curtain was carried out using an experimental stand, which includes a pumping unit with an electric drive of 18 kW, which includes a centrifugal liquid pump that can provide a flow rate of up to 48 m³/h at a pressure of up to 1 MPa, a water tank of 1 m³, SDM-1 liquid flow and HK1100C pressure sensors, an ATmega2560 microcontroller with software and a computer with a plug-in. The dependences of water flow on pressure $Q = 0.0126P^3 - 0.1599P^2 + 1.0164P + 0.5986$, the radius of the spray zone on pressure $R = -0.0125P^3 + 0.1247P^2 + 0.2119P - 0.0433$, and the irrigation intensity on pressure $I = 2.132P^{0.457}$ were obtained.

To reduce the time required to complete tasks during forest fire extinguishing in the radioactive contamination zone, a device for orientation in a smoky environment has been developed, which consists of an ultrasonic sensor, a flexible bracket with a display, a power switch, a microprocessor and a power supply, is mounted in a fire helmet, measures distances to objects using ultrasonic waves and displays the value on a display located on the bracket, which is in the firefighter's field of vision. Experimental studies of the device during operation as part of a unit in a thermal smoke chamber and statistical analysis of the results confirmed the reduction in task completion time and increased efficiency of actions in a smoky space, which is expressed in a reduction in the time required to complete tasks by the unit by 24.8%.

Key words: forest fires, radioactive contamination, firefighting, firefighting equipment, firefighting techniques, mathematical model, fire spread, fire localization, deposition of dust and combustion products, orientation in a smoky environment.

Підписано до друку 09.07.2026 р.
Друк різнограф.
Наклад 80 прим.

Формат 60х90/16
Ум. друк. арк. 0,8
Зам. № 2/2026
