

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛАГНО ДЕНИС ВІКТОРОВИЧ

УДК 614.842.6:614.8.086

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У ЗАБРУДНЕНИХ
РАДІОНУКЛІДАМИ ЛІСАХ

21.06.02 – пожежна безпека
(К8 – пожежна безпека)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
(доктора філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, текстів
інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Денис ЛАГНО

Науковий керівник: КОСТЕНКО Віктор Климентович, доктор технічних наук,
професор

Черкаси – 2026

АНОТАЦІЯ

Лагно Д. В. Підвищення ефективності гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.874.01 Львівського державного університету безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

У **вступі** наведено обґрунтування актуальності теми дисертаційного дослідження, її зв'язок з науковими програмами та планами, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет досліджень, вказано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про апробацію та публікацію результатів досліджень. Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання – розроблення та обґрунтування ефективних методів та засобів гасіння лісових пожеж у забруднених радіонуклідами природних екосистемах, зокрема підвищення ефективності дій пожежників, захисту від радіонуклідів під час гасіння пожеж шляхом створення водяної завіси для осадження пилу та диму.

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

У **першому розділі** проаналізовано проблему пожежної небезпеки лісових пожеж в Україні та світі. Виявлено взаємозв'язок між кліматом і виникненням та масштабами пожеж. Результатом потепління є недостатнє зволоження та несприятливий температурний режим. ураження хворобами і шкідниками, що призводить до усихання лісів. Іншою причиною є неналежний догляд за насадженнями, масштабні вирубки, які приносять появі значного запасу горючих матеріалів у сухому стані. Ризик пожеж у таких лісах підвищується і достатньо

невеликого джерела запалювання для виникнення займання. Проблему лісових можна вважати глобальною, що потребує вирішення.

Особливу небезпеку для довкілля та людей становлять пожежі в природних екосистемах на територіях, забруднених радіонуклідами. Україна має значні території лісів, які знаходяться у Чорнобильській зоні відчуження, забруднені здебільшого ^{137}Cs , ^{90}Sr та ^{239}Pu . Пожежі, які виникають у цих лісах та на відкритій місцевості, спричиняють міграцію радіоактивних елементів у складі продуктів горіння на значні відстані. Радіонукліди можуть поширюватися і з пилом на територіях, що зазнали ерозії ґрунтів, потрапляти у водойми та підземні води. Боротьба з поширенням радіонуклідів може здійснюватися лише локально за зрошення поверхні та осадження пилу і продуктів горіння. Організація запобігання та гасіння пожеж у лісах на забруднених радіонуклідами територіях здійснюється за стандартними підходами, проте має свої особливості, які полягають у необхідності захисту задіяного персоналу від радіації, а також мінімізації поширення радіонуклідів у просторі. Насамперед потрібно захистити органи дихання пожежників, техніку, а після завершення ліквідації пожежі провести дезактивацію. Потрібно враховувати наявність радіонуклідів у горючих матеріалах, підстилці та ґрунті. Недотримання заходів захисту та перевищення доз опромінення можуть призвести до онкологічних захворювань. Моніторинг пожежної небезпеки у таких лісах доцільно проводити із застосуванням технічних засобів, обмежуючи перебування людей в режимі патрулювання. Важливими є вимоги до одягу та взуття пожежників, які повинні захищати від дії тепла, а також радіаційного опромінення та потрапляння радіонуклідів через шкіру.

У другому розділі описано методи досліджень, зокрема аналізу та синтезу з метою узагальнення існуючих підходів до гасіння пожеж, системного аналізу – для оцінки комплексу чинників, що впливають на ефективність гасіння, математичного моделювання – для прогнозування поширення пожежі та радіоактивного забруднення, експериментальних досліджень – для перевірки ефективності запропонованих методів, таксономічний метод – для оцінювання ефективності прийняття рішень.

У третьому розділі наведено результати дослідження щодо організації та проведення ефективного гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах. Проведено аналіз техніки та обладнання, які можуть застосовувати для гасіння у зоні забруднення. Така техніка та обладнання повинні бути ефективними та забезпечувати більшу ефективність гасіння пожеж, що дасть змогу зменшити час перебування пожежників та небезпеку опромінення.

Проаналізовано переносні та лафетні пожежні стволи. Встановлено, що найбільшу ефективність з сукупним урахуванням технічних характеристик мають ручні пожежні стволи РСП-50, СРК-50, РСК-50.

Комбіновані пожежні стволи Protek є доволі ефективними, проте мають великі витрати води. Найбільш ефективними з урахуванням технічних показників є Protek-366, дещо нижчим за ефективністю – Protek-360, а найменш ефективним – Protek-368.

Ті ж особливості характерні для лафетних стволів Protek. Їх перевагами є значна дальність подачі води, що дозволить перебувати пожежникам на відстані. Найбільш ефективним є лафетний ствол Protek Style 922, але його недоліком є електричне керування, що не завжди доцільне в умовах лісової пожежі. Менш ефективними в порядку спадання інтегрального показника є Protek Style 622-2, Protek Style 622-1, Protek Style 622-3 та Protek Style 600.

Для гасіння лісових пожеж застосовують, проте рідше, пінне гасіння не використовують для гасіння верхових пожеж. З допомогою пінних стволів можна швидко утворювати протипожежні бар'єри. Піна запобігає поширенню пилу та продуктів горіння, що теж може бути корисним у забруднених радіонуклідами лісах. За інтегральними показниками серед проаналізованих пінних стволів низької кратності найбільш ефективним є СППЕ-4, далі йому незначно уступають СПП-4, СППЕ-8, а найменш ефективним є СППЕ-4. Серед стволів високої кратності найефективнішим для гасіння лісових пожеж за інтегральним показником є ГПС-600.

Оцінено за ефективністю та придатністю до гасіння у забруднених радіонуклідами лісах і пожежну техніку, зокрема пожежні танки, пожежні

автомобілі, пожежні поїзди, літаки та гелікоптери. Найефективнішим за інтегральним показником є літак АН-32П, за ним слідує гвинтокрил ЕС Н225 з водяним баком, далі цей же апарат з водоскидним пристроєм СВ3000М, а найменш ефективним за інтегральними показниками є гвинтокрил МІ-8МТ з водоскидним пристроєм ВЗП-5А. Ефективність пожежних автомобілів залежить не лише від їх прохідності, запасу води та кількості місць для екіпажу, але й від стану лісових доріг, якими потрібно переміщатися до місця пожежі. Загалом автомобілі, як і інші види транспорту, на забруднених радіонуклідами територіях мають мати герметичні кабіни, а повітря в салон має подаватися через фільтри, утворюючи надлишковий тиск.

Проаналізовано також ефективність різноманітних способів пожежогасіння: захоплення полум'я, гасіння водним способом, гасіння за допомогою вогнегасних хімікатів і ґрунту, гасіння за допомогою загороджувальних смуг, гасіння із застосуванням вибухових засобів, гасіння за допомогою відпалу, гасіння шляхом виклику штучних опадів та гасіння з використанням літальних апаратів.

Проаналізовано комп'ютерні моделі, які допомагають оцінити параметри лісової пожежі, на прикладі відомих моделей BehavePlus, FireLib, що використовують модель Ротермелла. Розроблено математичну модель поширення пожежі та її ліквідації, яка базується на удосконаленій моделі Ротермелла та припущенні, що якщо здійснюється гасіння пожежі на певному відтинку периметра, то площа пожежі у відповідному цьому відтинку секторі не поширюється та зменшується на глибину гасіння відповідним засобом пожежогасіння. За цією моделлю можна визначити час локалізації пожежі, коли площа пожежі перестає збільшуватися.

У четвертому розділі зосереджено увагу на захисті персоналу, задіяного в процесі гасіння пожежі у забруднених радіонуклідами лісах, від радіоактивного опромінення. Проведено аналіз нормативних документів, зокрема стандарту СОУ МНС 75.2-00013528-005:2011 про комплекти засобів індивідуального захисту рятувальників, Норм табельної належності підрозділів ДСНС України.

Проаналізовано найпоширеніші способи та засоби осадження пилу та диму в умовах пожежі, які можуть локалізувати або зменшити концентрацію пилу та диму, що містить радіонукліди, і захистити пожежників від радіації. Оцінено за інтегральним показником ефективність насадків та розпилювачів. Встановлено, що найбільш ефективними є турбінні розпилювачі НРТ-20 та НРТ-10, меншу ефективність має НРТ-5, а найнижчу – щілинний розпилювач РВ-12.

На основі аналізу наявних технічних рішень запропоновано пристрій для створення водяної завіси з метою осадження радіоактивних елементів під час гасіння лісових пожеж. За результатами експериментальних досліджень встановлено ефективність запропонованого пристрою. Отримано емпіричні 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 $I = 2,132P^{0,457}$.

Для підвищення ефективності роботи пожежників в умовах обмеженої видимості запропоновано пристрій для орієнтації в умовах обмеженої видимості, який працює на принципі вимірювання відстані з допомогою ультразвуку. Обґрунтовано параметри роботи пристрою в залежності від температури середовища поширення ультразвукових хвиль та розраховано коефіцієнт згасання, який залежить від властивостей середовища. Встановлено, що на робочу відстань датчика впливає температура середовища, з ростом якої згасання збільшується і максимальна відстань зменшується.

Розроблено алгоритм роботи системи орієнтування у задимленому середовищі, реалізованої у вигляді відповідного пристрою. Проведено експериментальні дослідження ефективності роботи запропонованого пристрою в умовах задимленості, задіявши 7 ланок по три особи в кожній. Встановлено, що час виконання завдань пожежниками у складі ланок із застосуванням системи орієнтування зменшився для усіх ланок в середньому з 8,69 хв до 6,57 хв на 2,12 хв або на 25,5%. За результатами статистичного аналізу доведено істотність застосування ланками пристрою для орієнтування в умовах задимлення для зменшення часу виконання завдання у задимленому просторі.

Запропоновані у роботі технічні рішення захищено патентами на корисну модель «Пристрій створення водяної завіси», №146149 від 20.01.2021 та «Пристрій для орієнтації в умовах обмеженої видимості», № 146540 від 24.02.2021.

За результатами досліджень 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. Встановлено основні ризики та небезпеки під час гасіння пожеж на забруднених радіонуклідами територіях, до яких належать поширення радіоактивних елементів з димом і пилом. Запропоновано вибір засобів пожежогасіння на основі індексу ефективності, що враховує технічні характеристики пристрою. Обґрунтовано запропоноване рішення для осадження пилу та диму в умовах лісової пожежі для зменшення впливу радіації на пожежників. Для орієнтування в умовах недостатньої видимості запропоновано та обґрунтовано використання пожежниками пристрою на основі ультразвуку.

Додатки містять список публікацій за темою дисертації, відомості про апробацію результатів, акти впровадження результатів дисертаційного дослідження у практичну діяльність і освітній процес, а також патенти на корисну модель.

Ключові слова: лісова пожежа, протирадіаційний захист, гасіння пожежі, ефективність протипожежного обладнання, задимлене середовище, водяні завіси, осадження пилу та диму, інтегральний показник, математична модель.

ABSTRACT

Lahno D. V. Increasing the efficiency of fire extinguishing in forests contaminated with radionuclides. – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

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

The dissertation will be defended at the meeting of the Dissertation Council D 35.874.01 of the Lviv State University of Life Safety of the State Emergency Service of Ukraine.

The **introduction** substantiates the relevance of the dissertation topic and its connection with scientific programs and plans, formulates the purpose, objectives, object and subject of research, defines the scientific novelty and practical significance of the obtained results, and provides information on the approbation and publication of research findings. The dissertation is devoted to solving a topical scientific problem – the development and substantiation of effective methods and means of extinguishing forest fires in natural ecosystems contaminated with radionuclides, in particular increasing the efficiency of firefighters' actions and protection against radionuclides during fire suppression by creating a water curtain for dust and smoke deposition.

The purpose of research. The purpose of the dissertation is to develop and substantiate effective methods and means of extinguishing forest fires in areas contaminated with radionuclides, taking into account the specifics of radiation hazards.

In the **first chapter**, the problem of fire hazard of forest fires in Ukraine and worldwide is analyzed. The relationship between climate and the occurrence and scale of fires is identified. The result of global warming is insufficient moisture and unfavorable temperature conditions, damage by diseases and pests, which leads to forest drying. Another cause is inadequate forest management and large-scale logging, which contribute to the accumulation of significant amounts of combustible materials in a dry state. The fire risk in such forests increases, and even a relatively small ignition source is sufficient

to cause a fire. The problem of forest fires can be considered global and requires comprehensive solutions.

Fires in natural ecosystems located in radionuclide-contaminated areas pose a particular danger to the environment and human health. Ukraine has large forest areas within the Chornobyl Exclusion Zone, contaminated mainly with ^{137}Cs , ^{90}Sr , and ^{239}Pu . Fires occurring in these forests and in open areas cause the migration of radioactive elements as part of combustion products over long distances. Radionuclides can also spread with dust in areas affected by soil erosion and enter surface and groundwater. Control of radionuclide spread can only be carried out locally by surface irrigation and deposition of dust and combustion products. The organization of fire prevention and suppression in forests contaminated with radionuclides is carried out according to standard approaches but has specific features related to the need to protect involved personnel from radiation exposure and to minimize the spread of radionuclides in space. First of all, it is necessary to protect firefighters' respiratory organs and equipment, and after fire suppression to carry out decontamination. The presence of radionuclides in combustible materials, forest litter, and soil must be taken into account. Failure to comply with protective measures and exceeding radiation doses may lead to oncological diseases. Fire hazard monitoring in such forests should preferably be carried out using technical means, limiting human presence during patrols. Important requirements apply to firefighters' clothing and footwear, which must protect against thermal effects as well as radiation exposure and penetration of radionuclides through the skin.

The **second chapter** describes the research methods used, including analysis and synthesis to generalize existing fire suppression approaches, system analysis to assess the complex of factors affecting suppression efficiency, mathematical modeling to predict fire spread and radioactive contamination, experimental studies to verify the effectiveness of the proposed methods, and the taxonomic method to evaluate decision-making efficiency.

The **third chapter** presents the results of research on the organization and implementation of effective fire suppression in radionuclide-contaminated forests. An analysis of equipment and tools that can be used for firefighting in contaminated areas is

carried out. Such equipment must be effective and ensure higher suppression efficiency, which makes it possible to reduce firefighters' exposure time and radiation hazard.

Portable and monitor fire nozzles are analyzed. It is established that, considering the set of technical characteristics, the highest efficiency is demonstrated by hand-held fire nozzles RSP-50, SRK-50, and RSK-50.

Combined Protek fire nozzles are quite effective but have high water consumption. The most efficient in terms of technical indicators is Protek-366, slightly less efficient is Protek-360, and the least efficient is Protek-368.

Similar features are characteristic of Protek monitor nozzles. Their advantages include a significant water delivery range, which allows firefighters to operate at a distance. The most effective is the Protek Style 922 monitor nozzle; however, its disadvantage is electric control, which is not always appropriate under forest fire conditions. Less effective, in descending order of the integral indicator, are Protek Style 622-2, Protek Style 622-1, Protek Style 622-3, and Protek Style 600.

Foam suppression is used for forest fires, though less frequently, and is not applied to crown fires. With the help of foam nozzles, firebreak barriers can be quickly formed. Foam prevents the spread of dust and combustion products, which may also be useful in radionuclide-contaminated forests. According to integral indicators, among the analyzed low-expansion foam nozzles, the most effective is SPPE-4, followed closely by SPP-4 and SPPE-8, while the least effective is SPPE-4. Among high-expansion foam generators, the most effective for forest fire suppression according to the integral indicator is GPS-600.

Firefighting equipment, including fire tanks, fire engines, fire trains, airplanes, and helicopters, is also evaluated using integral indicators. The most effective is the An-32P aircraft, followed by the EC H225 helicopter with a water tank, the same helicopter with the SV3000M water discharge device, while the least effective according to integral indicators is the Mi-8MT helicopter with the VZP-5A water discharge device. The effectiveness of fire engines depends not only on their off-road capability, water supply, and crew capacity, but also on the condition of forest roads used to reach the fire site. In general, vehicles, like other means of transport in radionuclide-contaminated areas, must

have sealed cabins, and air supplied to the cabin should pass through filters, creating overpressure.

The effectiveness of various firefighting methods is also analyzed, including flame beating, water suppression, suppression using fire-extinguishing chemicals and soil, suppression using firebreaks, suppression using explosive means, backfiring, suppression by inducing artificial precipitation, and suppression using aircraft.

Computer models that help assess forest fire parameters are analyzed using the example of well-known models BehavePlus and FireLib, which employ the Rothermel model. A mathematical model of fire spread and suppression is developed based on an improved Rothermel model and the assumption that if fire suppression is carried out on a certain section of the perimeter, the fire area in the corresponding sector does not spread and decreases by the suppression depth achieved by the applied firefighting means. This model allows determining the fire localization time when the fire area ceases to increase.

The **fourth chapter** focuses on protecting personnel involved in firefighting in radionuclide-contaminated forests from radiation exposure. An analysis of regulatory documents is conducted, including the standard SOU MNS 75.2-00013528-005:2011 on personal protective equipment kits for rescuers and the staffing standards of the State Emergency Service of Ukraine.

The most common methods and means of dust and smoke deposition under fire conditions are analyzed, which can localize or reduce the concentration of dust and smoke containing radionuclides and protect firefighters from radiation. The effectiveness of nozzles and sprayers is evaluated using an integral indicator. It is established that the most effective are turbine sprayers NRT-20 and NRT-10; NRT-5 has lower efficiency, and the lowest efficiency is demonstrated by the slot sprayer RV-12.

Based on the analysis of existing technical solutions, a device for creating a water curtain to deposit radioactive elements during forest fire suppression is proposed. Experimental studies confirm the effectiveness of the proposed device. Empirical dependences of water flow rate on pressure $Q = 0,0126P^3 - 0,1599P^2 + 1,0164P + 0,5986$, spray zone radius on pressure $R = -0,0125P^3 + 0,1247P^2 + 0,2119P - 0,0433$ and irrigation intensity on pressure $I = 2,132P^{0,457}$ are obtained.

To increase firefighters' efficiency under limited visibility conditions, a device for orientation under limited visibility is proposed, operating on the principle of ultrasonic distance measurement. The operating parameters of the device depending on the temperature of the propagation medium of ultrasonic waves are substantiated, and the attenuation coefficient, which depends on the properties of the medium, is calculated. It is established that ambient temperature affects the operating distance of the sensor: with increasing temperature, attenuation increases and the maximum distance decreases.

An algorithm for the operation of the orientation system in a smoke-filled environment is developed and implemented in the form of a corresponding device. Experimental studies of the effectiveness of the proposed device under smoke conditions are conducted, involving seven teams of three firefighters each. It is established that the task completion time for teams using the orientation system decreased for all teams on average from 8.69 minutes to 6.57 minutes, i.e., by 2.12 minutes or 25.5%. Statistical analysis confirms the significance of using the orientation device by teams to reduce task completion time in a smoke-filled environment.

The technical solutions proposed in the work are protected by utility model patents: "Water Curtain Creation Device" No. 146149 dated 20.01.2021 and "Device for Orientation under Limited Visibility Conditions" No. 146540 dated 24.02.2021.

The research results show that, in addition to traditional hazards associated with forest fire suppression, in the presence of radioactive contamination it is necessary to consider additional radiation-related hazards and apply appropriate protective measures. The main risks and hazards during firefighting in radionuclide-contaminated areas are identified, including the spread of radioactive elements with smoke and dust. The selection of firefighting means based on an efficiency index that takes into account technical characteristics is proposed. The proposed solution for dust and smoke deposition under forest fire conditions to reduce radiation exposure to firefighters is substantiated. For orientation under limited visibility conditions, the use of an ultrasonic-based device by firefighters is proposed and justified.

The **appendices** contain a list of publications on the topic of the dissertation, information on the testing of the results, acts of implementing the results of the

dissertation research into practical activities and the educational process, as well as patents for a useful model.

Keywords: forest fire, radiation protection, fire suppression, efficiency of firefighting equipment, smoke-filled environment, water curtains, dust and smoke deposition, integral indicator, mathematical model.

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. *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.

Патент 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. **Лагно 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, урбоєкології 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.

ЗМІСТ

ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМИ ВИНИКНЕННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ У ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ЛІСАХ.....	25
1.1. Небезпека лісових пожеж в Україні та світі.....	25
1.2. Загрози для довкілля та людей від пожеж на забруднених радіонуклідами територіях.....	29
1.3. Особливості гасіння лісових пожеж у зонах забруднення радіонуклідами.....	40
1.4. Небезпека іонізуючого випромінювання та захист пожежників в умовах лісових пожеж.....	44
1.5. Висновки до Розділу 1.....	49
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖ У РАДІАЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ЛІСОВИХ ЗОНАХ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ ГАСІННЯ.....	50
2.1. Методи дослідження ефективності використання протипожежного обладнання.....	50
2.2. Теоретичні методи дослідження процесів поширення та локалізації лісових пожеж.....	52
2.3. Методи дослідження пристрою створення водяної завіси.....	53
2.4. Методи дослідження ефективності використання пристрою для орієнтації в умовах обмеженої видимості.....	55
2.5. Висновки до Розділу 2.....	56
РОЗДІЛ 3. ГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ НА ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ТЕРИТОРІЯХ.....	57
3.1. Обладнання для гасіння лісових пожеж в умовах радіоактивного забруднення та його ефективність.....	58
3.2. Пожежно-рятувальна техніка для гасіння лісових пожеж та її ефективність.....	74

3.3. Ефективність способів пожежогасіння у забруднених радіонуклідами лісах.....	87
3.4. Моделювання лісових пожеж та процесу їх ліквідації в умовах радіаційного забруднення.....	92
3.5. Висновки до Розділу 3.....	106
РОЗДІЛ 4. РАДІАЦІЙНИЙ ЗАХИСТ І ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПЕРСОНАЛУ В УМОВАХ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ НА ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ТЕРИТОРІЯХ.....	108
4.1. Індивідуальний захист персоналу, задіяного до процесу пожежогасіння.....	108
4.2. Способи та засоби осадження пилу та диму в умовах лісової пожежі....	112
4.3. Пристрій для створення водяної завіси з метою осадження радіоактивних елементів під час гасіння лісових пожеж.....	117
4.4. Ефективність роботи пристрою для створення водяної завіси.....	121
4.5. Підвищення ефективності роботи пожежників до дій в умовах задимлення та підвищеного радіаційного фону.....	128
4.6. Висновки до Розділу 4.....	140
ВИСНОВКИ.....	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	144
ДОДАТКИ.....	162
Додаток А Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	162
Додаток Б Відомості про апробацію результатів дисертації.....	165
Додаток В Акти впровадження результатів дисертації.....	167
Додаток Г Патент на корисну модель № 146149.....	170
Додаток Д Патент на корисну модель № 146540.....	171

ВСТУП

Актуальність теми. Ліси, забруднені радіонуклідами, зокрема внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС (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 отриманих результатів полягає у встановленні закономірностей перебігу процесів та підвищення ефективності засобів і способів гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах.

При цьому здобувачем

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. Практичне значення досліджень 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.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та отриманих висновків підтверджується значним обсягом проаналізованих літературних джерел; належно обґрунтованими та прийнятими у таких дослідженнях методами і методиками; застосуванням повіреного обладнання та приладів для проведення досліджень, а також апробацією і впровадженням результатів роботи у практичну діяльність.

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

РОЗДІЛ 1.

ПРОБЛЕМИ ВИНИКНЕННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ У ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ЛІСАХ

Лісова пожежа – стихійне поширення вогню територією лісового фонду. До лісових пожеж відносять горіння не тільки насаджень, але й ділянок чагарників, захаращених вирубок, сухого травостою на прогалинах і вирубках, стерні на ділянках тимчасового сільськогосподарського користування на території лісових господарств. Для боротьби з лісовими пожежами застосовують такі тактичні операції для їх гасіння: повітряна розвідка (моніторинг) пожежі, локалізація пожежі та її ліквідація. Найбільш складними і трудомісткими процесами є зупинення поширення пожежі та її локалізація. Для цього засобами пожежогасіння безпосередньо діють на палаючу крайку. Способи локалізації та ліквідації лісової пожежі у цілому залежать від її виду, сили і масштабів, характеристики місцевості та лісової площі, метеорологічних умов, наявності сил і засобів для гасіння [1].

1.1. Небезпека лісових пожеж в Україні та світі

Щорічно в світі реєструється кілька тисяч лісових пожеж. Від десяти до ста найбільш сильних пожеж мають катастрофічні наслідки. Виникають вони в результаті поєднання багатьох чинників. Основні причини лісових пожеж прийнято класифікувати на антропогенні і природні. Понад 90 % пожеж в екосистемах нашої планети та безпосередньо в лісах – це наслідок людської діяльності – недотримання заходів пожежної безпеки, безконтрольне випалювання сухої трави, навмисний підпал та інше. Близько 10 % пожеж виникають з природних причин – виверження вулканів, самозаймання, розряди блискавки та ін.

Проблематика сучасного стану причин, ризиків та загроз від лісових пожеж, відповідних викликів в нинішніх умовах в Україні, не раз поставала предметом дослідження низки наукових праць фахівців адміністративного, екологічного, земельного права, представників лісівничої науки, державного управління тощо, серед яких В. М. Єрмоленко, В. І. Семчик, В. Б. Авер'янов, Ю. С. Шемшученко, П.

І. Лакида, С. І. Зібцев, В. П. Печуляк, В. І. Курило, І. В. Гиренко та ін. [2]. З кожним роком проблема пожеж, які виникають в природних екосистемах, зокрема в лісах, привертає до себе все більше уваги, адже їх наслідки суттєво впливають на зменшення площ лісів, зміну кліматичних умов у світі. Лісова пожежа залежно від її інтенсивності, погодних умов, характеристик лісових горючих матеріалів іноді може бути позитивним фактором для розвитку лісу, але здебільшого фатальним, що призводить до знищення екосистем [3, 4]. Це і відображається у принципах лісопожежної політики, які регулюють діяльність у цій сфері.

Проблема збереження лісів та захисту їх від різних шкідливих факторів як природної, так і антропогенної природи є важливою, комплексною і масштабною. Чільне місце у її вирішенні посідає захист лісів від пожеж. Дослідження динаміки лісових пожеж показали постійне збільшення їх кількості в Україні та світі. Винятком можна вважати період інтенсивного розвитку пожежно-рятувальних служб у першій половині XX століття, коли загальна площа пожеж у світі зменшилася. А на початку XXI століття кількість значних лісових пожеж, які призвели до людських жертв та матеріальних збитків, продовжувала зростати [5, 6]. Чинники виникнення лісових пожеж, є здебільшого антропогенними. Загалом кількість лісових пожеж протягом XX століття істотно збільшилася. Однак пік їх кількості в світі за всю історію спостереження припав на останнє десятиліття XX століття. Цьому сприяло розширення землекористування та сільськогосподарської діяльності, що призвело до збільшення маси лісових горючих матеріалів на одиницю площі та зростання кількості людських поселень, що межують з ділянками лісу. Почастішання природних лих в усьому світі експерти пов'язують також з глобальним потеплінням і його наслідками [109]. Дослідження виявили взаємозв'язок між вогнем і зміною клімату, що може перевершити вплив глобального потепління та мати значні наслідки для лісів, лісового господарства, захисту людини й економіки. Основним чинником відновлення лісових насаджень є пожежі, які суттєво впливають на структуру та функції лісу [7, 8]. У світі щороку лісові пожежі охоплюють значні території, їх площі сягають біля 400 млн га (рис. 1.1) В окремі роки масштаби таких пожеж є значними. [9].

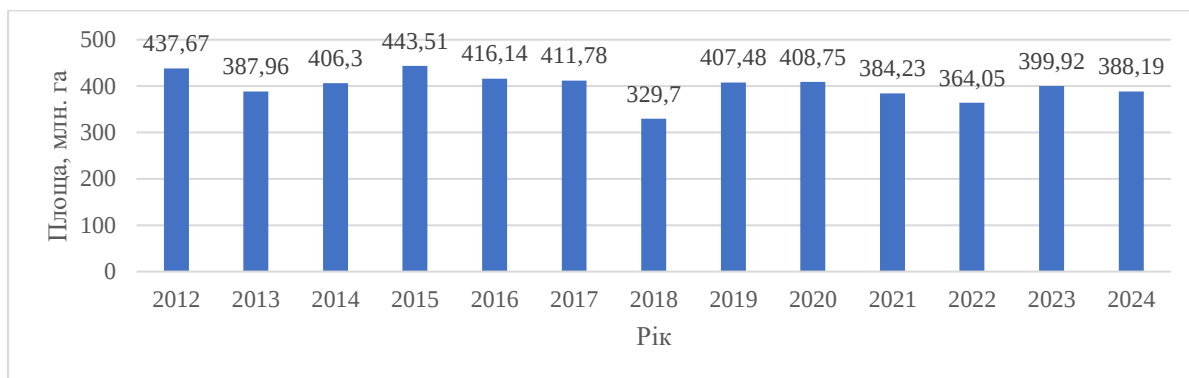


Рисунок 1.1 – Площі лісових пожеж у світі за період 2012-2024 рр. за даними [9]

У 2018 р. через тривале скупчення великої маси сухих дерев у лісах та спеку в штаті Каліфорнія, США, масштабні лісові пожежі спричинили загибель щонайменше 86 осіб, понад 500 – зникли безвісти, понад 7200 будівель було зруйновано. Часто виникають пожежі тропічних лісів Амазонії. У 2019 р. 10 місяців не могли загасити пожежу, що знищила 900 тис га лісу. У 2019-2020 рр. в Австралії внаслідок лісових пожеж, високих температур і посухи, знищено 18 млн га лісу і загинуло 30 осіб [10].

Загальна площа лісових ділянок, що належать до лісового фонду України, становить 10,4 млн га, у тому числі 9,6 млн га вкриті ліською 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 [11]. Статистика лісових пожеж [12] свідчить про певне зменшення їх кількостей після 2010 р., але періодично ці показники зростають (рис. 1.2).

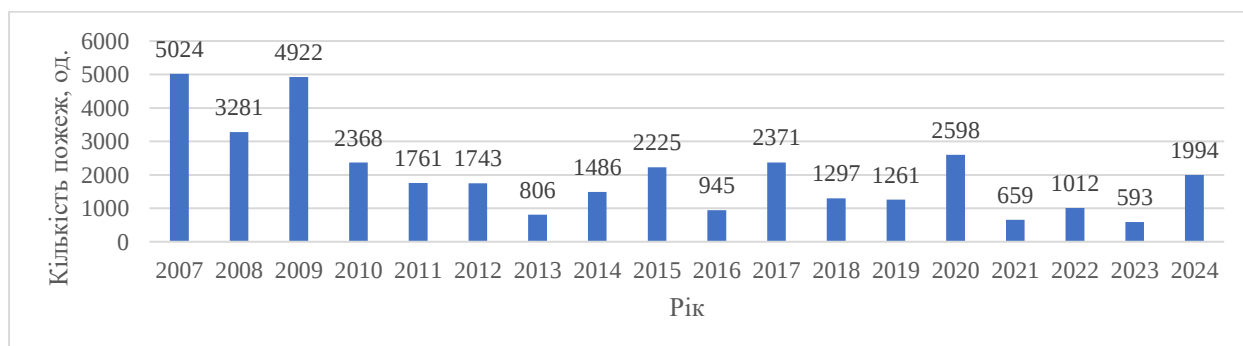


Рисунок 1.2 – Кількість лісових пожеж в Україні за період 2007-2024 рр. за [12]

А площі пожеж за даними [11] мають тенденцію до зростання (рис. 1.3). Вітчизняні вчені, спостерігаючи чітку тенденцію до збільшення площі великих

лісових пожеж, звертають увагу на високу горючість лісів в Україні, ключовими факторами якої є недостатнє фінансування лісових пожежних служб, недостатньо ефективна підготовка та взаємодія з оперативно-рятувальними підрозділами їх персоналу, а також невиконання вимог законодавства із запобігання пожежам [5].

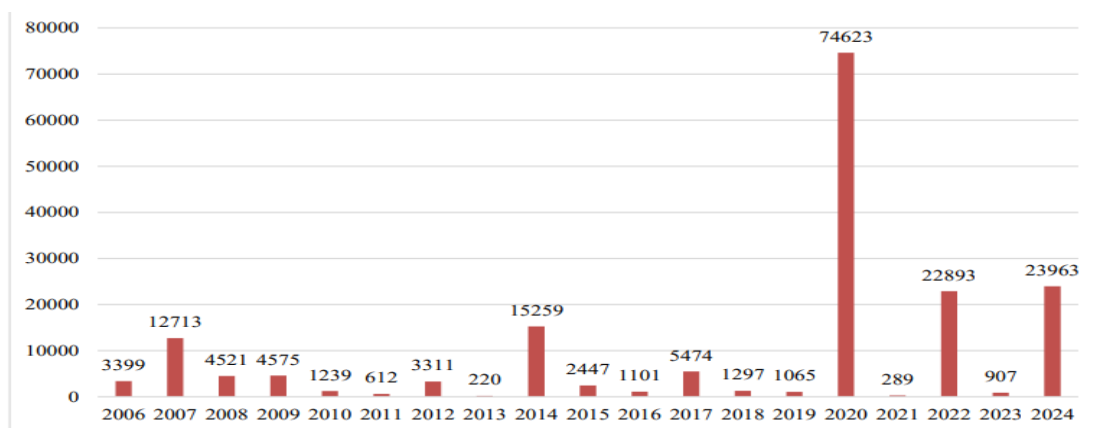


Рисунок 1.3 – Динаміка площі лісових пожеж в Україні (у га) у 2006-2024 рр. [11]

Негативні наслідки пожеж в лісових екосистемах виникають з огляду на важливість лісів для суспільства і в залежності від їх масштабів включають окрім економічних втрат загострення соціальних проблем та екологічні проблеми, а саме: викиди шкідливих продуктів горіння, переважно у вигляді аерозолів, які поширюються на значні відстані, забруднення атмосферного повітря CO_2 , зменшення біорізноманіття, погіршення умов природного відновлення лісів, скорочення кормової бази та утруднення міграції видів, підвищення вразливості лісів до шкідників і хвороб, зміни структури ландшафту та ерозії ґрунтів, тощо. Тому проблему лісових пожеж можна вважати глобальною, оскільки від них страждають всі країни зі значними площами лісів. Щоб мінімізувати наслідки пожеж, важливо вчасно їх виявити. До методів і засобів своєчасного виявлення пожеж можна віднести постійне спостереження шляхом патрулювання, огляду лісових масивів з пожежних веж і щогл, систем відеоспостереження, використання пілотованих і безпілотних літальних апаратів (БПЛА), спостережень з космосу [13]. На жаль, ці заходи не є ефективними, і пожежа розвивається до такого рівня, що на неї необхідно реагувати, застосовуючи значні сили і засоби для ліквідації.

Ліси, які зазнають пожеж високої інтенсивності, відновлюються довше, ніж від пожеж середньої та низької інтенсивності. Економічні витрати також вищі для пожеж високої інтенсивності, близько 18000 новозеландських доларів/га, але через невелику відносну частку таких пожеж саме пожежі середньої інтенсивності завдають найбільшої економічної шкоди в Новій Зеландії [14].

У чотирьох лісових ландшафтах східної Австралії виявлено, що ризики, пов'язані з лісовою пожежею, були значно вищими за погодних умов сезону 2019–2020 рр. порівняно з усім спектром довгострокових історичних погодних умов. Що стосується спаленої території та втрати будинків, умови 2019–2020 років призвели до більш ніж подвоєння залишкового ризику в чотирьох ландшафтах, незалежно від рівня обробки (середнє збільшення на 230%, діапазон 164–360%). Керівники гасіння пожеж повинні бути готові до більш високого рівня залишкового ризику, оскільки зміна клімату збільшує ймовірність таких пожежних сезонів [15].

Враховуючи особливо масштабні лісові пожежі в Україні протягом 2007 – 2020 рр., які призвели до загибелі людей, руйнування житлових будинків, виробництва та соціальної інфраструктури, що призвело до величезних екологічних та економічних збитків, стає очевидним, що система охорони лісів від пожеж потребує глибокого аналізу та відповідних рішень щодо її вдосконалення. Першим кроком до створення сучасної системи управління пожежами в Україні має бути створення надійної національної системи статистики пожеж, яка б висвітлювала реальну проблему та охоплювала всі типи ландшафтних пожеж – на відкритих територіях і в лісах. У праці [16] наведено аналіз ландшафтних пожеж за період 2001-2019 рр. за глобальними продуктами системи MODIS. Також у цій роботі проведено аналіз складових діючої системи управління пожежами та сформульовано основні недоліки та основні рекомендації щодо її вдосконалення.

1.2. Загрози для довкілля та людей від пожеж на забруднених радіонуклідами територіях

Лісові пожежі призводять до значного забруднення довкілля продуктами горіння. У їх складі значними є викиди вуглецю ©. У [17] виявили значні обсяги

викидів внаслідок горіння біомаси на відкритих територіях (рис. 1.4). Торф'яні пожежі, які виникають і внаслідок горіння лісу, також супроводжуються викиди (С).

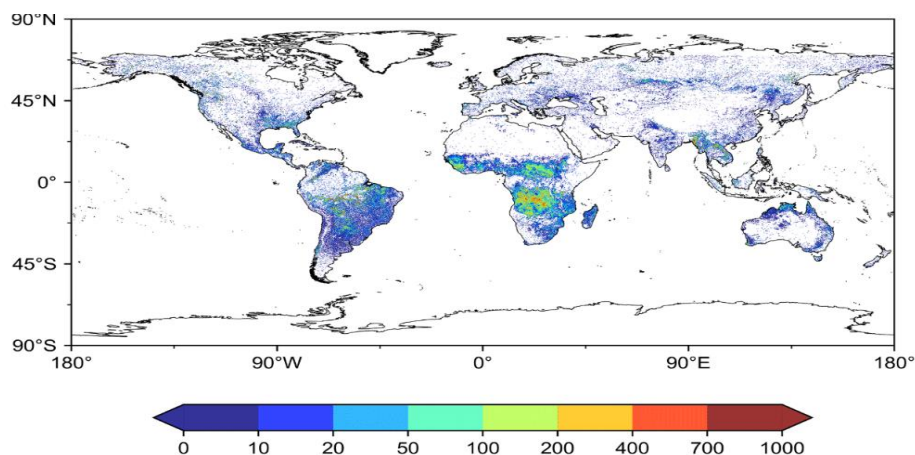


Рисунок 1.4 –Середні річні викиди вуглецю (у г/м²/р.) протягом 2020-2022 рр. [17]

В Україні поклади торфу часто межують або розташовані у лісах, зокрема біля Києва та у Чорнобильській зоні (рис. 1.5). Торфовища північної помірної зони містять С і зазнають інтенсивних пожеж. Оцінка викидів С від пожеж враховує вплив гідрології і землеустрою на інтенсивність і глибину горіння торфу.



Рисунок 1.5 – Поклади торфу та торф'яні пожежі поблизу Києва [18]

Лісові пожежі на торфовищах мали середню глибину горіння торфу 0,42 м і призвели до оціночних підземних викидів від пожежі 9,16 млрд т С і надземних викидів від пожежі 0,31 млрд т С, для загальних викидів від пожежі 9,47 млрд т С. Середні підземні викиди С були оцінені в 544,43 т С га⁻¹, а середні надземні викиди С становили 18,33 т С га⁻¹ [19]. У [20] досліджено проблеми, пов'язані з горінням торфу, визначенням глибини горіння та оцінювання викидів вуглецю. Наведено

відомості про методи визначення глибини горіння. Дослідження інформує про поточний стан знань системи моніторингу торф'яної пожежі.

В Індонезії великі пожежі виникають регулярно, викидаючи С і забруднювачі повітря, що призводить до негативних наслідків для здоров'я [21]. Об'єднано дані про викиди внаслідок вогню та ґрунтовий покрив, щоб оцінити пожежі 2015 р., які були найбільшими за останні роки та призвели до збитків на суму 28 млрд доларів США, тоді як шість найбільших пожеж у період з 2004 по 2015 рр. спричинили економічні збитки на загальну суму 93,9 млрд доларів США. Якби відновлення було завершено, площа, спалена у 2015 р., зменшилася б на 6%, зменшивши викиди CO_2 на 18%, а $\text{PM}_{2,5}$ – на 24%. Відновлення торфовищ могло б заощадити 8,4 млрд доларів США протягом 2004–2015 рр..

У [22] оцінено надземні та підземні викиди С внаслідок пожежі Pains Bay Fire, тривалої лісової пожежі (112 днів; 18329 га), яка спалила прибережний торф'яник у східній Північній Кароліні, США. Загальні надземні викиди С від пожежі склали 289579 т і 214 т га^{-1} в межах периметра зони горіння, а середні підземні викиди С становили 5237521 т і в межах зони горіння – $1595,6 \text{ т га}^{-1}$.

Значно більшою небезпекою для людей і довкілля є викиди у складі продуктів горіння радіонуклідів внаслідок пожеж на забруднених територіях. Забруднення виникають внаслідок аварій на ядерних об'єктах, випробуванні ядерної зброї, добування і збагачення урану. Згідно з [23] станом на 2019 р. у 31 країні світу діють 449 ядерних реактори загальною потужністю 398887 МВт, 54 будуються і жоден не захищений на 100% від аварійних ситуацій з потраплянням радіонуклідів в атмосферу. Навіть передові технології не можуть гарантувати безперебійну роботу АЕС за стихійних лих [24], а під час експлуатації в навколишнє середовище майже завжди потрапляє певна кількість радіонуклідів.

Аварія на ЧАЕС у квітні 1986 року стала найбільшою техногенно екологічно-гуманітарною катастрофою, спричинивши випадання близько $5 \cdot 10^{15}$ Бк радіоактивних аерозолів, з яких $3 \cdot 10^{13}$ Бк припадає на трансуранові елементи. Найбільші густини забруднення ґрунту сягають для ^{137}Cs понад $8 \cdot 10^{12}$ Бк/км², для ^{90}Sr – $7 \cdot 10^{12}$ Бк/км² і ^{239}Pu – $3 \cdot 10^{10}$ Бк/км². Загальна площа Чорнобильської зони

становить 259837,8 га (2600 км²), зокрема: ліси – 139,7 тис. га; перелоги – 71,4 тис. га; болота – 6,5 тис. га; торфосховища – 5,8 тис. га [25]. Актуальною є проблема лісових пожеж на цій території. Статистика таких пожеж за 1992-2020 рр. (рис. 1.6) корелюється з відповідними даними в Україні.

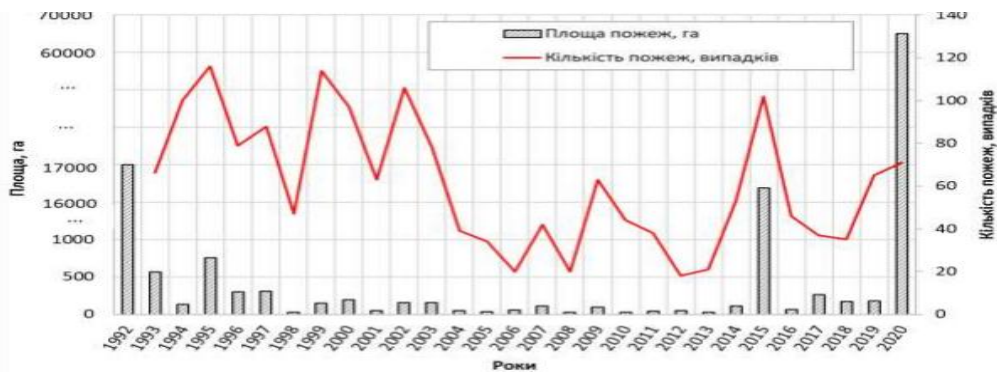


Рисунок 1.6 – Статистика пожеж у Чорнобильській зоні у 1992-2020 рр. [137]

Великі пожежі у Чорнобильській зоні за період 1992-2020 рр. зображені на рис. 1.7. Найбільші площі були у 2020 р. та 2015 р. Є суттєві особливості перебігу та гасіння таких пожеж: міграція радіонуклідів, збільшення зони забруднення; ураження радіоактивним випромінюванням пожежників; необхідність використання спеціального одягу та спорядження для захисту, що ускладнює проведення робіт з ліквідації загорань, і потреба контролю та дезактивації людей і техніки після проведення робіт [26].

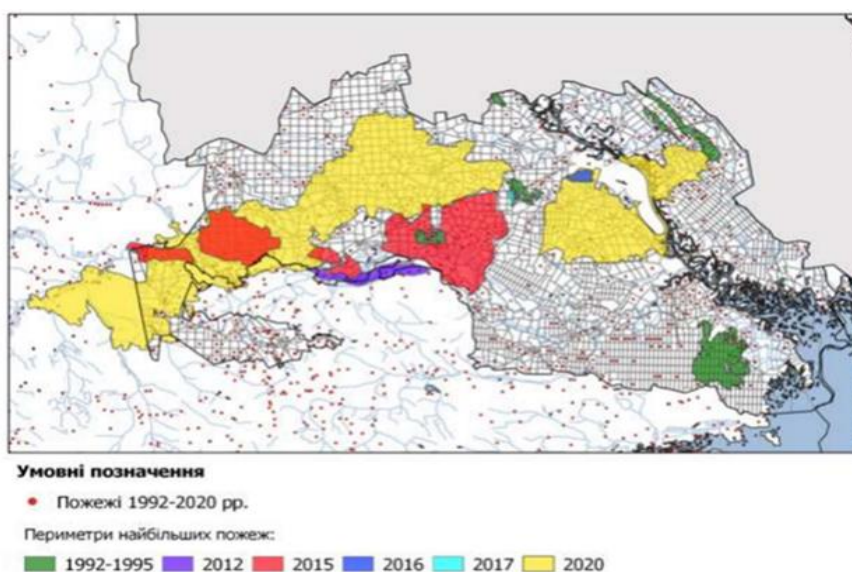


Рисунок 1.7 – Великі пожежі у Чорнобильській зоні у 1992-2020 рр. [137]

З природних екосистем ліс найбільше накопичує радіонукліди і найдовше утримує. Найінтенсивніше вони депонуються в рослинах і тваринах, що інтенсивно ростуть. Рослини є основними переносниками радіонуклідів з ґрунту в організми тварин і людини. Радіонукліди надходять у рослини з ґрунту. Процес прискорюється у кислому середовищі й у вологому кліматі. Кількість опадів, вологість ґрунту впливають на міграцію радіонуклідів [27].

Міграція радіонуклідів повністю відповідає закону В. Вернадського: «Міграція хімічних елементів на земній поверхні і в біосфері, в цілому, здійснюється або при безпосередній участі живої речовини (біогенна міграція), або ж протікає у середовищі, геохімічні особливості якого обумовлені живою речовиною, як тією, яка нині населяє біосферу, так і тією, яка діяла на Землі протягом всієї геологічної історії». Цей закон проявляється у середовищі лісу [28].

Значну небезпеку в перерозподілі радіоактивних частинок становлять лісові пожежі, внаслідок яких різко знижується радіомісткість лісових екосистем, оскільки радіоактивні частинки у складі аерозолей і газоподібних сполук виносяться в повітря. Найбільше радіонуклідів виносяться за межі лісу при верховій стійкій пожежі. При підземних пожежах на торфовищах, коли торф вигоряє повністю, всі радіонукліди, що містяться в ньому, можуть перейти в аерозольний стан. При низових пожежах горить сухий ґрунтовий покрив, при цьому вивільнюється 5-20% загального запасу радіонуклідів лісового масиву. Лісові пожежі порушують депонування радіоактивних частинок в екосистемах і призводять до перерозподілу радіоактивного забруднення території [27].

Горизонтальна міграція радіонуклідів спричиняє радіаційне забруднення прилеглих територій. Небезпека вторинного забруднення пов'язана з щільністю забруднення ґрунтів, вітровою ерозією і активністю радіонуклідів. Внаслідок пожеж концентрація радіонуклідів у повітрі може зрости майже в 104 рази [8]. Єдиним ефективним методом зниження інтенсивності поширення продуктів горіння, є осадження розпиленою водою. Аналіз методів і пристроїв осадження радіоактивного аерозолі, пилу і зрошення поверхні під час пожежі в зоні відчуження встановив їх ефективність лише за використання пожежних рукавів [6].

Вивченню екологічної ситуації на радіоактивно забруднених територіях присвячено багато досліджень і багато питань, пов'язаних з безпекою, все ще хвилюють населення, яке проживає на цій території. Загрозою є періодичні пожежі, охоплюють димом значні площі і довго тривають. Для усунення тривоги населення необхідно максимально доступно і переконливо донести правдиву інформацію. Це дозволить представити інформацію, зрозумілу для населення [29].

У [30] наведено аналіз проблемних питань щодо порядку моніторингу обліку пожеж і удосконаленню збору даних з оцінки стану пожежної безпеки об'єктів у Чорнобильській зоні. Запропоновано шляхи удосконалення забезпечення пожежної безпеки об'єктів що знаходяться на цій території. Робота [31] присвячена особливостям використання безпілотних літальних систем (БПЛА) у підрозділі з ліквідації надзвичайних ситуацій. Проаналізовано 5 ймовірних катастроф в Угорщині, зокрема ядерні аварії, викиди небезпечних матеріалів, повені, землетруси та лісові пожежі. У [32] акцентовано увагу на загрозі обстрілів критичної інфраструктури держави, в тому числі АЕС, що підвищує ризик техногенних катастроф транскордонного поширення.

Небезпеку внаслідок поширення радіонуклідів під час пожеж у Чорнобильській зоні встановлено у Києві. Активність ^{137}Cs у приземному повітрі з 4 по 20 квітня 2020 р. досягала $2\text{--}4 \text{ мБк м}^{-3}$. Результати у [33], узгоджуються з даними вимірювань радіоактивного забруднення в Києві та на територіях навколо кількох АЕС в Україні. Сумарна ефективна доза опромінення населення Києва під час пожежі оцінювалася в $5,7 \text{ нЗв}$ від зовнішнього опромінення та вдихання ^{137}Cs і ^{90}Sr , а до кінця 2020 р. зросла до 30 нЗв . Це близько $0,003\%$ річного допустимого рівня опромінення. Очікувана ефективна доза для персоналу ЧАЕС від вдихання ^{137}Cs і ^{90}Sr під час лісових пожеж 2020 р. – 16 нЗв . Внаслідок таких пожеж у 2020 р. в атмосферу потрапило $0,7\text{--}1,2 \text{ ТБк } ^{137}\text{Cs}$. Дим частково поширювався на південь і захід та сприяв появі ^{137}Cs над територією України і аж до Західної Європи. Збільшення ^{137}Cs у повітрі було від кількох сотень $\text{мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ на півночі України до слідових рівнів у декілька $\text{мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ або у межах фону в країнах Європи [34].

Забруднення радіонуклідами навколишнього природного середовища внаслідок аварії на ЧАЕС вивчено у [35]. На основі моделювання викиду радіоактивних продуктів на ранній стадії аварії проаналізовано пожежонебезпечні ситуації в лісах. За результатами порівняльного оцінювання натурних і лабораторних спостережень за методикою аналізу радіологічних ризиків проведено моделювання виникнення, розвитку і поширення лісової пожежі, розраховано дозові навантаження для населення пожежонебезпечних територій.

У Японії після аварії на АЕС «Фукусіма» (ФАЕС), виходячи з рівнів радіації з березня 2012 року, три зони були визначені таким чином: зона, у яку важко повернутися (зона обмеженого доступу) – річна кумулятивна доза перевищила 50 мЗв станом на березень 2012 р., не може бути нижчою за 20 мЗв, навіть через 6 років після аварії; зона обмеженого проживання – річна кумулятивна доза за потужністю дози в повітрі, перевищує 20 мЗв; підготовча зона для скасування наказу про евакуацію – річна кумулятивна доза перевищує 20 мЗв [36].

У [8] розглянуто основні причини виникнення лісових пожеж на радіоактивно забруднених територіях та фактори, що впливають на поширення пожежі та радіоактивних речовин. Основними елементами впливу на еколого-радіаційну обстановку є інтенсивність і напрямок міграції продуктів горіння.

Радіоактивне забруднення впливає не лише на людей, флору та фауну, але і на мікроорганізми. Зв'язок між місцями з високим рівнем радіації та певними мікробними групами є, швидше за все, результатом суворіших екологічних умов у цих місцях, а не через саму радіацію. Грунтові мікробіоти, адаптовані до природних умов, мають більшу стійкість до іонізуючого випромінювання, ніж виявлено в лабораторних дослідженнях. Це демонструє важливість оцінки впливу іонізуючого випромінювання на ґрунтові мікробіоти в польових умовах [37].

Ядерні інциденти, такі як аварії на АЕС і детонація ядерної зброї, вивільняють радіоактивні опади, які включають ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{235}U , ^{238}U , ^{234}U , ^{239}Pu та багато інших радіоактивних ізотопів. Брудна бомба, ймовірно, розповсюджує лише одну радіоактивну речовину, причому найімовірнішою речовиною є ^{137}Cs , а

також ^{60}Co і ^{90}Sr . За радіаційного інциденту стабільні пацієнти повинні бути дезактивовані, щоб мінімізувати подальше радіаційне опромінення. [38].

У [39] отримано моделі утворення радіоактивної димової хмари та її міграції в атмосферному повітрі, поширення радіоактивних аерозолів і газових компонентів з урахуванням конвекції, турбулентного обміну, вологості, сили та напрямку вітру над зоною горіння. Процеси видування і тріпотіння вітром як збурювачів горизонтальної міграції радіоізотопів – це новий напрямок досліджень. Визначено інтегральні показники для оцінки здатності лісу накопичувати радіоізотопи.

Дослідження [40] зосереджено на питомій активності радіонуклідів внаслідок термічної дії пожеж у природних екосистемах. Встановлено, що уражені пожежами едафотопи природним чином відновлюються, та відновлюються ґрунти. З тривалістю пожежі питома активність радіонуклідів зменшується. Підвищена активність радіонуклідів у ґрунтах має згубний вплив на екологічний стан.

Питома активність ^{137}Cs у сухих атмосферних відкладеннях змінюється від 1,06 на висоті 846 м до 2,37 Бк м^{-2} на квартал на висоті 3200 м і зростає зі збільшенням висоти. Активність ^{137}Cs у ґрунті та сухих атмосферних осадженнях значно корелювала, і активність ^{137}Cs у ґрунтах і атмосферних сухих осадженнях зменшується зі зменшенням висоти. 50-річна ефективна доза від опромінення опадами ^{137}Cs змінюється залежно від висоти від 0,007 до 1,42 мЗв [41].

У роботі [42] вимірювали концентрацію радіонуклідів у повітрі, коефіцієнти ресуспендування, інтенсивність і швидкості осадження та дисперсний склад радіоактивних аерозолів. Розраховано дози ураження пожежників від їх вдихання. Розроблено математичну модель для початкового підйому шлейфу, а перенесення радіоактивності в атмосфері описувалося моделлю Гаусса. Алгоритм Монте-Карло застосовано для моделювання ресуспендування / транспортування радіоактивних аерозолів з метою врахування характеру вхідних параметрів підйому шлейфу.

Концентрації радіонуклідів ^{210}Pb , ^{210}Po , ^7Be , ^{40}K та ^{137}Cs у приземному повітрі визначали у трьох розмірах частинок (2,4–10,2, 0,73–2,4 та менше 0,73 мкм). Проби повітря великого об'єму були відібрані в п'яти різних місцях у Кувейті. Радіологічна небезпека через вдихання радіоактивних речовин у повітрі низька і є

незначною, коли річна оціночна ефективна доза становить близько 64,0 мкЗв. Вимірювання радіоактивності в повітрі складають основу для оцінки часу перебування аерозолів, швидкості повторного суспендування пилу, перерозподілу ґрунту та розподілу джерел, зокрема радіонуклідів ^{210}Pb і ^{210}Po [43].

Дослідження [44] охоплює різні типи ядерних установок, включаючи установки виробництва медичних ізотопів, заводи з переробки і АЕС. Зосереджено увагу ^{131}I , який має серйозний вплив на здоров'я людини на ранніх стадіях ядерної надзвичайної ситуації. Надійна оцінка дози вимагає як детальної та достовірної інформації про фізико-хімічний склад ^{131}I в повітрі. Крім вибухів реакторів і пожеж, інші ядерні аварії також призведуть до домінування ^{131}I в атмосфері.

У дослідженнях польових умов [45] основна увага приділялась виведенню інтегральних характеристик процесу ресуспендування радіоактивних частинок, що використовуються на практиці, зокрема узагальнених даних про коефіцієнт та швидкість ресуспендування. Узагальнено дані про розподіл концентрації активності радіонуклідів за розміром частинок за різних умов ресуспендування аерозолів у приземному шарі атмосфери. Наведено результати багаторічних вимірювань характеристик радіоактивних аерозолів, що викидаються з об'єкта «Укриття». Дані спостережень та експериментів повторного занесення радіоактивних аерозолів в атмосферу внаслідок природних пожеж та екстремальних метеорологічних умов збігаються з результатами моделювання.

Близько 341 ГБк ^{137}Cs , 51 ГБк ^{90}Sr , 2 ГБк ^{238}Pu , 33 МБк ^{239}Pu , 66 МБк ^{240}Pu і 504 МБк ^{241}Am викинуто 1–22 квітня 2020 р., що майже в 1 млрд разів менше, ніж аварія в 1986 р. і в основному поширений в Центральній і Східній Європі. Великий розмір частинок, що несуть радіонукліди, запобігає їх переносу на великі відстані і підтверджується концентраціями, виявленими в Європі. Найвищі кумулятивні ефективні дози (> 15 мкЗв) були розраховані для пожежників і населення, що проживає в СЗЗ, тоді як дози були значно нижчими в Києві (2–5 мкЗв) і незначними в Європі. Усі дози радіологічно незначущі, і не очікується жодного впливу на здоров'я населення Європи від пожеж у квітні 2020 р. [46].

Варіації ^7Be , ^{40}K , ^{210}Pb та ^{137}Cs повітря Братислави вивчали протягом 2001–2019 років за допомогою щотижневого відбору проб і γ -спектрометрії HPGe. У той час як варіації ^7Be були пов'язані з переносом повітряних мас із нижньої стратосфери в повітря на рівні землі, зворотна тенденція спостерігалася для варіацій ^{210}Pb через інфільтрацію радону з ґрунту. Концентрації активності ^{137}Cs (без урахування аварій на ЧАЕС і ФАЕС) знижувалися з періодом напіврозпаду 1,9 року, однак протягом останніх років були майже постійними. Підвищення рівнів ^{40}K спричинено ресуспензією ґрунту та переносом радіонуклідів вітром [47].

Хоча і аварія на ФАЕС у 2011 р., і аварія на 4-му блоці ЧАЕС у 1986 р. класифікуються як 7-й рівень, найгірший ядерний випадок за Міжнародною шкалою ядерних і радіологічних подій МАГАТЕ, існують відмінності, включаючи процес аварії, склад радіонуклідів у викидах, метео- та геологічні умови. Викиди ^{131}I і ^{137}Cs в атмосферу на ФАЕС були в шість разів менші, ніж на ЧАЕС. Залежно від рівня забруднення ^{137}Cs , забруднені ним території класифікувалися як зони відчуження ($>1480 \text{ кБк м}^{-2}$), обов'язкового відселення ($555\text{--}1480 \text{ кБк м}^{-2}$) та добровільного відселення ($185\text{--}555 \text{ кБк м}^{-2}$). Площі становили відповідно 272, 459 і 1405 км^2 , і є в 11–15 разів менші, ніж на ЧАЕС. Кількість постраждалих людей навколо ФАЕС була в 3–5 разів меншою порівняно з ЧАЕС [48].

Антропогенна діяльність, високий стік і крутий рельєф призвели до швидкого зниження концентрації активності ^{137}Cs у ґрунтах і річках, особливо в перший рік після аварії. Зменшення опроміненої радіоактивності було помітно швидшим, ніж спостерігалось після аварії на ЧАЕС, ймовірно, пов'язане з відмінностями в географії та кліматі, а також інтенсивною діяльністю з відновлення на Фукусімі. Однак ліси у Фукусімі зберегли значну кількість ^{137}Cs у верхніх сантиметрах ґрунту і можуть залишатися джерелом ^{137}Cs біля річки. Для подальшого розуміння поведінки як природних, так і випадających радіонуклідів у навколишньому середовищі, має бути довгострокова доступність даних [49].

Ресуспензія, спричинена діяльністю людини та погодою, також може вплинути на рівень виявлення ^{137}Cs . Річні ефективні дози зовнішнього опромінення в містах Футаба та Окума були оцінені на обмеженому рівні ($<1 \text{ мЗв/рік}$) [50]. Район

Кацусіка на північному сході Токіо мав найбільше в Токіо випадіння штучних радіонуклідів після аварії на ФАЕС. Середня потужність дози, виміряна в 2015–2018 рр., щороку зменшувалася, але після 2018 р. відсоткове зниження було меншим через зменшення кількості ^{134}Cs ; цей радіонуклід розпадається з періодом напіврозпаду 2,065 р. [51]. Район Токацу перебував на одному шляху радіоактивних шлейфів під час аварії на ФАЕС і потужність поглиненої дози в повітрі там значно зросла. У 2020 р. проведено дослідження за допомогою сцинтиляційного спектрометра NaI(Tl). Середня потужність дози в повітрі становила 54 нГр/год, і вона зменшилася на 21% порівняно з 2015 роком. Очікуваний ектопічний період напіврозпаду був значно коротшим внаслідок комбінованих факторів: вивітрювання, діяльність людини і будівництво доріг [52]. У [53] досліджені потужності дози навколишнього опромінення в районі Накадори, щоб з'ясувати, що дози нижчі за 1 мЗв/р. Частина району та 3 населених пункти мають дози 1,0–2,0 мЗв/р. Загальна річна доза опромінення ^{137}Cs і природним фоном у Фукусімі становлять 2–4 мЗв/р. і є близька до природних доз Європи. Ризик опромінення населення в 1 мЗв/р. оцінений як $4,5 \cdot 10^{-7}$ на рік.

Наведено загальний метод розрахунку доз, поглинених ізотопами, що виділяються під час ядерних аварій, який використаний для розрахунку доз для жителів Південної Польщі через вдихання ^{131}I , викинутого внаслідок аварії на ФАЕС. За допомогою розробленої моделі розраховано сумарні дози для шести вікових груп, як для газоподібних, так і для аерозольних фракцій. Очікувана ефективна доза H_{50} для дорослого досягла 16 нЗв, що менше 0,001% фонові дози. Доза ураження щитовидної залози дорослого досягла 0,33 мкЗв або 0,0007% дози опромінення населення цієї території після аварії на ФАЕС [54].

Таким чином, окрім загроз для людей і довкілля, характерних для будь-яких лісових пожеж, на забруднених радіонуклідами територіях додається небезпека поширення радіонуклідів і внаслідок цього радіоактивного ураження та забруднення навколишнього середовища.

1.3. Особливості гасіння лісових пожеж у зонах забруднення радіонуклідами

Гасіння пожеж у лісах України здійснюється переважно працівниками лісового господарства. Залежно від класу природної пожежної небезпеки, лісорослинної зони, структури лісового фонду і забезпеченості шляхами створюються лісові пожежні станції (ЛПС) двох типів: першого – на базі лісництв з метою забезпечення оперативного виявлення і ліквідації лісових пожеж у зоні обслуговування на початковій стадії та гасіння спільно із ЛПС другого типу великих лісових пожеж; другого – переважно на центральних садибах господарств, з більшою кількістю сил і засобів для забезпечення швидкої ліквідації лісових пожеж у зоні обслуговування та великих лісових пожеж поза її межами; надання допомоги іншим лісокористувачам [55, 56]. На радіоактивно забруднених територіях необхідно вживати максимально можливих заходів щодо недопущення виникнення лісових пожеж та їх розповсюдження. У насадженнях зі щільністю забруднення ^{137}Cs понад 15 Кі/км^2 або ^{90}Sr понад $3,0 \text{ Кі/км}^2$ гасіння у лісах проводять підрозділи ДСНС України. Пожежна небезпека встановлюється на один клас вище для насаджень з рівнем радіаційного забруднення від 1 до 14 Кі/км^2 незалежно від породного складу, віку і ТУМ [57].

Незважаючи на модернізацію вогнегасної техніки і розвиток нових методів боротьби з вогнем, гасіння пожежі великої кількості ручної роботи. Успішне гасіння безпосередньо пов'язано з своєчасним його виявленням і ефективними діями на початковій стадії, щоб локалізувати пожежу раніше, ніж вона стане неконтрольованою. У Чорнобильській зоні наземне патрулювання ускладнене через радіаційну небезпеку. Тому створена мережа спостережних вишок з відеокамерами. Після виявлення пожежі вирішальне значення має швидке прибуття сил і засобів та проведення початкової атаки. Застосовують переважно два прийоми гасіння: фронтальну і флангову атаки. Іноді роблять зустрічний пал, створюють мінералізовані смуги. Відпал здійснюють на пологих ділянках чи рідколіссі. Для локалізації використовують рельєф, річки, та інші перешкоди.

Пожежі в Чорнобильській зоні мають суттєві особливості та ускладнюють гасіння лісів порівняно з незабрудненими радіонуклідами, а саме: радіоактивне ураження пожежників; міграція радіонуклідів, збільшення зони забруднення; необхідність спеціального захисного одягу та спорядження; дезактивація людей та техніки після завершення робіт. Окрім високої температури на пожежників впливає дим і дрібнодисперсний пил у повітрі, що містить радіонукліди, тому захист органів дихання потребує особливої уваги. Розрахункова поглинена доза радіації для пожежника, який 24 години вдихав дим лісових пожеж, може перевищувати 5 мкЗв на день, тобто більш ніж у 2000 разів дозу радіації від фонові радіоактивності в приземному повітрі, та є вища, ніж доза від вдихання ^{210}Po курцем. Тривалий період посилює вдихання радіонуклідів з димом. Через високу радіотоксичність α -радіонуклідів, зокрема ^{210}Po , потрібен захист органів дихання [58].

Внутрішні стінки боксів, що використовуються на ядерних установках, можуть бути забруднені радіоактивними аерозолями. Тому необхідно мати можливість передбачити швидкість вивільнення аерозолів при пожежі. Результати показують, що існує незначна взаємодія між двома видами аерозолів. Швидкість вивільнення CeO_2 добре корелює зі швидкістю потоку горіння. Масштабні експерименти з кількома кілограмами оргскла, підтверджують це [59].

В активній фазі пожежі концентрації радіонуклідів у повітрі зростають на кілька порядків відносно фонового значення. Додаткове наземне забруднення внаслідок лісової пожежі можна оцінити як значення в діапазоні 10^{-4} – 10^{-5} від його фонового значення. Відповідно до рекомендацій Міжнародної комісії з радіологічного захисту, для розрахунку ефективної еквівалентної дози для пожежників застосована модель дихальних шляхів людини [60]. Під час лісових пожеж утворюється небезпечний дим, що переноситься повітрям і який потенційно може переносити радіоактивний матеріал. Тому пожежі у забруднених радіонуклідами лісах є гострою проблемою, яка потребує негайної уваги через ризики для здоров'я пожежників і громад, які постраждають від диму [61].

У [62] відображено вплив лісової пожежі на якість повітря у випадку радіологічного викиду попелу від лісових пожеж у провінції Ріау під час сезону

інтенсивних лісових пожеж, що стався у 2015 р. Зразки атмосферного аерозолі збирали з травня по грудень 2015 р. Концентрації радіонуклідів ^{226}Ra , ^{232}Th і ^{40}K у твердих частинках у повітрі коливалися від 0,026 до 0,114 мБк/м³, від 0,005 до 0,011 мБк/м³ і від 0,99 до 5,64 мБк/м³ відповідно. Концентрація активності ^{137}Cs у повітрі виявилася нижчою за мінімальну активність, яку можна виявити системами γ -лічильника, за винятком липня та вересня 2015 р. Встановлено, що дим від лісових пожеж містить радіоактивні частки, які можуть становити небезпеку для здоров'я.

Потенціал виникнення великих пожеж у Чорнобильській зоні оцінювався на основі умов рослинності. Вивчено склад радіонуклідів у ґрунті та рослинності та твердих частках, що викидаються внаслідок пожеж. Найвищі рівні радіонуклідів ^{137}Cs в атмосфері спостерігалися ранньою весною та пізньою осінню, що відповідає найбільш інтенсивним періодам горіння. Із супутникових знімків видно, що стовпи диму розійшлися на кілька сотень кілометрів від активних пожеж і досягли великого мегаполісу [63]. Інтенсивні пожежі 2002, 2008 і 2010 рр. у Чорнобильській зоні призвели до витіснення ^{137}Cs на південь; загальна кількість ^{137}Cs , що повторно відкладалася в Європі, була еквівалентна 8% від кількості, що відкладалася після початкової аварії на ЧАЕС. Прогнозоване розширення легкозаймистої території, пов'язане зі зміною клімату, призведе до високого ризику радіоактивного забруднення з характерними піками пожежі в майбутньому [64].

У травні 2000 р. на півночі Нью-Мексико сталася велика лісова пожежа Серро-Гранде, яка спустошила місто Лос-Аламос і завдала шкоди Національній лабораторії Лос-Аламоса. Щоб оцінити потенційний вплив на здоров'я вдихання радіонуклідів, що містяться в диму цієї пожежі досліджено ефективність осадження в дихальних шляхах диму від лісової пожежі в повітрі для людей різного віку. Досліджено вплив диму на лісових пожежників, які перебували на вулиці, де концентрація диму була набагато вищою, ніж у будинках. Радіонукліди, викинуті зовні лабораторії через пожежу, були обмежені радіонуклідами природного походження від згоряння рослинності. Дози опромінення від вдихання радіонуклідів з повітрям у Лос-Аламосі і за його межами були дуже малими [65].

У [66] оцінено опромінення, отримане пожежними, які брали участь у гасінні масштабних лісових пожеж на найбільш забруднених територіях Чорнобильської зони у 2016 і 2020 рр. Оцінки базуються на вимірюваннях концентрацій радіонуклідів у повітрі, в зонах дихання працівників і на пунктах відбору проб аерозолів. Під час лісових пожеж концентрації радіонуклідів у повітрі зросли на порядки порівняно з фоновими рівнями, досягаючи максимумів у зоні гасіння $1,20 \pm 0,01$ Бк м⁻³ для ⁹⁰Sr, $0,18 \pm 0,01$ Бк м⁻³ для ¹³⁷Cs, $(1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$ Бк м⁻³ для ²³⁸Pu, $(4,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$ Бк м⁻³ для ²³⁹⁻²⁴⁰Pu і $(8,0 \pm 1,3) \cdot 10^{-3}$ Бк м⁻³ для ²⁴¹Pu. Внутрішні ефективні дози опромінення внаслідок вдихання радіонуклідів не перевищували 2 мкЗв год⁻¹ і були в 3–5 разів нижчими від зовнішньої дози γ-опромінення. Тому час гасіння пожежі в зоні слід обмежити дозою зовнішнього опромінення.

Для прогнозування процесів поширення лісової пожежі та прийняття управлінських рішень щодо її гасіння, евакуації населення, залучення сил і засобів застосовують моделювання. Моделі лісових пожеж поділяють на аналітичні та імітаційні і стосуються поширення пожеж шаром горючого матеріалу рослинного походження з урахуванням різних чинників (вітру, рельєфу, температури, вологості, опадів та ін.). Відомі є моделі процесів запобігання поширенню горіння.

У [67] розроблено математичну модель створення хімічної вогнезахисної смуги і розрахунок на її підставі часу створення вогнезахисної смуги для гасіння низових лісових пожеж за допомогою гелеутворюючої системи (5%) Na₂O • 2,7SiO₂ + (35%) CaCl₂ роздільно-послідовним способом нанесення компонентів. У іншій праці [68] проведено математичне моделювання поширювання пожежі горючим матеріалом на поверхні з рельєфом, описаною відповідною функцією, в якій за наведеним методом можна визначати напрямок і швидкість поширювання фронту пожежі. Визначено, що швидкість поширювання фронту пожежі залежить від ухилу поверхні та швидкості вітру й описується математичною моделлю, яка добре узгоджується з результатами експериментальних досліджень. Моделювання гасіння лісових пожеж методом зрошення за допомогою водної завіси здійснюється з різних ракурсів, зокрема із взаємозв'язком лісових пожеж із змінами клімату, розвитком рослинності та людством і можливістю визначення вразливих регіонів і

прогнозування [7], обґрунтування життєздатності співвідношень шкали Гескестада для взаємодії бризок водяної завіси за умови високого числа Рейнольдса ($10 \leq Re \leq 500$) на основі моделювання Фруда для великомасштабного моделювання локалізації або пожежогасіння за допомогою водяної завіси [69]. Є праці, присвячені цьому питанню і у будівлях. Зокрема, дослідники приділили увагу моделюванню гасіння пожеж у приміщеннях шляхом опадів за допомогою водяної завіси за різних умов (тиск води, розташування горючої речовини) з доведенням нижчого споживання води завісою порівняно з спринклерною системою [70].

Предметом досліджень є також моделювання розвитку тліючих пожеж і ліквідації їх водною завісою, наприклад, торф'яних пожеж в залежності від інтенсивності розпилення води (відстані між вогнищем і поверхнею торфу), що показало вплив гранулометричного складу і проникності торфу на поширення тліючого фронту горіння і безперспективність короточасного гасіння торф'яних пожеж [71], а також пожежі у підземних вугільних шахтах для трьох видів вугілля з різними рангами та розмірами вугільних частинок, які довели, що вміст вологи є домінуючим фактором у поширенні температури тління та окислення вугілля [72].

Отже, гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах потребує врахування та запобігання можливості радіоактивного ураження залучених осіб. Моделювання процесів поширення пожеж та їх ліквідації дає змогу оцінити поширення вогню і локалізацію внаслідок застосування засобів та способів гасіння.

1.4. небезпека іонізуючого випромінювання та захист пожежників в умовах лісових пожеж

Будь-яке іонізуюче випромінювання, як за зовнішнього, так і внутрішнього опромінення, коли радіонукліди потрапляють в організм, викликає біологічні зміни в ньому. Біологічна дія іонізуючого випромінювання залежить від дози, часу опромінення, виду та енергії радіоактивного випромінювання, розмірів опроміненої поверхні та індивідуальних властивостей організму. Іонізуючі випромінювання, як правило, шкідливі та потенційно смертельні для живих організмів. Найпоширенішою дією є провокування раку з латентним періодом в

роки або і десятиліття після опромінення. Високі дози можуть викликати радіаційні опіки і навіть швидко загибель людини через гострий радіаційний синдром [73].

Доза зовнішнього опромінення формується (більш ніж 99 %) за рахунок γ -випромінювання, що містяться у підстилці, деревостані та верхньому мінеральному шарі ґрунту. У підстилці соснових лісів може міститися до 50 % активності ^{137}Cs та ^{90}Sr від загального запасу в лісах. Найбільшу здатність до утримання радіонуклідів (до 50 % активності) мають потужні підстилки хвойних лісів, а мінімальної – малопотужні підстилки листяних лісів (менше 1 %). На даний час більше 75 % радіонуклідів у лісовій підстилці зони відчуження зосереджено у шарі, що межує з мінеральним шаром ґрунту, що розклався або напіврозклався [74].

Після відкриття явища радіоактивності й упродовж багатьох років головним індикатором впливу на людину вважалося почервоніння шкіри. До 50-х років XX ст. чинником її впливу на організм людини вважали пряме радіаційне ураження шкіри, кісткового мозку, центральної нервової системи, шлункового тракту. Однак одним з найбільших ефектів опромінення живих організмів, у тому числі й людини, є руйнування молекул білка і утворення нових, нехарактерних цим організмам молекул. У разі сильної дії радіації на організм людини розвивається лейкоз або лейкемія [75]. За малих доз радіації небезпека раку молочної і щитовидної залоз. Рак інших органів і тканин виникає рідше. Навіть найменша доза збільшує імовірність захворіти, а додаткова – суттєво збільшує таку вірогідність. Найгіршим для людини є радіаційні порушення (генні, хромосомні і геномні мутації) [75]. Перелік наслідків дії іонізуючого випромінювання на людину постійно зростає: гостра променева хвороба; хвороби крові; злоякісні новоутворення органів; порушення генетичного коду; ураження нервової системи, кровоносних та лімфатичних судин; пошкодження органів зору; порушення обміну речовин та ендокринної рівноваги; стерильність та імпотенція; імунодефіцит, звичайні захворювання; порушення психічного і розумового розвитку, старіння організму.

Окрім зовнішнього опромінення людини, небезпеку становить і внутрішнє опромінення радіонуклідами, що надійшли з їжею, водою, атмосферним повітрям, або через пошкоджену шкіру. На забрудненій радіонуклідами місцевості кожен

рятувальник повинен мати індивідуальний дозиметр, спеціальний одяг і взуття, засоби захисту органів дихання. Організовується контроль за станом забруднення одягу, техніки та обладнання. До початку роботи керівник гасіння пожежі проводить інструктажі і за наявними показниками опромінення корегує час роботи, щоб межа дози не перевищила 20 мЗв [76]. Після завершення гасіння перевіряє рівні радіації особового складу, техніки та скеровує до пункту санітарної обробки для дезактивації та визначення рівня радіаційного забруднення [77].

Стан пожежної безпеки на землях лісового фонду, які зазнали радіаційного впливу, є найбільш загрозливим. Тому необхідно посилення належного рівня взаємодії відповідних служб з організації охорони лісів від пожеж на радіаційно небезпечних землях України. Проведено ґрунтовний аналіз законодавства України та особливостей правового забезпечення охорони лісів від пожеж [78].

Згідно з висновками [79] рекомендовано концепцію відповідно до теорії зонування, яка фрагментує ліси з високим ризиком пожеж для обмеження агресії вогню. З її урахуванням рекомендована безпечна мережа смуг із гнучкою шириною від 30 до 70 м. Цю мережу безпеки можна доповнити визначеною сіткою мережі водяного туману з можливістю зволоження приблизно 100 м іншої зони із застосуванням мобільної спринклерної системи. Для населених пунктів, місць для кемпінгу, запропоновано безпечний кордон, щоб ізолювати ці території від лісу.

Проведене дослідження захисних панелей [80], щоб визначити, чи буде захисний матеріал більш доцільним. Враховуючи вогнестійкість, теплові й структурні властивості та вартість, обрані панелі, армовані скловолокном оксиду магнію. Захист встановлений на телекомунікаційній шафі та експериментально лабораторно перевірений в аеродинамічній трубі. Експериментальні дані показують, що недорогий захист є ефективним для захисту телекомунікаційних шаф і подібної інфраструктури від лісових пожеж.

За результатами опитування 1122 пожежників у трьох протипожежних департаментах префектури Нагасакі, де немає АЕС виявлено, що 39% опитаних відповіли, що їм не складе труднощів прийняти участь у групі реагування на

радіаційні катастрофи. Ця група також включала значно вищий відсоток учасників, які впевнені щодо безпечного реагування на радіаційну катастрофу [81].

Пожежники в дикій місцевості зазвичай піддаються впливу вогню під час близькості до джерела пожежі. Однак із гасінням пожежі пов'язано кілька інших ризиків. У повітрі наявний широкий спектр канцерогенних поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) з диму [82]. Неповне згоряння природного матеріалу може призвести до утворення чадного газу (СО) [83]. У багатьох випадках вплив як ПАВ, так і СО може бути смертельним. Інші забруднювачі включають оксид азоту, тверді частинки, альдегіди та ін.

Пожежники в дикій місцевості носять одяг, який складається лише з зовнішнього шару для захисту від випромінювання та полум'я, і підтримки прохолодної температури, оскільки вони повинні працювати довгі години. Поточні конструкції в деяких місцях складаються з двох-чотирьох шарів для досягнення вимог до продуктивності та комфорту [84]. Система одягу, яка використовується для гасіння пожеж у природі, може бути піддана впливу зовнішніх умов від абсолютно сухого до повністю вологого. Тому доцільно розробити більш складні системи одягу, які будуть пристосовані до будь-яких умов вологості та середовищ.

Під час гасіння пожежі комбінований вплив променистого тепла та полум'я призводить до передачі теплової енергії через тканину і може спричинити опіки шкіри. Одяг має мати достатньо високий термічний опір для захисту від тепла. На гасіння пожеж впливають температура середовища, швидкість вітру, теплове випромінювання та вологість. Зовнішні джерела тепла (вогонь або сонце), можуть спричинити перегрів. Тому одяг має забезпечувати ізоляцію від зовнішнього джерела та відведення внутрішнього тепла. Балансу досягають вибором відповідного матеріалу і конструкції для випаровуванню поту та вентиляції [85].

У процесі гасіння пожеж пожежне взуття є одним із найважливіших засобів індивідуального захисту стоп і ніг пожежників від теплового ураження. Із збільшенням інтенсивності випромінювання температура всередині або зовні підвищується, а твердість і маса пожежних черевиків зменшуються. Час опіку шкіри другого ступеня при 7 кВт/м^2 становить 166 с. За однакової інтенсивності

випромінювання звідусіль перепади температури чобіт більші, а максимальна температура бокової внутрішньої поверхні в 1,9 рази вища, ніж передньої [86].

Високі хімічно стійкі захисні черевики Tucheм C можуть забезпечити захист від радіоактивних матеріалів для спеціалізованих гумових черевиків. Разом зі спецодягом Tucheм C вони являють собою спорядження як мінімум типу 3, що забезпечує захист від хімічних факторів. Вони забезпечують захист від радіоактивних часток або рідин, обмежуючи проникнення радіоактивних матеріалів, щоб мінімізувати їх контакт зі шкірою та взуттям під протекторами, як і спеціальний одяг Tucheм C. Одяг захищає пожежників у потенційно забруднених зонах, але сам по собі не блокує іонізуюче випромінювання [87].

Мірою довговічності захисного одягу пожежника є радіаційна захисна ефективність, на яку впливають такі властивості, як товщина, площа поверхні та поверхнева щільність тканини зовнішньої оболонки в багатошарових комплектах. Розглядалися чотири незалежні змінні: матеріал тканини, щільність підбору, цикли впливу та інтенсивність теплового потоку. Регресійний аналіз остаточно встановив, що щільність підбору суттєво впливає на ефективність зовнішньої оболонки [88]. У [89] радіаційний тепловий потік 21 кВт/м^2 змодельований тестером радіаційних захисних характеристик. Всього обрано 12 сценаріїв з різною частотою та тривалістю впливу. Міцність на розрив зменшувалася зі збільшенням частоти впливу з тією ж індивідуальною тривалістю. Тому під час вибору та обслуговування захисного одягу слід враховувати вплив частоти опромінення та індивідуальної тривалості на міцність на розрив. Проведено дослідження щодо важливості властивостей одягу, рівня активності та інших зовнішніх параметрів для уникнення перегріву. Окрім покращення властивостей індивідуального захисного одягу, безпека пожежників пов'язана з належним контролем часу впливу інтенсивних потоків тепла [90]. Охолоджувальні жилети ефективно підвищили тепловий комфорт під час експериментів. Між їх використанням і контрольною групою максимальна різниця теплового комфорту становила 0,67 через 50 хв. Через 90 хв жилети призвели до максимального зниження індексу фізіологічного напруження на 0,77 і сприйнятого напруження на 32% [91].

Отже, іонізуюче випромінювання, теплові потоки та продукти горіння під час лісової пожежі становлять загрозу для пожежників, що вимагає застосовувати відповідний захисний одяг, взуття і засоби захисту органів дихання, які ослаблюють дію небезпечних чинників пожежі та радіоактивного випромінювання.

1.5. Висновки до Розділу 1

1. Проблема пожежної безпеки лісів – одна з найскладніших, що вирішуються працівниками лісового господарства, на яких покладено ці функції. У випадку виникнення пожеж вони їх ліквідовують, залучаючи ДСНС України. Особливо напруженою є ситуація з пожежами у зоні бойових дій.

2. Гостро постає питання гасіння пожеж в Чорнобильській зоні, які регулярно виникають у зонах радіаційного забруднення і є найбільш небезпечним явищем у лісах на цій території. Дослідження поширення забруднень радіонуклідами на територіях описані у багатьох працях та свідчать про значну проблему для людей.

3. Значна кількість досліджень присвячена питанням вивчення процесів виникнення, розвитку, прогнозування поширення та негативного впливу на навколишнє середовище пожеж в екосистемах, що зазнали радіоактивного забруднення, зокрема: визначення екологічної та радіаційної обстановки під впливом інтенсивності та напрямку міграції радіоактивних продуктів згоряння, оцінки екологічного впливу негативних факторів лісової пожежі в комплексних радіаційних умовах, моделювання розсіювання та осадження радіоактивних матеріалів на землі та їх впливу на визначення площі та масштабу реагування.

4. Актуальним завданням є захист пожежників під час гасіння лісових пожеж у радіоактивно забруднених лісах від радіації та теплового випромінювання, який потребує спеціального захисного одягу, взуття, а також захисту органів дихання.

5. Незважаючи на наявні дослідження, розробка протипожежного обладнання для аерозольного, пилового та поверхневого зрошення, яке можна застосовувати для гасіння пожеж в екосистемах, особливо тих, що зазнали радіоактивного або хімічного забруднення, залишається актуальним завданням.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖ У РАДІАЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ЛІСОВИХ ЗОНАХ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ ГАСІННЯ

В процесі досліджень використовували різноманітні методи, 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, математичних та статистичних методів – для аналізу результатів експериментальних досліджень.

2.1. Методи дослідження ефективності використання протипожежного обладнання

Оцінювання ефективності використання протипожежного обладнання та техніки з урахуванням різноманітних чинників здійснювали таксономічним методом з використанням інтегральних показників [92, 93]. Суть методу полягає у виборі показників та обчисленні інтегральних показників. Для цього спочатку потрібно вибрати показники x_{ij} , де i – номер об'єкта (пристрою, обладнання), j – номер показника, та сформувати з них матрицю

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ & \cdots & \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

розміру $n \times m$, де n – кількість об'єктів, m – кількість показників. У зв'язку з тим, що показники можуть мати різну природу, потрібно перейти до матриці

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1m} \\ & \cdots & \\ z_{n1} & \cdots & z_{nm} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

стандартизованих показників, елементи якої обчислюють за формулою

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}, \quad (2.3)$$

де $\bar{x}_j$ – середнє значення показника з номером j , σ_j – його середньоквадратичне відхилення, які знаходять за формулами

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n}, \quad (2.4)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{n}}. \quad (2.5)$$

Після формування матриці Z визначаємо точку еталону $P_0(z_{01}, z_{02}, \dots, z_{0m})$, координати якої залежно від того, чи показник буде максимізувати ефективність чи мінімізувати, визначаються, відповідно, за формулами

$$z_{0k} = \max_{1 \leq i \leq n} z_{ik}, k \in I, \quad (2.6)$$

$$z_{0k} = \min_{1 \leq i \leq n} z_{ik}, k \notin I, \quad (2.7)$$

де I – множина показників, які максимізують ефективність, $1 \leq k \leq m$.

Для отриманих координат точки P_0 знаходимо евклідові відстані від цієї точки до точок, які характеризують об'єкт i , $1 \leq i \leq n$, за формулою

$$C_{i0} = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_{0j})^2}. \quad (2.8)$$

Обчислення інтегральних показників для кожного з n об'єктів здійснюємо за формулою

$$d_i = 1 - \frac{C_{i0}}{C_0}, \quad (2.9)$$

де

$$C_0 = \overline{C_0} + 2S_0, \quad (2.10)$$

$$\overline{C_0} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{i0}}{n}, \quad (2.11)$$

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{i0} - \overline{C_0})^2}{n}}. \quad (2.12)$$

За величиною отриманих інтегральних показників оцінюють загальну ефективність об'єктів.

2.2. Теоретичні методи дослідження процесів поширення та локалізації лісових пожеж

Оскільки експериментальні дослідження лісових пожеж є небезпечними, особливо на забруднених радіонуклідами територіях, тому теоретичні дослідження процесів поширення та локалізації лісової пожежі на забруднених радіонуклідами територіях проводили методом математичного моделювання з урахуванням удосконаленої моделі Ротермелла [95], а також інших існуючих моделей поширення лісової пожежі [96-98], найпоширенішою з яких є еліптична модель [99,

100], та з урахуванням прийняття управлінських рішень керівником гасіння пожежі [101].

2.3. Методи дослідження пристрою створення водяної завіси

Дослідження ефективності розробленого пристрою створення водяної завіси здійснювали на стенді, який імітував роботу пожежної машини (рис. 2.1), основним елементом якого є насосний агрегат, 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 [94].

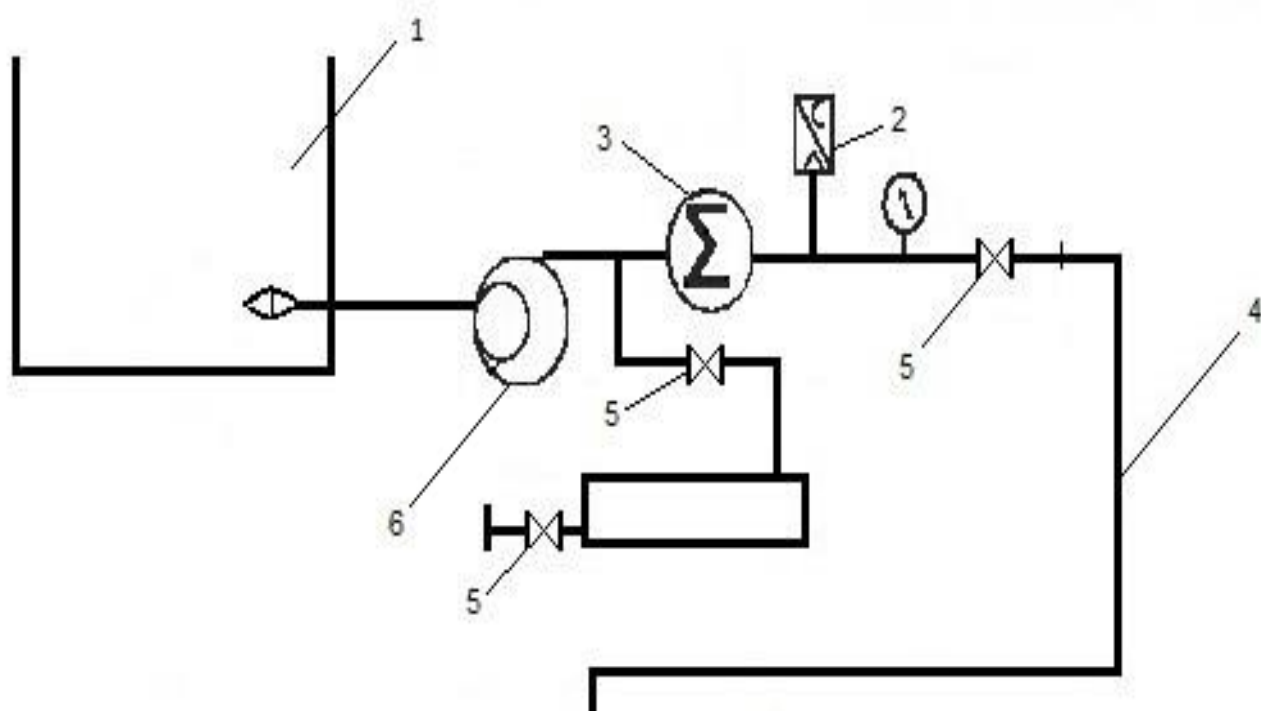


Рисунок 2.1 – Загальна схема експериментального стенду:

- 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.

Насосний агрегат (рис. 2.2) через гідравлічну систему (витратомір, датчик тиску, напірні трубопроводи) підключається до струменеутворювального сопла. Управління електродвигуном здійснювалося за допомогою перетворювача частоти Danfos VLT 6000 HVAC, що дозволяє отримати необхідне значення тиску рідини.

Для отримання даних витрати використаний електромагнітний перетворювач витрати рідини СДМ-1, який здатний працювати в діапазоні потоку від 0,26 до 65 м³/год (0,07-18 л/с), другого класу точності, граничне значення відносної похибки при витраті від 0,65 м³/год (0,18 л/с) становить 2%.

Для вимірювання тиску використовувався аналоговий датчик тиску НК1100С з межею вимірювання 1,2 МПа. Відносна похибка при температурі навколишнього повітря від +15 до +50 °С становить 1,5%.



Рисунок 2.2 – Насосний агрегат експериментального стенду

Для вимірювання тиску використовувався аналоговий датчик тиску НК1100С з межею вимірювання 1,2 МПа. Відносна похибка при температурі навколишнього повітря від +15 до +50 °С становить 1,5%.

Обробка сигналу датчика реалізована за допомогою плати Arduino Mega 2560 – на базі мікроконтролера ATmega2560. Він має цифрові входи / виходи та входи аналогового сигналу. Виведення інформації реалізовано на дисплей з рідкокристалічною клавіатурою shield 1602. Також є можливість виводити інформацію в режимі реального часу на комп'ютер через USB-порт. Для цього використовувався плагін PLX-DAQ для Microsoft Excel.

2.4. Методи дослідження ефективності використання пристрою для орієнтації в умовах обмеженої видимості

Дослідження ефективності використання запропонованого пристрою для орієнтації в умовах обмеженої видимості проводили експериментальним методом на базі теплодимокамери Навчально-тренувального комплексу навчальної пожежно-рятувальної частини на території Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України.

До проведення досліджень залучалися курсанти, з яких формували ланки для роботи у задимленому середовищі. Ланки склалися з трьох чоловік, які виконували однакове завдання з використанням пристрою та без нього.

Курсанти використовували захисний одяг та ізолюючі протигази для захисту органів дихання. Дії ланок контролювалися з використанням обладнання теплодимокамери.

Оцінювання ефективності здійснювали за часом виконання завдань. Аналіз результатів експериментальних досліджень проводили з використанням методів математичної статистики.

2.5. Висновки до Розділу 2

Обрані методи досліджень, прилади та обладнання дають змогу досягти мети та вирішити поставлені завдання досліджень роботи.

1. Таксономічний метод оцінювання ефективності використання протипожежного обладнання та техніки, який базується на обчисленні інтегральних показників дає можливість порівняти протипожежне обладнання та техніку з урахуванням тактико-технічних характеристик та їх впливу на процеси гасіння пожеж.

2. Теоретичні методи дослідження процесів поширення лісових пожеж на радіаційно забруднених територіях полягають у створенні математичної моделі, яка дає можливість оцінити поширення пожежі та її локалізацію з урахуванням дії сил та засобів пожежогасіння.

3. Методи дослідження ефективності пристрою створення водяної завіси дають можливість перевірити його роботу у різних режимах на стенді та отримати інформацію у цифровому вигляді.

4. Експериментальні методи дослідження використання запропонованого пристрою для орієнтації в умовах обмеженої видимості на базі тепловидомокамери та статистичні методи обробки інформації дають можливість оцінити ефективність його застосування в умовах обмеженої видимості для гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах.

РОЗДІЛ 3

ГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

НА ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ТЕРИТОРІЯХ

Гасіння лісових пожеж на територіях, що забруднені радіонуклідами, має особливості, які потрібно враховувати керівникам гасіння пожежі та пожежникам-рятувальникам. Радіоактивне забруднення може поширюватися повітрям разом з продуктами горіння, пилом, а також проникати у водне середовище та ґрунти, завдаючи значної шкоди навколишньому середовищу. Особливу небезпеку становить наявність радіонуклідів у повітрі, яке може поширитися далеко за межі зони горіння. Конвективні потоки, що виникають під час пожежі, сприяють переміщенню продуктів горіння та пилу на значні відстані, що у випадку виникнення пожеж у радіоактивно забруднених екосистемах, зокрема у Чорнобильській зоні, може сприяти поширенню радіонуклідів та становити значну небезпеку для учасників гасіння таких пожеж.

Пил та продукти горіння потрапляють на одяг та відкриті ділянки тіла рятувальників, а також в органи дихання. У зв'язку з цим гасіння пожеж в умовах радіоактивного забруднення має здійснюватися з урахуванням цих чинників та відрізнятися від аналогічної діяльності у незабруднених радіацією лісах. Основним завданням є не лише надійний захист залученого до пожежогасіння персоналу від радіації, але й зменшення часу його перебування за рахунок використання більш ефективних засобів пожежогасіння та протипожежної техніки, а також управлінських рішень з цих питань.

Ручний протипожежний інвентар, який часто застосовується під час гасіння лісових пожеж, зокрема, хлопавки, лопати, відра, сокири і т.п., є не завжди доцільним в умовах радіоактивного забруднення через не завжди високу ефективність, потребу значного фізичного навантаження під час використання, перебування пожежників поблизу осередків горіння, що здійснюють викиди в атмосферу у вигляді конвективних потоків продуктів горіння з вмістом радіонуклідів. Тому основну увагу потрібно зосереджувати на обладнанні та

способи гасіння, які забезпечують віддаленість осіб, які гасять пожежу, від її осередку, меншу запиленість повітря та більшу ефективність.

3.1. Обладнання для гасіння лісових пожеж в умовах радіоактивного забруднення та його ефективність

Гасіння лісових пожеж традиційно здійснюють поданням струменя до осередку займання, застосовуючи відповідну протипожежну техніку та обладнання.

Формування струменів здійснює пожежний ствол – пристрій, який встановлюється на виході напірної рукавної лінії, призначений для формування, спрямування та (або) регулювання струменя вогнегасної речовини. Стволи за призначенням поділяють на водяні та водопінні, а залежно від пропускної здатності та розмірів – на переносні та лафетні.

Водяний пожежний ствол-розпилювач – водяний ствол, призначений для застосовування розпиленого струменя вогнегасної речовини.

Водяний пожежний ствол багатоцільового призначення – водяний ствол, призначений для застосовування як розпиленого, так і суцільного струменя вогнегасної речовини.

Стволи залежно від конструкційних особливостей і основних параметрів класифікуються на:

- стволи нормального тиску (0,4 до 0,6 МПа);
- стволи високого тиску (2,0 до 3,0 МПа).

Компактний (суцільний) струмінь, який має більшу дальність, дає змогу збільшити відстань від пожежного-рятувальника до полум'я та зони конвективних потоків, що містять радіоактивні елементи.

Якщо гасіння проводять на малих відстанях, тоді більш доцільно застосовувати розпилений струмінь, що дасть змогу збільшити площу зрошення та осадження радіоактивних елементів. Розпилені струмені загалом є ефективними для гасіння пожеж у лісах. Це підтверджують результати дослідження [102], які базуються на обширному огляді літератури, проведеному інженерною групою

протипожежної безпеки Единбурзького університету та спонсорованою групою дослідження та розвитку протипожежної безпеки Великобританії, і встановили поточний стан техніки щодо використання водяних розпилювачів для придушення та гасіння типових (класу «А») пожеж.

Найпоширеніші переносні пожежні стволи, які можуть формувати суцільний та розпилений струмені та використовуються у підрозділах ОРСЦЗ ДСНС України [103], наведені на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Переносні пожежні стволи [103, 140]:

а – РСП-50; б – РСП-70; в – РС-Ам; г – РС-Бм;

ґ – СРК-50; д – РСК-50; е – Protec366

У таблиці 3.1 наведено основні тактико-технічні характеристики водяних переносних пожежних стволів.

Таблиця 3.1 – Тактико-технічні характеристики водяних переносних пожежних стволів [103, 138, 139, 140]

Показники	Вид ствола					
	РСП-50	РСП-70	РС-Ам	РС-Бм	СРК-50	РСК-50
1	2	3	4	5	6	7
Діаметр насадка, мм	12	19	-	-	2	12
Витрата води при напорі на стволі 0,4 МПа:						
- суцільного струменя, л/с	2,7	7,4	6,0	2,5	2,7	2,7
- розпиленого струменя, л/с	2,0	7,0	7,0	3,5	2,7	2,0
- захисної завіси, л/с	-	-	7,0	3,5	-	-
Дальність струменя при напорі на стволі 0,4 МПа:						
- суцільного струменя, м	30	32	28	25	30	30
- розпиленого струменя, м	11	9	10-12	8-10	12	11
Кут факела захисної завіси, град.	40	40	30-90	30-90	25-60	40-70
З'єднувальна арматура ствола	ГМН-50	ГМН- 70	ГМН- 70	ГМН- 50	ГМН-50	ГМН- 50
Маса ствола, кг	1,45	2,8	1,25	1,1	1,8	1,95

Для вибору найбільш ефективного ствола, який подає суцільний струмінь, використаємо таксономічний метод. Для оцінювання виберемо показники, які

визначають ефективність використання стволів в умовах лісової пожежі у забруднених радіонуклідами лісах: витрата води (мінімум), дальність струменя (максимум) та маса ствола (мінімум). Скориставшись таксономічним методом і врахувавши, що ефективність використання відповідного пожежно-технічного обладнання зростає із зростанням дальності та зменшенням витрати води та маси, отримуємо інтегральні показники ефективності водяних переносних пожежних стволів щодо подання суцільного струменя (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Інтегральні показники ефективності водяних переносних пожежних стволів щодо подання суцільного струменя

Показники	Вид ствола					
	РСП-50	РСП-70	РС-Ам	РС-Бм	СРК-50	РСК-50
Інтегральний показник	0,75	0,07	0,42	0,29	0,63	0,58

Як видно з таблиці 3.2, найбільшу ефективність для гасіння лісових пожеж суцільним струменем має водяний переносний пожежний ствол РСП-50, за ним у порядку спадання ефективності йдуть стволи СРК-50, РСК-50, РС-Ам, РС-Бм та РСП-70.

Аналогічно за таксономічним методом оцінімо ефективність цих стволів для гасіння розпиленним струменем. Беручи до уваги, що ефективність гасіння зростатиме із збільшенням дальності, зменшенням витрати і маси, отримуємо інтегральні показники ефективності гасіння лісової пожежі з використанням водяних переносних пожежних стволів щодо подання розпиленого струменя (таблиця 3.3).

Провівши відповідні розрахунки, отримуємо подібний до наведеного у таблиці 3.2 результат щодо інтегральної ефективності гасіння цих пожежних стволів, але з використанням розпиленого струменя.

Таблиця 3.3 – Інтегральні показники ефективності водяних переносних пожежних стволів щодо подання розпиленого струменя

Показники	Вид ствола					
	РСП-50	РСП-70	РС-Ам	РС-Бм	СРК-50	РСК-50
Інтегральний показник	0,76	-0,03	0,49	0,57	0,72	0,61

Найбільшу ефективність має ствол РСП-50, за ним у порядку спадання ефективності йдуть СРК-50, РСК-50, РС-Бм, РС-Ам та РСП-70. Результати у порівнянні з компактним струменем різняться незначно – порядком слідування за спаданням ефективності РС-Ам і РС-Бм.

Наведені в таблиці 3.1 характеристики дозволяють оцінити площу поверхні, яка може бути зрошена розпиленням струменем кожного із стволів. Для розрахунків застосуємо формулу:

$$S_{\text{зрош}} = \frac{\alpha \pi l^2}{360^\circ}, \quad (3.1)$$

де α – кут факела захисної завіси, град., l – дальність розпиленого струменя, м.

Важливою характеристикою пожежно-технічного обладнання, що використовується для формування розпиленого струменя є площа поверхні зрошення. Для основних типів пожежних стволів площі поверхні зрошення при напорі на стволі 0,4 МПа, максимальному куті факела захисної завіси та максимальній дальності розпиленого струменя представлені в таблиці 3.4.

Найбільшої площі зрошення можна досягти з допомогою ствола РС-Ам, дещо меншої – стволами РС-Бм, СРК-50 і РСК-50. При їх використанні для зрошення слід врахувати, що для забезпечення необхідної інтенсивності гасіння може виникнути необхідність використовувати й інші стволи, які формують компактний струмінь, що зумовить додаткову потребу в людських ресурсах, обладнанні та збільшить витрату води.

Таблиця 3.4 – Максимальна площа поверхні зрошення при подачі розпиленого струменя [139]

Вид ствола	РСП-50	РСП-70	РС-Ам	РС-Бм	СРК-50	РСК-50
Площа поверхні зрошення при напорі на стволі 0,4 МПа, максимальному куті факела захисної завіси та максимальній дальності розпиленого струменя, м ²	42,2	28,3	113,0	78,5	75,4	73,9

Для зменшення зони поширення радіоактивних елементів, їх потрапляння в повітря та захисту від них пожежного-рятувальника під час пожеж у забруднених радіонуклідами лісах часто застосовують струмені розпиленої води, що мають меншу дальність подачі, проте є ефективними під час гасіння низових пожеж низької і середньої інтенсивності. Під час гасіння низових пожеж високої інтенсивності та верхових їх, як правило, не застосовують через невелику дальність.

Відомо, що заходи, пов'язані з осадженням радіоактивних хмар, пилу та аерозолів під час пожеж у лісовій місцевості (переважно низових), в зоні радіоактивного забруднення, реалізують саме за допомогою розпиленних струменів, що формуються традиційним, наявним в підрозділах Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ДСНС України пожежно-технічним обладнанням – вітчизняним та закордонними переносними пожежними стволами, турбінними та щілинними розпилювачами, які можна застосовувати безпосередньо під час проведення заходів, пов'язаних з ліквідацією пожеж. Перспективними та корисними для цих заходів можуть бути і дрібнорозпилені струмені, які описані в роботі [104], де розглядаються способи формування дрібних спреїв і основні результати деяких прикладів їх застосування. Було виявлено кілька несподіваних

позитивних результатів, особливо щодо використання тонкодисперсного туману, який може бути ефективним для захисту від радіоактивного пилу і продуктів горіння під час лісової пожежі.

В останні роки в Україні набувають широкого використання комбіновані стволи Protec, які є доволі універсальними, проте мало придатним для гасіння пожеж у природних екосистемах в умовах відсутності вододжерел та необхідності вирішення потреб водопостачання шляхом прокладання магістральних ліній та організації підвезення води через значні номінальні напори – 0,7 МПа (таблиця 3.5). Проте за достатнього водозабезпечення вони можуть бути досить ефективними.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики комбінованих ручних пожежних стволів Protec [139]

Показники	Вид ствола		
	Protek-360	Protek-366	Protek-368
Дальність подачі води, м	32	46	59
Довжина ствола без головки, мм	210	250	300
Маса, кг	1,2	2,0	3,0
Обраний розхід, (л/с)	0,3 – 0,6 – 1,5 – 2,5	1,9 – 3,8 – 6,0 – 7,9	6,0 – 8,0 – 9,0 – 12,0 – 16,0
Номінальний тиск, бар (МПа)	7 (0,7)	7 (0,7)	7 (0,7)
Регульована форма струменя	від прямого струменя до розпиленого (120°)	від прямого струменя до розпиленого (110°)	від прямого струменя до розпиленого (110°)

За допомогою таксономічного методу визначимо найбільш ефективний для гасіння лісових пожеж ручний пожежний ствол Protek з урахуванням таких показників: максимальна витрата води (мінімум), дальність струменя (максимум), маса ствола (мінімум) та кут розпилення (максимум).

Провівши розрахунки, отримуємо інтегральні показники ефективності, які наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Інтегральні показники ефективності водяних переносних пожежних стволів Protek

Показники	Вид ствола		
	Protek-360	Protek-366	Protek-368
Інтегральний показник	0,62	0,71	0,46

Як видно з таблиці 3.4, найбільш ефективним є пожежний ствол Protek-366, дещо нижчим за ефективністю – Protek-360, а найменш ефективним з такого виду стволів є Protek-368.

Як уже зазначалося, у забруднених радіонуклідами лісах більш безпечним є пожежогасіння такими засобами, що дозволяють пожежникам перебувати на віддалі від осередків горіння. Особливо це актуально під час гасіння низових пожеж високої інтенсивності та верхових пожеж. Для гасіння на значних відстанях пожеж таких видів більш доцільно застосовувати лафетні стволи.

Загалом лафетні стволи є досить ефективними для гасіння верхових пожеж на значній відстані від полум'я. Вони дають змогу мінімізувати дію небезпечних чинників пожежі на пожежників, зокрема зменшити інтенсивність теплового потоку та перебувати у менш задимленому та запиленому середовищі, що містить радіонукліди.

Найпоширенішим у пожежно-рятувальних підрозділах є лафетний ствол ПЛС-П20, який залежно від діаметра насадки може сформувати струмінь довжиною 61-68 м (таблиця 3.7).

Таблиця 3.7 – Основні технічні характеристики лафетного ствола ПЛС-П20 [139]

Показники	Діаметр насадки, мм		
	22	28	32
Робочий тиск, МПа	6,0	6,0	6,0
Витрата по воді, л/с	19	23	30
Витрата по піні, м ³ /хв	-	12	-
Довжина струменя, м			
води	61	67	68
піни	-	32	-

Завдяки переоснащенню пожежно-рятувальних підрозділів сучасними пожежними автомобілями та обладнанням набувають поширення і лафетні стволи Protek. Основні тактико-технічні характеристики цих стволів наведені у таблиці 3.8.

Лафетні стволи Protek мають більші витрати по воді у порівнянні з ПЛС-П20. Проте вони можуть подавати не лише компактний, а й розпилений струмінь, що актуально для зрошування з метою осадження радіонуклідів в умовах лісових пожеж на забруднених територіях Чорнобильської зони. Окремі види, зокрема Protek Style 922, дозволяють здійснювати дистанційне керування ними, що дозволить пожежникам перебувати менше часу на відкритому просторі. Проте для цього потрібно електроживлення напругою 12/24 В. Більшість з лафетних стволів Protek мають можливість повороту по горизонталі на кут понад 180°, що дозволяє збільшити ширину зони гасіння.

Таблиця 3.8 – Основні технічні характеристики
водяних лафетних стволів Protek [103]

Показники	Protek Style 622-1	Protek Style 622-2	Protek Style 622-3	Protek Style 600	Protek Style 922
Тип ствола	перено- сний	перено- сний	стаціо- нарний	перено- сний	стаціо- нарний
Управління	ручне	ручне	ручне	ручне	дистан- ційне
Повороти по горизонталі, градуси	180	180	360	20	300
Повороти по вертикалі, градуси	80	80	80	60	135
Дальність подачі водяного струменя, м	65	65	65	60	50
Продуктивність, л/с	до 63	до 50	до 80	до 32	до 32
Форма струменя	від кумулятивного до розпиленого				
Розміри (ширина, глибина, висота), мм	-	-	-	610×380 ×230	216×203 ×280
Маса, кг	12,7	12,7	12,7	7	7,2
Робоча напруга, В	-	-	-	-	12/24

Дальність подачі водяного струменя для більшості таких стволів становить понад 60 м, за винятком Protek Style 922.

Ефективність лафетних стволів Protek оцінена таксономічним методом за інтегральними показниками (таблиця 3.9). Для розрахунку взято до уваги такі показники стволів: максимальна витрата води (мінімум), дальність струменя

(максимум), маса ствола (мінімум), кут повороту по вертикалі (максимум) та кут повороту по горизонталі (максимум).

Таблиця 3.9 – Інтегральні показники ефективності водяних лафетних стволів Protek

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

Як видно з таблиці, найбільш ефективним є лафетний ствол Protek Style 922, але його недоліком є електричне керування, що не завжди доцільне в умовах лісової пожежі та те, що він стаціонарний. Менш ефективними в порядку спадання інтегрального показника є Protek Style 622-2, Protek Style 622-1, Protek Style 622-3 та Protek Style 600. Основним недоліком лафетних стволів Protek є велика витрата води, яку не завжди можна повністю забезпечити в умовах лісової пожежі. Але у випадку гасіння верхових пожеж якраз і потрібно забезпечити велику інтенсивність гасіння.

Під час гасіння лісових пожеж також застосовують і піну. Піна низької кратності загалом ефективніше гасить пожежі деревини, ніж звичайна вода. За допомогою піни можна швидко створити протипожежні бар'єри для запобігання поширенню низових пожеж. Піна також запобігає поширенню пилу та продуктів горіння. Піна високої стійкості ефективна для створення протипожежних смуг, які ефективно зупиняють поширення низових пожеж шаром підстилки чи сухої трави [105]. Такі смуги створювати особливо доцільно у забруднених радіонуклідами лісах, оскільки традиційні засоби створення мінералізованих смуг призведуть до виникнення запиленості та поширення радіонуклідів у повітрі. Покриття шаром

піни ґрунту, як і зрошення розпилим струменем, може зменшити підняття в повітря пилу, що містить радіонукліди, та поширення забруднення.

Недоліком піни є її швидше висихання та зменшення в об'ємі в умовах дії високих температур. Іншими недоліками використання піни під час гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах є низька дальність подачі піни високої кратності, висока вартість використання, а також можливість забруднення лісів хімічними речовинами.

Найбільшу дальність подачі піни досягається за низької кратності. Її забезпечують повітряно-пінні пожежні стволи. Технічні характеристики найпоширеніших стволів, які формують піну низької кратності, наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Технічні характеристики пожежних стволів
для отримання піни низької кратності [139]

Показники	Тип ствола			
	СПП-4	СППЕ-2	СППЕ-4	СППЕ-8
Витрата по піноутворювачу, м ³ /хв.	4	2	4	8
Робочий тиск перед стволом, МПа	0,4-0,6	0,6	0,6	0,6
Витрата по воді, л/с	-	4,0	7,9	16,0
Витрата 4-6% розчину піноутворювача, л/с	5-6	-	-	-
Кратність піни на виході зі ствола, не менше	7,0	8,0		
Дальність подачі піни, м	28	15	18	20
З'єднувальна головка	ГЦ-70	ГЦ-50	ГЦ-70	ГЦ-80

Ефективність пінних стволів низької кратності оцінено з використанням таксономічного методу за інтегральними показниками (таблиця 3.11). Для оцінювання взято до уваги такі показники: максимальна витрата по воді (розчину

піноутворювача) (мінімум), дальність подачі піни (максимум), кратність піни (максимум) і витрата по піноутворювачу (максимум).

Таблиця 3.11 – Інтегральні показники ефективності пожежних стволів для отримання піни низької кратності

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

Як видно з таблиці 3.11, за інтегральними показниками найбільш ефективним є ствол СППЕ-4, далі йому незначно уступають СПП-4, СППЕ-8, а найменш ефективним є СППЕ-4. Загалом ефективність всіх розглянутих стволів є високою. Зауважимо, що в умовах недостатнього водозабезпечення істотним недоліком ствола СППЕ-8 є значна витрата по воді, але він компенсується швидким і значним по об'єму продукуванням піни.

Піну середньої кратності для гасіння низових пожеж утворюють стволи ГПС. Такі стволи є найбільш поширеними у пожежно-рятувальних підрозділах. Вони забезпечують подачу піни на значно менші відстані від 6 до 12 м. Тактико-технічні характеристики найпоширеніших пінних стволів середньої кратності наведені в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Технічні характеристики генераторів піни середньої кратності [139]

Показники	Тип ствола		
	ГПС-200	ГПС-600	ГПС-2000
1	2	3	4
Кратність піни	80-100	80-100	80-100
Тиск перед розпилювачем, МПа	0,4–0,6	0,4–0,6	0,4–0,6

Продовження таблиці 3.12

1	2		3		4	
Витрата по піноутворювачу, л/с	0,12		0,36		1,2	
Витрата по воді, л/с	1,88		5,64		18,8	
Витрата 4-6% розчину піноутворювача, л/с	1,6–2,0		5,0–6,0		16,0–20,0	
Витрата по піні, л/с	200		600		2000	
Дальність подачі піни, м	6		10		12	
Площа гасіння одним приладом, м^2 , при інтенсивності, $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	0,05	0,08	0,05	0,08	0,05	0,08
	40	25	120	75	400	250
$W_{\text{гас.}}, \text{м}^3$, при $\tau_p=10$ хв	40		120		400	
Маса, кг	2,4		4,45		25	

Ефективність пінних стволів середньої кратності також оцінено за інтегральними показниками з урахуванням максимальних витрат по воді (мінімум), дальність подачі піни (максимум, витрати по піні (максимум) і маса (мінімум). Результати проведених розрахунків наведено у таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Інтегральні показники ефективності генераторів піни середньої кратності

Показник	ГПС-200	ГПС-600	ГПС-2000
Інтегральний показник	0,17	0,49	0,20

Найефективнішим для гасіння лісових пожеж за інтегральним показником є ГПС-600. Значно нижчими за інтегральними показниками є ефективності ГПС-200 та ГПС-2000, хоча вони відрізняються між собою за характеристиками.

Для створення піни високої кратності використовують стволи ГПВ. Ці стволи забезпечують високу дальність подачі повітряно-механічного струменя, що робить привабливим їх використання для гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах. Основні тактико-технічні характеристики таких стволів наведені в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Генератори механічної піни високої кратності [139]

Показники	Тип ствола			
	ГВП-30	ГВП-40	ГВП-50	ГВП-70
Робочий напір перед стволом, МПа	0,5-0,6	0,5-0,6	0,5-0,6	0,5-0,6
Продуктивність по піні, м ³ /хв	30	42	48-54	60-78
Витрати розчину, л/с	1,6-1,8	2,0-2,5	1,8-2,0	2,0-2,5
Витрати піноутворювача до розходу води, %	0,11	0,15	0,12	0,15
Кратність піни на виході зі ствола	100-250	100-250	100-700	100-700
Дальність повітряно-механічного струменя м	40	40	80	80

Інтегральні показники ефективності пінних стволів високої кратності визначимо з урахуванням максимальних витрат по воді (мінімум), дальності подачі піни (максимум) і витрат по піні (максимум). Результати розрахунку інтегральних

показників для генераторів механічної піни високої кратності наведено в таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Інтегральні показники ефективності генераторів високократної механічної піни

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

Як видно з таблиці, найбільш ефективним є ствол ГВП-50, за ним йде ГВП-30, далі у порядку спадання інтегрального показника йдуть ГВП-70 та ГВП-40.

Для формування піни під час гасіння пожежі використовують пінозмішувачі. Технічні характеристики пінозмішувачів ПЗ-1, ПЗ-2 та ПЗ-3 наведено в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Технічні характеристики пінозмішувачів [139]

Показники	Пінозмішувач		
	ПЗ-1	ПЗ-2	ПЗ-3
Напір перед змішуванням, МПа	0,7-1	0,7-1	0,7-1
Дозування піноутворювача, %	4,5-6,5	4,5-6,5	4,5-6,5
Розхід розчину, л/с	5-6	10-12	15-18
Умовний прохід, мм:			
- на вході в змішувач	70	80	80
- на виході з змішувача	70	80	80
- всмоктуючого шлангу	16	25	25
Кількість під'єднувальних генераторів піни ГПС-600	1	2	3

Вибір пінозмішувачів здійснюють в залежності від кількості генераторів піни, які потрібно одночасно застосовувати, тому їх ефективність не розраховували.

Отже, кожен вид пожежного обладнання має декілька представників, вибір яких здійснюється керівником гасіння пожежі залежно від наявності та потреб в умовах пожежі. Для вибору більш ефективного пристрою слід враховувати інтегральні показники, які визначають найбільш оптимальне поєднання різних показників.

3.2. Пожежно-рятувальна техніка для гасіння лісових пожеж та її ефективність

Для гасіння лісових пожеж у забруднених радіонуклідами лісах потрібно не лише обладнання, але і пожежна техніка, яка здатна доставити до місця пожежі обладнання та рятувальників і здійснити гасіння. Проаналізуємо найбільш поширену техніку та її ефективність застосування для гасіння лісових пожеж.

Пожежні автомобілі є найбільш часто вживаними під час лісових пожеж. Найбільш ефективними є пожежні автоцистерни, які здатні перевозити людей, обладнання та інвентар, а також запас води і піноутворювача. Для проїзду лісовими дорогами важливими є габарити і прохідність автомобіля. Переважно менші автомобілі підвищеної прохідності є ефективнішими в умовах лісу. Однак у таких автомобілях є менший запас води, що зумовить потребу перекачування води з прокладанням рукавних ліній та задіянням інших автомобілів, або постійного її підвезення. Тому за можливості вибирають автомобіль, здатний доїхати до місця пожежі та мати якомога більший запас води. Ефективність пожежних автомобілів для гасіння лісових пожеж досліджено у [106]. Оскільки у пожежних підрозділах є значна кількість видів автомобілів, їх ефективність доцільно оцінювати, виходячи з наявного набору.

В умовах радіоактивного забруднення під час пересування ґрунтовими дорогами здійснюється пил, який може потрапляти всередину автомобіля. Тому автомобіль має бути герметичним, а повітря в салон подаватися через фільтри та

створювати надлишковий тиск. Це стосується й інших видів транспорту, які застосовуються на забруднених радіонуклідами територіях.

Захистити від високоінтенсивного іонізуючого випромінювання та пересуватися в умовах бездоріжжя здатна броньована пожежна техніка, представником якої є пожежний танк – спеціальна пожежна машина на базі танкового шасі від конверсійних танків. Пожежний танк застосовують для ліквідації пожеж на арсеналах та базах зберігання вибухонебезпечних речовин, створення проходів до осередків загорання, а також для гасіння лісових пожеж [141, 142] (рис. 3.2).



а



б

Рисунок 3.2 – Пожежні танки: а – ГПМ-54 [141]; б – ГПМ-72 [142]

Технічні характеристики пожежних танків ГПМ-54 та ГПМ-72 наведено в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Технічні характеристики пожежних танків [141, 142]

Показники	Пожежний танк	
	ГПМ-54	ГПМ-72
Шасі	Танк Т-54	Танк Т-72
Маса з повним навантаженням, т	43	55
Середня швидкість руху, км/год	20	20
Місткість цистерни для води (піноутворювача), л	9 000	20 000 (2000)
Пожежний насос	ПН-60Б	

Незважаючи на наведені позитивні сторони, основним недоліком пожежного танка є низька швидкість руху у порівнянні з автомобілем, що обмежує його застосування під час лісових пожеж.

Перспективним представником техніки, яку можна задіювати для гасіння лісових пожеж є установка самохідна порошкового пожежогасіння імпульсної дії УПГ-92 [143], яка призначена для гасіння пожеж класів А, В, С і електрообладнання під напругою (рис. 3.3). Вона виготовлена на базі багатоцільового тягача МТ-Т. Висока прохідність цієї установки та герметичний корпус, як і у пожежних танків ГПМ-54 і ГПМ-72, можуть бути корисними в умовах лісової пожежі в Чорнобильській зоні за відсутності мережі доріг в належному стані, блокуванням проїздів, спричинених падінням дерев чи погодними умовами.



Рисунок 3.3 – Установка самохідна порошкового пожежогасіння імпульсної дії
УПГ-92 [143]

Основні технічні характеристики УПГ-92 наведено в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – Технічні характеристики установки самохідної порошкового
пожежогасіння імпульсної дії УПГ-92 [143]

Показник	Значення
Шасі	МТ-Т
Маса з повним навантаженням, т	31
Максимальна швидкість руху, км/год	65
Сумарна маса порошкового заряду, кг	1000
Запас ходу по паливу, км	250

Для гасіння пожеж у лісах, які не забруднені радіонуклідами, використання такої установки може бути доцільним і швидко припинити горіння порошковим зарядом. Проте за наявності радіоактивного забруднення в Чорнобильській зоні її робота спричинятиме підняття хмар пилу та продуктів горіння та поширення

забруднення. Тому вважаємо недоцільним її застосування у радіоактивно забруднених лісах.

Ще одним представником пожежної техніки підвищеної прохідності, яка може бути ефективною під час гасіння лісових пожеж, є всюдихід пожежний лісовий ВПЛ-149, який виготовляло українське підприємство Державне підприємство прилуцький завод протипожежного і спеціального машинобудування «ПОЖСПЕЦМАШ» [144] (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Всюдихід пожежний лісовий ВПЛ-149 [144]

Він призначений для доставки до місця пожежі особового складу, пожежного обладнання, вогнегасних речовин, а також локалізації та ліквідації лісових пожеж,

створення загороджувальних мінералізованих смуг. Всюдихід може прокладати мінералізовану смугу шириною 2,8 м зі швидкістю 6,2 км/год. Технічні характеристики наведені в таблиці 3.19.

Таблиця 3.19 – Технічні характеристики всюдиходу пожежного лісового ВПЛ-149 [144]

Показник	Значення
База	Гусеничний транспортер (ГТ-СМ)
Маса у повному спорядженні, т	5,3
Екіпаж, чол.	2
Витрати пального по ґрунтовій дорозі, л.	150-200
Ємність цистерни для води, м ³	0,55
Ємність баку для ПУ, м ³	0,095
Насос пожежний	НШН-600

Загалом всюдихід є досить ефективним, має добру прохідність, як і інші види техніки на гусеничному ході, та може використовуватися для гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах. Проте прокладання мінералізованої смуги може призвести до зростання концентрації пилу, який у Чорнобильській зоні може містити радіонукліди. Тому не бажано використовувати цю функцію для локалізації та припинення поширення пожеж на цій території.

Найбільш ефективною для гасіння пожеж у забруднених радіацією лісах є авіаційна техніка: літаки та гвинтокрили.

Пожежні літаки застосовуються для ліквідації ландшафтних пожеж (лісових, степових тощо) за допомогою зливу вогнегасної рідини з навісних зливних

агрегатів до осередків пожеж. За потреби вони можуть переоснащуватися як вантажний варіант для постачання вантажів (пасажирів), або їх відповідного десантування парашутним способом. Також можуть застосовуватись як санітарний варіант для доставлення постраждалих. Такий вид техніки дає можливість уникнути негативної дії радіації на пожежників за використання наземної пожежної техніки.

Найбільш поширеним в Україні є Ан-32П — український пожежний літак, розроблений на базі Ан-32 (рис. 3.5). Літак оснащений 4 зовнішніми знімними баками об'ємом по 2000 л кожен. Скид вогнегасної рідини може здійснюватись з усіх баків одночасно або по черзі із заданим інтервалом [145].



Рисунок 3.5 – Пожежний літак АН-32П [145]

Основні льотно-технічні характеристики пожежного літака АН-32П наведені в таблиці 3.20.

Таблиця 3.20 – Льотно-технічні характеристики пожежного літака АН-32П [145]

Характеристики	Величина
Екіпаж, чол.	3–4
Пасажиромісткість, чол.	30
Вантажопідйомність, кг	6700
Крейсерська швидкість, км/год:	460
Практична дальність польоту, км	850
Максимальна висота підйому, м	9400
Запас води, л	8000

Основні призначення літака АН-32П: гасіння лісових пожеж за допомогою вогнегасної рідини; десантування пожежників-парашутистів, спеціального обладнання, спорядження і вантажів на місце організації пожежогасіння; активний вплив на хмари з метою штучного викликання опадів над зоною горіння. Цей літак використовували для гасіння пожеж у лісах Чорнобильської зони. Недоліком пожежних літаків є висока вартість обслуговування та вильоту, складність прицілювання та скидання води у потрібне місце пожежі, а також у разі виникнення необхідності повторного скиду – потреба здійснення посадки для заправлення водою.

Пожежні гвинтокрили використовуються у випадку гасіння локальних осередків ландшафтних пожеж або створення загороджувальних смуг. Призначені для відстежування пожеж із повітря та доставлення пожежних-рятувальників, ПТО, вогнегасних речовин, а також ліквідації пожеж та проведення аварійно-рятувальних робіт.

У ДСНС України для гасіння пожеж різних видів, у тому числі лісових, застосовується модернізований транспортний варіант найбільш масового за всю історію випуску багатоцільового гвинтокрила – Мі-8МТ з водозливним пристроєм ВЗП-5А [147]. Цей гвинтокрил, як і літак АН-24П використовувався для гасіння у Чорнобильській зоні (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Гасіння лісової пожежі в Чорнобильській зоні гвинтокрилом Мі-8МТ [146]

Основні льотно-технічні характеристики пожежного гвинтокрила наведені в таблиці 3.21.

Таблиця 3.21 – Льотно-технічні характеристики пожежного гвинтокрила Мі-8МТ [147]

Характеристики	Величина
Екіпаж, чол.	2–3
Пасажиромісткість, чол.	15
Вантажопідйомність, кг	3000
Крейсерська швидкість, км/год:	230
Практична дальність польоту, км	520
Максимальна висота підйому, м	5000
Запас води водозливного пристрою ВЗП-5А, л	2500

Технічні можливості гвинтокрила включають доставлення вантажів у вантажній кабіні і на зовнішній підвісці загальною масою до 3000 кг, використання як санітарного транспортного засобу, а також доставлення пожежників до віддалених місць гасіння. Гвинтокрил забезпечує доставлення 3-6 поранених на ношах або 15 сидячих осіб на відстань до 750 км.

Основними перевагами застосування пожежних гвинтокрилів у порівнянні з літаками є більша точність скидання вогнегасної речовини; оперативність щодо заповнення оснащених ємностей водою (порівняно з ємностями літаків); відносна безпека льотного складу (дотримання безпечної відстані до межі осередку полум'я пожежі).

Для виконання десантування та оперативного доставлення вантажів під час гасіння лісової пожежі, а також скидів води з водозливного пристрою СВ3000М можуть застосовуватися і гвинтокрили ЕС-Н225, які є на теперішній час на озброєнні у ДСНС України (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Гвинтокрил рятувальний ЕС-Н225 [149]

Основні льотно-технічні характеристики гвинтокрила ЕС-Н225 наведені в таблиці 3.22.

Таблиця 3.22 – Льотно-технічні характеристики гвинтокрила ЕС-Н225 [108]

Характеристики	Величина
Екіпаж, чол.	2
Пасажиромісткість, чол.	24
Вантажопідйомність, кг	1300
Крейсерська швидкість, км/год:	260
Практична дальність польоту, км	985
Максимальна висота підйому, м	5900
Запас води водозливного пристрою СВ3000М, л	3000

Загалом гвинтокрил ЕС-Н225 є сучаснішим і має кращі льотно-технічні характеристики. Проте наявні в Україні борти не пристосовані до гасіння лісових пожеж. За кордоном такі гвинтокрили у модифікації Н225 Firefighting обладнують за потреби гнучким резервуаром об'ємом до 4500 л, комплектом для скидання води і системою люків, а також водяною корзиною та водометом. Заправка водою резервуара або підвішеної корзини може здійснюватися без посадки в режимі зависання над водоймою [108].

Основним недоліком використання гвинтокрилів для гасіння пожеж у лісах, що забруднені радіонуклідами, є інтенсивні потоки повітря, спричинені обертанням гвинта для створення піднімальної сили, оскільки вони спричиняють підняття пилу та поширення його разом з димом, що містить радіонукліди за незначної висоти польоту. Також гвинтокрили небезпечно використовувати для гасіння високоінтенсивних верхових пожеж через небезпеку конвективних потоків від пожежі.

Незважаючи на відмінності принципів польоту та технічних характеристик, порівнюємо їх ефективність. За інтегральними показниками, визначено найбільш ефективний літальний апарат для гасіння лісових пожеж з урахуванням таких показників: запас води (максимум), крейсерську швидкість польоту (максимум), практичну дальність польоту (максимум) та максимальну висоту польоту (максимум). Отримані значення наведені в таблиці 3.23.

Таблиця 3.23 – Інтегральні показники ефективності літальних апаратів, які використовують для гасіння лісових пожеж

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

Найефективнішим для гасіння лісових пожеж за значеннями інтегрального показника є літак АН-32П, за ним слідує гвинтокрил ЕС Н225 з водяним баком, далі цей же апарат з водоскидним пристроєм СВ3000М, а найменш ефективним є гвинтокрил МІ-8МТ з водоскидним пристроєм ВЗП-5А.

За наявності розташованих поблизу місця лісової пожежі залізничних колій для участі в гасінні може спрямовуватися пожежний поїзд. У Чорнобильській зоні наявні залізничні колії і в окремих випадках цей вид пожежної техніки може бути використаний. Пожежний поїзд – рухомий склад залізниці, який призначений для перевезення пожежних-рятувальників, пожежно-технічного обладнання, вогнегасних речовин з метою гасіння пожеж та проведення пожежно-рятувальних робіт. Пожежні поїзди застосовуються для: гасіння пожеж на об'єктах та в рухомому складі залізничного транспорту; надання допомоги під час ліквідації наслідків транспортних пригод, повеней, інших стихійних лих. Залежно від

тактико-технічних характеристик пожежні поїзди поділяють на поїзди першої та другої категорій [148] (таблиця 3.24).

Таблиця 3.24 – Технічні характеристики та оснащення пожежних поїздів [148]

Основні характеристики	Категорії поїздів	
	I	II
Об'єм води, що вивозиться, л	140000	100000
Ємність для ПУ, л	7500	5000
Рукави напірні 51 мм, м	500	300
Рукави напірні 66 мм, м	1100	1000
Оперативний розрахунок, осіб	7	6
Вогнегасники:	5	5
- порошкові ВП-5	5	5
- вуглекислотні ВВК-5		
Мотопомпи переносні, продуктивністю не менше 1600 л/хв, шт.	2	2
Мотопомпи переносні, продуктивністю не менше 600-800 л/хв, шт.	1	1
Електростанція потужністю 4-10 кВт, шт.	1	1

Як видно з таблиці 3.24, більшою ефективністю для гасіння лісових пожеж у забруднених радіонуклідами лісах Чорнобильської зони характеризується

пожежний поїзд I категорії, який практично за всіма показниками перевершує поїзд II категорії.

Отже, для гасіння лісових пожеж у забруднених радіонуклідами лісах найефективніше використовувати пожежну техніку, яка може пересуватися по бездоріжжю, має запас води та здатна захистити пожежників від радіації. Авіаційні засоби здатні швидко досягнути місць горіння та скинути воду чи інший вогнегасний засіб, уникаючи впливу радіації. Пожежні поїзди також будуть ефективними за наявності залізничних віток поблизу місць виникнення пожежі.

3.3. Ефективність способів пожежогасіння у забруднених радіонуклідами лісах

Основними методами гасіння пожеж є охолодження, припинення доступу повітря, збивання полум'я, а також хімічні реакції флегматизації та поглинання тепла.

Для гасіння лісових пожеж традиційно використовують такі основні способи:

- захоплення полум'я;
- гасіння водним способом;
- гасіння за допомогою вогнегасних хімікатів і ґрунту;
- гасіння за допомогою загороджувальних смуг;
- гасіння із застосуванням вибухових засобів;
- гасіння за допомогою відпалу;
- гасіння шляхом виклику штучних опадів;
- гасіння з використанням літальних апаратів.

Проаналізуємо ці способи стосовно доцільності та ефективності їх застосування для гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах.

Захоплення полум'я застосовується для трав'яних і слабких низових пожеж, за яких люди можуть наблизитися до крайки пожежі. Процес такого гасіння ускладнюють високі чагарники і купини. При такому способі гасіння використовують мітли, гілки, хлопавки з брезенту та інші засоби. Удари здійснюють з зовнішнього боку пожежі похило, потім все змітається. В умовах

забруднення радіонуклідами таке гасіння призводить до підняття в повітря пилу і продуктів горіння, які є радіоактивними. Висока температура та інтенсивний тепловий потік від полум'я ускладнює застосування засобів захисту органів дихання та захисного одягу, що зумовлює зниження часу роботи пожежника та потребує більшої у порівнянні з пожежами в лісах без забруднень кількості людських ресурсів.

При гасінні водним способом необхідні розташовані поблизу вододжерела – водойми або організація неперервної доставки води транспортом. Цей спосіб широко використовується для гасіння низових пожеж. При водному способі один пожежник збиває основну частину полум'я, а інший гасить вторинні вогнища. Цей спосіб є безпечнішим у порівнянні з захопуванням, оскільки дає змогу пожежнику перебувати на більшій відстані, ніж у випадку застосування способу захопування полум'я. У повітря піднімається менше пилу, але до продуктів горіння, які є радіоактивними, долучається водяна пара, що також зумовлює необхідність застосування засобів захисту пожежника, особливо органів дихання. В умовах посухи пил може здійматися від переміщення автомобілів, які здійснюють підвезення води. Тому потрібно забезпечити захист від радіації і для водіїв таких автомобілів.

Пожежі також гасять за допомогою вогнегасних хімікатів, які сповільнюють горіння, підвищують рівень змочування рідин та здійснюють гасіння. Цей спосіб є подібним до традиційного гасіння водою, але потребує її меншої кількості. Хімікати застосовуються, як правило, для гасіння горючих матеріалів на поверхні ґрунту, а також підземних (торф'яних) пожеж.

Закидання полум'я ґрунтом здійснюють при низових пожежах слабкої інтенсивності, які повільно поширюються. При цьому застосовують лопати і спеціальні машини. Такий спосіб створює небезпеку вдихання як продуктів горіння, так і пилу, який піднімається в повітря в процесі закидання ґрунтом.

Створення мінералізованих загороджувальних смуг є найбільш ефективним для слабких низових пожеж. Смугу роблять з випередженням по відношенню до головної частини пожежі на 20-100 м. Ширина смуги повинна бути 1-4,5 м. Для

підземних пожеж створюють канами. Мінералізовані загороджувальні смуги як метод попередження розповсюдження вогню мають ряд переваг та недоліків. У випадку проведення робіт механізованими засобами вдається уникнути безпосереднього контакту особового складу з радіоактивним середовищем, однак відбувається запилення повітря, що зумовлює потребу захисту персоналу або герметизації кабін і фільтрування повітря. В окремих випадках застосування такого виду техніки є неможливим, наприклад за відсутності шляхів під'їзду для транспорту, захаращення доріг, неможливості маневрування, наявності рослинності. У такому разі прокладання мінералізованих загороджувальних смуг та звільнення від рослинності здійснюється з використанням ручних знарядь, що зумовить потребу застосування засобів індивідуального захисту органів дихання і відповідного захисного одягу та більш ретельного контролю за рівнем опромінення рятувальників. Час роботи з використанням ручного інструменту значно збільшується порівняно з застосуванням механізмів і тому потрібна більша кількість особового складу для своєчасної заміни працюючих, щоб не допустити збільшення рівня радіації вище норми.

Для швидкого прокладання мінералізованих смуг у разі відсутності землерийної техніки застосовують вибухові речовини. Цей спосіб дуже ефективний. Прокладають шурфи глибиною 0,4-0,7 м на відстані 1,5-2,5 м один від іншого і закладають патрони з амонітом вагою від 200 до 900 г. Часто використовують накладні заряди а також шнури з вибухівкою. Такий спосіб дає змогу уникнути тривалого перебування персоналу на місці закладання вибухівки та відвести його на значну відстань перед вибухом, зменшивши шкідливий вплив радіоактивних часток. Проте вибухова хвиля спричинює значне запилення повітря та призводить до переміщення на значні відстані часток ґрунту, які розташовані під його поверхнею та можуть мати більші значення інтенсивності радіоактивного випромінювання.

Зустрічний відпал – також один з поширених способів зупинення поширення вогню, це керований зустрічний вогонь який штучно створюється рятувальниками та/або працівниками лісового господарства. Суть даного методу полягає в запуску

палу з безпечної відстані від наявних протипожежних розривів. При відпалі створюється широка смуга зі знищених горючих речовин. Недоліком даного методу є небезпека зміни напрямку поширення вогню із зміною напрямку вітру, що може викликати зворотній ефект. Для його реалізації необхідне залучення людей, а не механізованої техніки, а поширення диму та продуктів горіння з вмістом радіоактивних часток вимагає застосування відповідних засобів захисту та дотримання вимог роботи в радіаційно забрудненому середовищі.

Найефективнішим способом гасіння є виклик штучних опадів. При цьому за допомогою сухої вуглекислоти, йодистого срібла і свинцю, сірчистої міді та інших реагентів стимулюють скупчення хмар, які утворюються над пожежею через підйом пари. Але цей спосіб вартісний через застосування літальних апаратів і хімікатів та не завжди ефективний, оскільки існує велика залежність виникнення дощу від місцевих метеорологічних умов [109].

Гасіння з використанням літальних апаратів – є сучасним способом, який передбачає скидання води з повітря на охоплені вогнем ділянки. Застосовують авіаційні сили та засоби для зрошення з малої висоти польоту значної за протяжністю ділянки по фронту горіння. Найефективнішими для гасіння лісової пожежі є послідовні, з малим інтервалом, зливи води з літаків (вертольотів), особливо на рівнинній місцевості [1]. Для організації гасіння авіацією в Україні здебільшого застосовують літак Ан-32П та вертоліт Мі-8МТ, ефективність яких проаналізовано раніше.

Слід врахувати, що застосування авіації можливе тільки в таких випадках:

- виникнення лісової пожежі у зоні відповідальності територіальних органів ДСНС України і загрози її переростання у НС – за письмовим зверненням керівництва територіального органу управління ДСНС, рішенням Голови, першого заступника Голови ДСНС;
- виникнення НС регіонального і місцевого рівнів - на підставі аналізу надзвичайної ситуації, проведеного в ДСНС, територіальних органах ДСНС, або звернень керівників центральних і місцевих органів виконавчої влади, за рішенням Голови, першого заступника (заступника) Голови ДСНС;

- введення режиму надзвичайного стану, оголошення окремих місцевостей зонами надзвичайної екологічної ситуації - за рішенням Голови ДСНС [1].

Використання авіації під час гасіння лісів, тому числі і забрудненої радіонуклідами місцевості є найбезпечнішим способом для проведення розвідки, а також ліквідації пожеж в лісових масивах. Поряд з цим існують і недоліки даного методу гасіння:

- висока вартість використання літальних апаратів;
- залучення літаків та гвинтокрилів для гасіння верхових пожеж середньої та високої інтенсивності малоефективне і практично неможливе через штормовий вітер, пориви якого сягають до 20-25 м/с;
- під час гасіння низових пожеж значна частина вогнегасних речовин осідає на кронах дерев і чагарниках під дією атмосферних потоків та диму які екранують зону займання;
- над епіцентром пожежі у стовпі диму утворюються вихрові зони зі швидкістю до 30 м/с, що призводить до повного винесення води за межі ділянки горіння та випаровування з розміром крапель до 5 мм;
- чим більший об'єм води або розчину може доставити літальний апарат (літак чи гелікоптер), тим в жорсткіших аеродинамічних умовах відбувається процес скидання води;
- для забезпечення стійкості та перебування на траєкторії літального апарату доводиться збільшувати швидкість та висоту польоту, що в свою чергу зменшує ефективність гасіння.

Літаки широко застосовують для гасіння пожеж лісів і за кордоном. Загалом вартість застосування такого способу гасіння є значною. Наприклад, виліт американського пожежного Боїнга обходиться в 200 000 доларів, під час якого скидається 40 т води, яка розпилюється на смугі завдовжки 1,5 км і завширшки до 40 м. При цьому загальна площа розпилення повинна б становити до 60000 м², а реально гасять не більше 1000 м². Ймовірно, це площа хорошого концентрованого змочування, а на решті площі через 10–30 хв виникають повторні займання [110].

На теперішній час все частіше використовують безпілотні літальні апарати для виявлення лісових пожеж. Проте для гасіння пожеж через невелику вантажопідйомність використання таких засобів є на даний час недоцільним.

Таким чином, особливості ліквідації лісової пожежі в радіаційно забрудненій зоні полягають у виборі ефективного способу гасіння, задіянні відповідних сил і засобів, які дають змогу ефективно здійснити локалізацію та ліквідацію пожежі.

3.4. Моделювання лісових пожеж та процесу їх ліквідації в умовах радіаційного забруднення

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. Керівник гасіння лісової пожежі має постійно мати доступ до такої інформації.

Моделей лісових пожеж на теперішній час є досить багато. Лідером у їх розробці є США. Проведемо порівняльний аналіз існуючих у США основних систем моделювання лісових пожеж. Для порівняння систем моделювання пожеж часто використовують такі характеристики, як область використання, вхідні та вихідні дані, а також необхідна платформа і програмне забезпечення.

У системах моделювання лісових пожеж зазвичай використовують два типи вхідних даних:

- просторові дані (топографія, тип лісового горючого матеріалу), що відображаються на цифрових картах;
- погодні умови;
- інші числові параметри.

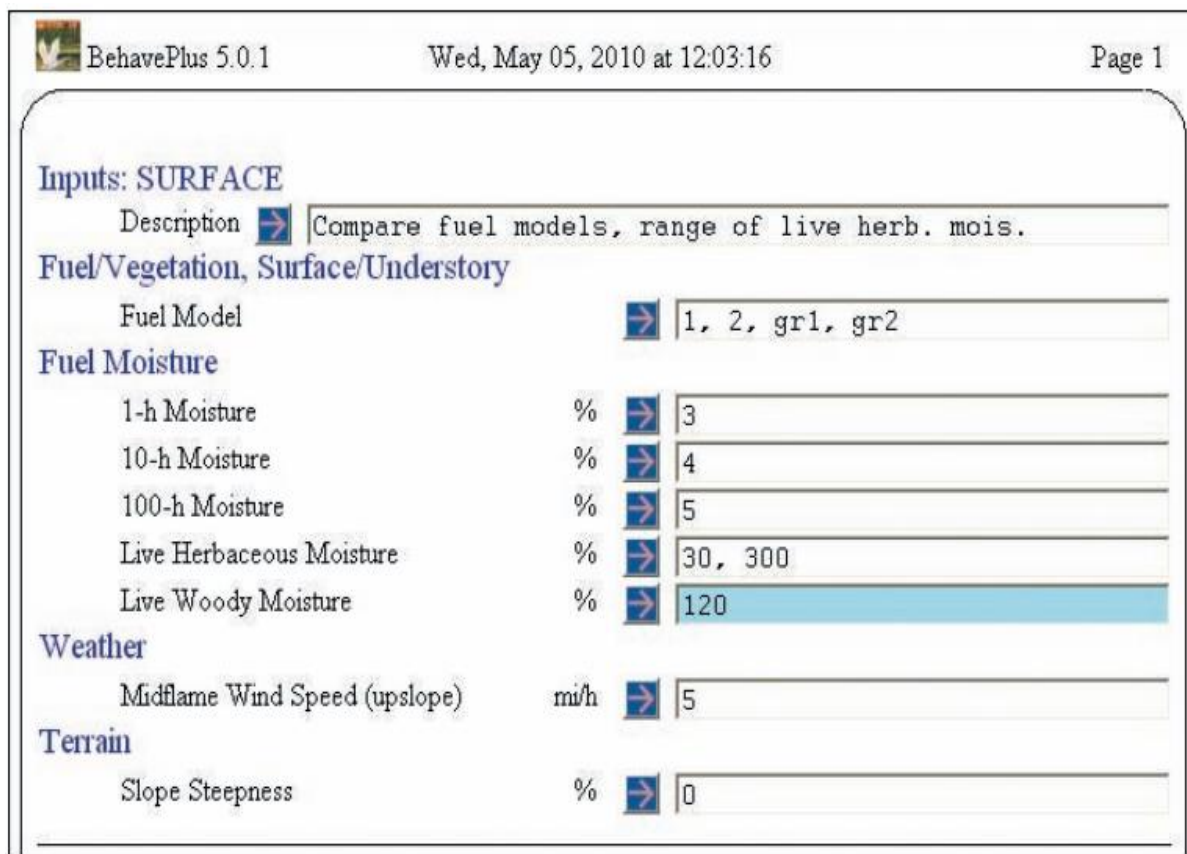
Вихідні дані, що генеруються різними системами моделювання пожеж, відрізняються складністю. Більшість систем генерують карти із зображенням прогнозованої форми пожежі. Деякі надають додаткові можливості у вигляді графів, діаграм, що відображають динаміку площі пожежі, швидкості її розповсюдження та інші дані.

Більшість існуючих систем моделювання пожеж працюють на персональних комп'ютерах чи робочих станціях під UNIX. Багато хто з них потребує додаткового програмного забезпечення, такого як пакети геоінформаційних систем, а деякі вимагають компіляторів мов програмування, таких, як C, FORTRAN та інших.

Основою для більшості систем є модель поширення низової пожежі Ротермела [95], яка була вперше використана в системі моделювання низової пожежі BEHAVE. Ця система була розроблена на початку 1980-х років Лісовою службою США. Система використовується з 1984 року та є національним стандартом прогнозування низової пожежі в США. В системі використовується непросторова модель пожежі, вихідні дані якої відображаються за допомогою графів, графіків та простих діаграм. Система розроблялася для моделювання пожеж, а також як засіб навчання пожежних команд.

Система BehavePlus – це вдосконалена система BEHAVE, що використовує ті самі математичні моделі. Однією з основних переваг цієї системи є те, що її можна використовувати на більшості IBM-сумісних комп'ютерів. Як вхідні дані в системі використовуються температура, відносна вологість повітря, швидкість і напрям вітру, ухил місцевості, вологовміст палива і так званий номер моделі палива або лісового горючого матеріалу. Більшість параметрів є зрозумілими. Останній параметр – номер моделі палива – визначає тип горючого матеріалу, який використовується у моделі низової пожежі.

Американська версія програмного забезпечення налічує 16 стандартних типів лісового горючого матеріалу, що використовуються в Канаді. Їх вибір здійснюють для задання вихідних даних розрахунку з використанням моделі BehavePlus. Приклад застосування моделі [111] для різних типів горючого матеріалу наведено на рис. 3.8.



BehavePlus 5.0.1 Wed, May 05, 2010 at 12:03:16 Page 1

Inputs: SURFACE

Description → Compare fuel models, range of live herb. mois.

Fuel/Vegetation, Surface/Understory

Fuel Model → 1, 2, gr1, gr2

Fuel Moisture

1-h Moisture	%	→	3
10-h Moisture	%	→	4
100-h Moisture	%	→	5
Live Herbaceous Moisture	%	→	30, 300
Live Woody Moisture	%	→	120

Weather

Midflame Wind Speed (upslope)	mi/h	→	5
-------------------------------	------	---	---

Terrain

Slope Steepness	%	→	0
-----------------	---	---	---

Рисунок 3.8 – Введення вхідних даних моделі BehavePlus [111]

BehavePlus зазвичай використовує 13 різних моделей лісового горючого матеріалу, які застосовні для моделювання типу рослинності в кожному конкретному випадку.

На основі моделі Ротермела [95] BehavePlus забезпечує обчислення наступних вихідних параметрів пожежі:

- швидкість поширення та інтенсивність низової пожежі (рис. 3.9),
- кількість тепла на одиницю площі,
- розмір безпечної зони, - висота факела полум'я, площа та периметр лісової пожежі.

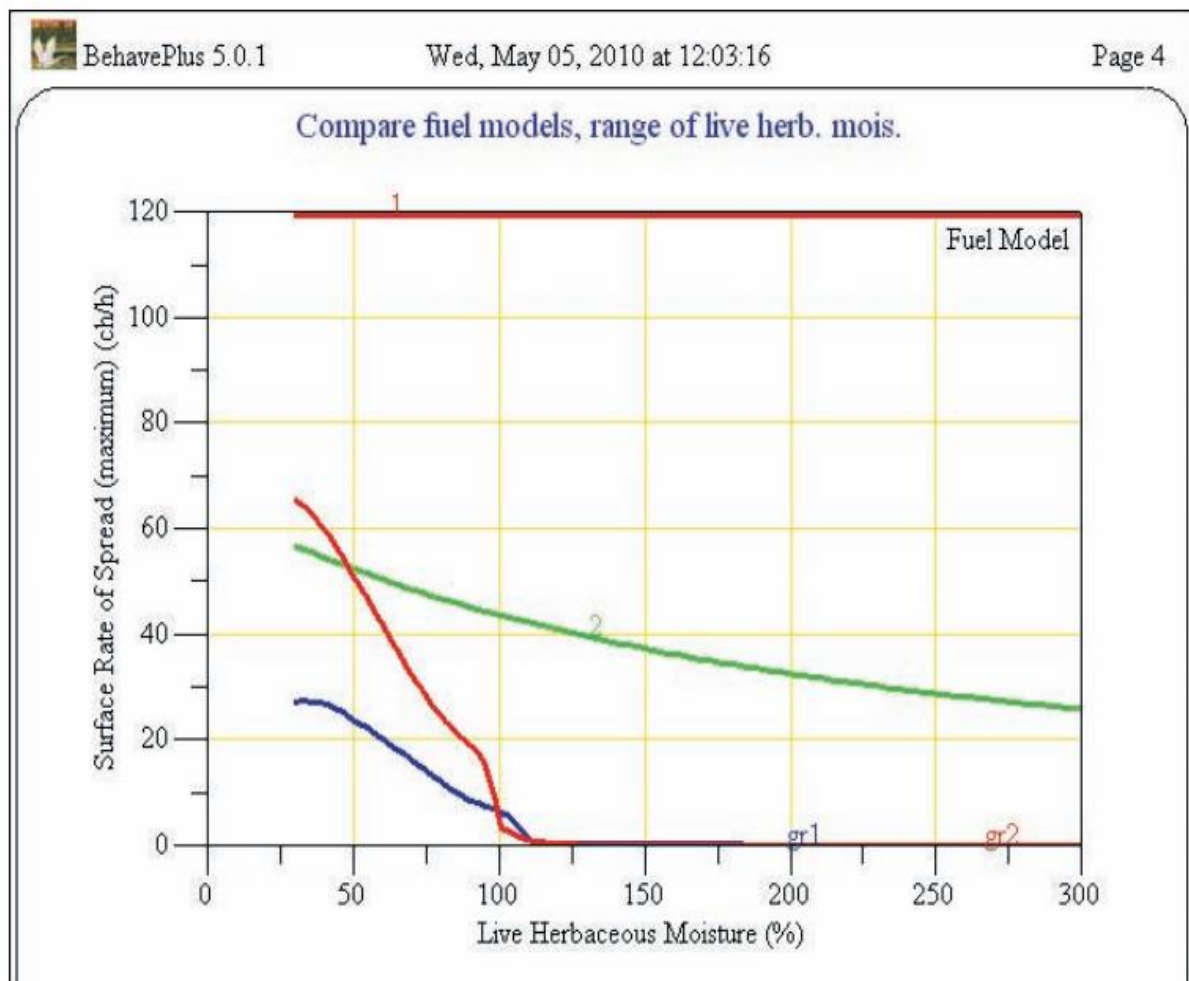


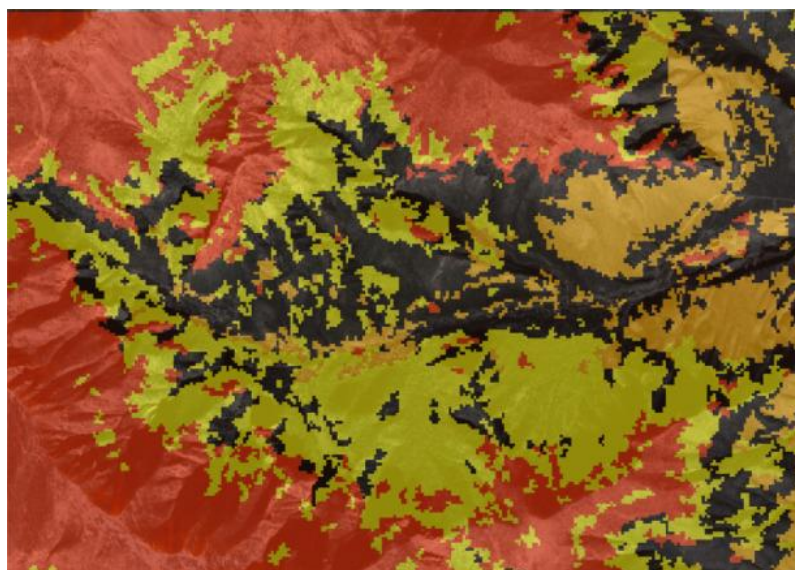
Рисунок 3.9 – Результат моделювання у BehavePlus швидкості поширення пожежі від вологості рослин [111]

Незважаючи на достатність інформації, яку представляє ця модель, існують певні обмеження при її використанні.

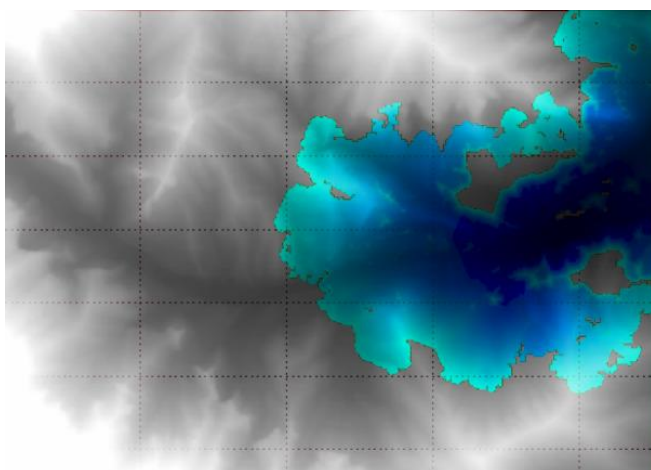
- Система призначена для моделювання лише низової пожежі.
- Лісовий горючий матеріал вважається однорідним і розташованим безперервно, тобто його неоднорідності не беруться до уваги.
- Умови, за яких поширюється пожежа, такі як рельєф місцевості та погода, вважаються постійними. Це спрощення суттєво знижує точність результатів моделювання. Наприклад, швидкість і напрямок вітру можуть змінюватися дуже швидко, впливаючи при цьому на поведінку пожежі.
- Модель не має засобів просторового відображення інформації.

Вихідні параметри представлені у різних таблицях, що суттєво знижує наочність сприйняття просторових даних користувачем.

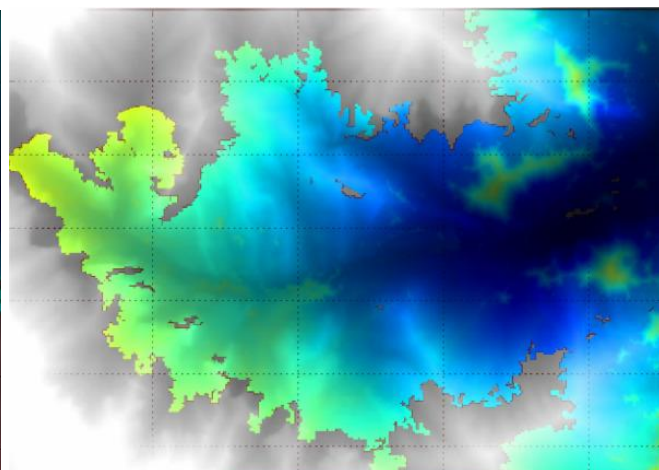
На моделі Behave засновано також систему FireLib [112]. Подібно до системи Behave, FireLib призначена для оцінки швидкості та інтенсивності лісових пожеж. FireLib виконує всі функції системи Behave і, крім них, забезпечує візуальне представлення просторових даних (рис. 3.10). FireLib також використовується модель Ротермела [95] для моделювання поведінки пожежі.



а



б



в

Рисунок 3.10 – Візуалізація просторових даних у моделі FireLib [112]: а – карта горючого матеріалу; б – моделювання поширення пожежі через 16,4 год після початку; в – моделювання поширення пожежі через 2,1 дні

Окрім цього, для формування візуального зображення площі, охопленої пожежею, тут використовується технологія поширення еліптичних хвиль.

Для роботи системи необхідні 4 вхідні параметри: номер моделі горючого матеріалу, його вологовміст, а також швидкість та напрямок вітру. Оскільки FireLib була розроблена на основі Behave, ці дві системи мають приблизно однакові можливості та обмеження. Єдина перевага FireLib у тому, що вона забезпечує просторове відображення динаміки лісової пожежі на карті.

Для використання в умовах України вказаних моделей потрібно сформувати дані, які використовуватимуться як вхідні. Ці дані можна розділити на групи: дані про лісове середовище (тип горючого матеріалу), дані про рельєф місцевості, дані про погоду (рис. 3.11).

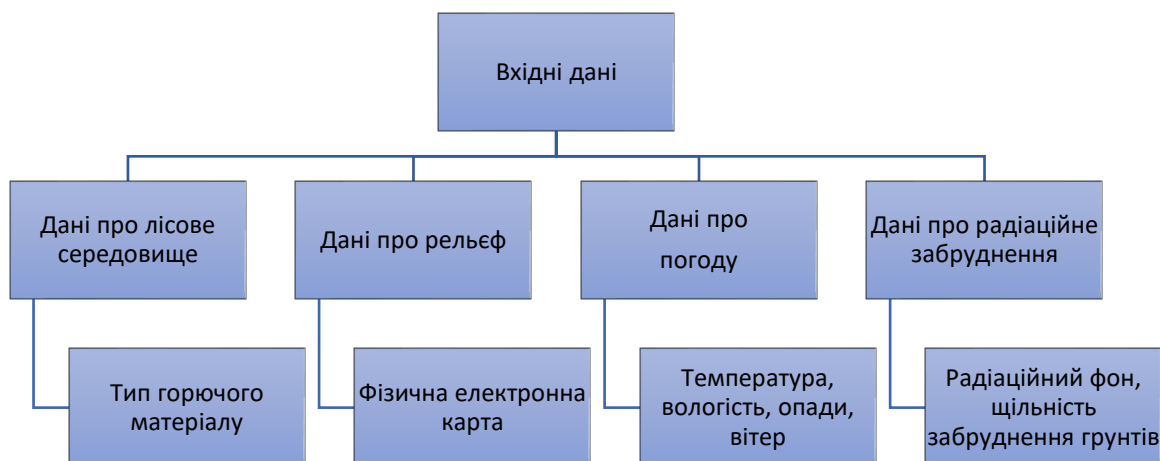


Рисунок 3.11 – Вхідні дані для моделювання лісової пожежі на забруднених радіонуклідами територіях

Найскладнішим завданням є формування інформації про тип горючого лісового матеріалу. Найпростіше шукати аналогію з даними про горючий матеріал лісів США, або сформувати свої у разі відсутності таких. Враховуючи природно-кліматичні відмінності та інший, ніж у США, видовий склад лісової рослинності, для цього потрібно експериментально визначити дані для моделі, які

характеризують процеси займання та поширення пожежі. У забруднених радіонуклідами лісах властивості лісових горючих матеріалів можуть дещо відрізнятися від аналогічних незабруднених, наприклад, більше всихання. Це теж потрібно враховувати в процесі моделювання. З урахуванням цього, а також загроз для рятувальників, до вхідних даних потрібно долучити дані про радіаційне забруднення, зокрема радіаційний фон та щільність забруднення ґрунтів радіонуклідами.

Для оцінювання ефективності прийнятих рішень щодо гасіння лісових пожеж використовують моделювання процесу поширення лісових пожеж, але процесу їх гасіння зазвичай не розглядають. Моделювання розвитку та ефективності гасіння здійснюють за критерієм площі пожежі та її динаміки.

З урахуванням наведеного розроблено математичну модель, яка описує динаміку поширення лісової пожежі та її локалізацію з урахуванням управлінських рішень, які полягають у виборі засобу та способу гасіння і розстановці сил та засобів по периметру пожежі.

За припущенням [113] 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. 3.12).

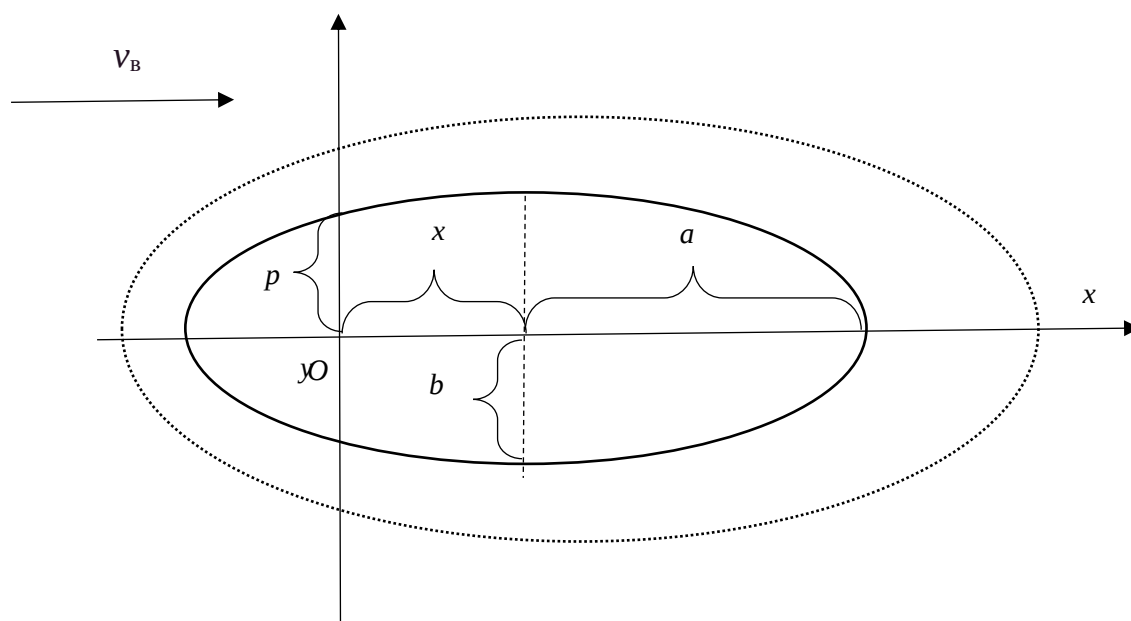


Рисунок 3.12 – Поширення лісової пожежі однорідним шаром горючого матеріалу за сталого вітру та відсутності ухилу

Швидкість поширення пожежі можна оцінити за удосконаленою моделлю Ротермела [114] з урахуванням ухилу та вітру:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \varphi_w + \varphi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}}, \quad (3.2)$$

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.

Оскільки в Чорнобильській зоні відчуження здебільшого рівнинна територія, то ухил вважатимемо рівним 0. За припущенням поширення пожежі (рис. 3.12) відбувається таким чином, що осередок виникнення пожежі буде в одному з фокусів еліпса, а еліпс збільшуватиметься з часом.

Швидкість поширення можна також визначити з використанням моделі BehavePlus, яка також базується на моделі Ротермела і була проаналізована раніше, вибравши для розрахунків найбільше подібну модель горючого матеріалу.

З урахуванням швидкостей пожежі будуть залежними від часу t довжини осей еліпса, що відображає контур пожежі

$$a = a(t),$$

$$b = b(t)$$

та фокусна піввідстань

$$c = c(t).$$

На початковому етапі використаємо припущення [115], що у випадку дії вітру швидкість фронту пожежі у напрямку вітру v_f буде більшою за швидкості у протилежному напрямку та перпендикулярно до напрямку вітру (швидкості тилу та флангів), які є рівними між собою і дорівнюють v_r . Тому в момент часу 1 півосі еліпса будуть мати такі довжини:

$$a = \frac{v_f + v_r}{2},$$

$$b = \sqrt{pa} = \sqrt{\frac{v_r(v_f + v_r)}{2}}.$$

Рівняння еліпса, що описує крайку пожежі, яка поширюється шаром горючого матеріалу під впливом вітру, має вигляд:

$$x(t, \theta) = c(t) + a(t)\cos\theta, \quad (3.3)$$

$$y(t, \theta) = b(t)\sin\theta, \quad (3.4)$$

де θ – кут між напрямком поширення пожежі (віссю Ox) та напрямком до відповідної точки еліпса з точки O (рис. 3.12). З формули (3.2) знаходимо швидкість поширення фронту пожежі і позначимо її

$$v_f = R, \quad (v_B \neq 0). \quad (3.5)$$

Швидкість поширення у напрямку, протилежному до напрямку вітру, вважатимемо такою, як за відсутності вітру:

$$v_r = R, \quad (v_B = 0). \quad (3.6)$$

Якщо швидкість вітру та властивості горючого матеріалу є сталими, тоді ексцентриситет еліпса, який визначає його форму, буде сталим числом.

Швидкості v_f та v_r , як зазначалося, можна визначити, використовуючи модель BehavePlus.

У момент часу t півосі еліпса та фокусна піввідстань описуються такими формулами:

$$a(t) = \frac{v_f + v_r}{2} t = at, \quad (3.7)$$

$$b(t) = \sqrt{v_r \frac{v_f + v_r}{2}} t = bt, \quad (3.8)$$

$$c(t) = \sqrt{(a(t))^2 - (b(t))^2} = \sqrt{\left(\frac{v_f + v_r}{2}\right)^2 - v_r \frac{v_f + v_r}{2}} t = ct, \quad (3.9)$$

де

$$c = \sqrt{\left(\frac{v_f + v_r}{2}\right)^2 - v_r \frac{v_f + v_r}{2}}.$$

З урахуванням (3.7)-(3.9) з (3.3) і (3.4) отримуємо формули, які описують еліпс краю пожежі в момент часу t :

$$x(t, \theta) = \sqrt{\left(\frac{v_f + v_r}{2}\right)^2 - v_r \frac{v_f + v_r}{2}} t + \frac{v_f + v_r}{2} t \cos \theta, \quad (3.10)$$

$$y(t, \theta) = \sqrt{v_r \frac{v_f + v_r}{2}} t \sin \theta. \quad (3.11)$$

Площа пожежі у формі еліпса в момент часу t визначається за формулою

$$S(t) = \pi a(t)b(t) = \pi \frac{v_f + v_r}{2} \sqrt{v_r \frac{v_f + v_r}{2}} t^2. \quad (3.12)$$

Отримана залежність (3.12) є квадратичною функцією від часу t . Екстремум функції досягається у точці

$$t_{min} = 0. \quad (3.13)$$

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. Моделювання цього процесу є складним, оскільки він залежить не лише від кількості осіб, задіяних у гасінні, виду та ефективності засобів гасіння, але й від управлінських рішень, які визначають тактичні прийоми і способи гасіння пожеж. У роботі [101] розглянута подібна задача та введено поняття фактора ефективності, що в добутку з кількістю засобів одного типу описує зменшення прискорення функції $S(t)$. За подібним принципом розглянемо використання різнотипних засобів, що мають різну ефективність.

Для забезпечення гасіння пожежі сили і засоби розташовують вздовж крайки пожежі та здійснюють гасіння її ділянки з відповідною лінійною швидкістю та на відповідній ділянці.

У зв'язку з цим зробимо деякі 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 $t_{\text{поч.гас}}$, гасить ділянку, площа якої описується функцією

$$S_{\Gamma}(t) = \sum_{i=1}^n l_i v_i (t - t_{\text{поч.гас}}), \quad (3.14)$$

де i – номер пожежника,

v_i – швидкість гасіння i -им пожежником з урахуванням засобу гасіння.

Якщо кожен з пожежників має однакові засоби пожежогасіння, тоді періоди гасіння своїх ділянок будуть однаковими, якщо ні, то різними. Водночас кожен пожежник запобігає поширенню пожежі на площі у межах кутового сектора з центром в точці осередку пожежі O (рис. 3.12), яка обчислюється за формулою:

$$S_i(t) = \frac{1}{2} \int_{\alpha_i}^{\alpha_i + \delta_i} r^2(t, \theta) d\theta, \quad (3.15)$$

де α_i – початковий кут сектора у радіанах,

δ_i – кут сектора.

Функція $r(t, \theta)$ з урахуванням виразів (3.10)-(3.11) визначається формулою

$$r(t, \theta) = \sqrt{(x(t, \theta))^2 + (y(t, \theta))^2}. \quad (3.16)$$

Цю формулу можна подати у вигляді

$$\begin{aligned} r(t, \theta) &= \sqrt{t^2(c + a \cos \theta)^2 + (b \sin \theta)^2} = \\ &= t \sqrt{c^2 + 2ca \cos \theta + a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} = \\ &= t \sqrt{c^2 + 2cac \cos \theta + (a^2 - b^2) \cos^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} = \\ &= t \sqrt{c^2 + b^2 + 2cac \cos \theta + (a^2 - b^2) \cos^2 \theta} = \\ &= t \sqrt{a^2 + 2cac \cos \theta + c^2 \cos^2 \theta} = \\ &= t \sqrt{(a + c \cos \theta)^2} \end{aligned}$$

або

$$r(t, \theta) = t(a + c \cos \theta). \quad (3.17)$$

Після підстановки (3.17) у (3.15) та інтегрування, отримуємо

$$\begin{aligned}
S_i(t) &= \frac{1}{2}t^2 \left[\left(a^2 + \frac{1}{2}c^2 \right) (\alpha_i + \delta_i) + 2ac \sin(\alpha_i + \delta_i) + \frac{1}{4}c^2 \sin 2(\alpha_i + \delta_i) - \right. \\
&\quad \left. - \left(a^2 + \frac{1}{2}c^2 \right) \alpha_i - 2ac \sin \alpha_i - \frac{1}{4}c^2 \sin 2 \alpha_i \right] = \\
&= \frac{1}{2}t^2 \left[\left(a^2 + \frac{1}{2}c^2 \right) \delta_i + 2ac(\sin(\alpha_i + \delta_i) - \sin \alpha_i) + \frac{1}{4}c^2(\sin 2(\alpha_i + \delta_i) - \right. \\
&\quad \left. \sin 2 \alpha_i) \right]
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Значення δ_i визначаємо з умови

$$l_i = \int_{\alpha_i}^{\alpha_i + \delta_i} \sqrt{r^2(t, \theta) + (r'(t, \theta))^2} d\theta = \int_{\alpha_i}^{\alpha_i + \delta_i} \sqrt{t^2(a + c \cos \theta)^2 + t^2 c^2 \sin^2 \theta} d\theta.$$

Перетворивши вираз під коренем, отримуємо

$$l_i = t \int_{\alpha_i}^{\alpha_i + \delta_i} \sqrt{a^2 + c^2 + 2accos\theta} d\theta \tag{3.19}$$

Це рівняння відносно невідомої δ_i може розв'язуватися лише наближеними методами. Значення $t = t_{\text{поч.гас}}$ впливає на δ_i таким чином, що із збільшенням часу початку гасіння за сталого значення l_i , яке залежить від тактико-технічних можливостей засобу пожежогасіння i -го пожежника кут сектора гасіння зменшується, що потребуватиме більшої кількості сил і засобів для локалізації пожежі. Таким чином,

$$\delta_i = f(t_{\text{поч.гас}}, l_i, \alpha_i). \tag{3.20}$$

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

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

З урахуванням (3.14) та (3.18) ця формула матиме вигляд:

$$S(t) = \pi abt^2 - \sum_{i=1}^n l_i v_i (t - t_{\text{поч.гас}}) - (t^2 - t_{\text{поч.гас}}^2) \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left[\left(a^2 + \frac{1}{2} c^2 \right) \delta_i + 2ac(\sin(\alpha_i + \delta_i) - \sin \alpha_i) + \frac{1}{4} c^2 (\sin 2(\alpha_i + \delta_i) - \sin 2 \alpha_i) \right] \quad (3.21)$$

Пожежа розвивається за площею відповідно до функції $S(t)$ (3.12) до тих пір, поки не прибудуть пожежні підрозділи і не почнеться процес локалізації та ліквідації, а площа буде визначатися за формулою (3.21).

Для оцінювання процесу ліквідації пожежі знайдемо похідні 1-го та 2-го порядку від (3.21). Отримуємо

$$S'(t) = 2\pi abt - \sum_{i=1}^n l_i v_i - 2t \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left[\left(a^2 + \frac{1}{2} c^2 \right) \delta_i + 2ac(\sin(\alpha_i + \delta_i) - \sin \alpha_i) + \frac{1}{4} c^2 (\sin 2(\alpha_i + \delta_i) - \sin 2 \alpha_i) \right]. \quad (3.22)$$

$$S''(t) = 2\pi ab - \sum_{i=1}^n \left[\left(a^2 + \frac{1}{2} c^2 \right) \delta_i + 2ac(\sin(\alpha_i + \delta_i) - \sin \alpha_i) + \frac{1}{4} c^2 (\sin 2(\alpha_i + \delta_i) - \sin 2 \alpha_i) \right]. \quad (3.23)$$

Квадратична функція $S(t)$ після початку змінить величину опуклості, яка визначається величиною (3.23) і буде зменшувати швидкість зростання. Коли похідна (3.22) стане рівною 0, відбудеться локалізація пожежі. Для знаходження часу настання локалізації прирівняємо до нуля вираз (3.22) і знайдемо значення t :

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n l_i v_i}{2\pi ab - \sum_{i=1}^n \left[\left(a^2 + \frac{1}{2} c^2 \right) \delta_i + 2ac(\sin(\alpha_i + \delta_i) - \sin \alpha_i) + \frac{1}{4} c^2 (\sin 2(\alpha_i + \delta_i) - \sin 2 \alpha_i) \right]}. \quad (3.24)$$

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

Якщо сил і засобів буде недостатньо для оточення периметра пожежі, або поведінка пожежі буде становити загрозу для пожежників, зупинка поширення вогню не буде можливою за всім периметром. У цьому випадку в окремих секторах не буде проводитися гасіння та припинення поширення, що видозмінить формулу. Але ці зміни залежатимуть від прийняття рішень керівником гасіння пожежі. Також зміни можуть спричинитися зміною погодних умов, зокрема швидкістю та напрямком вітру, що спричинить зміни параметрів пожежі та її форму. З урахуванням цього можна змодельовати процеси поширення та ліквідації пожежі за наведеним вище принципом.

Отже, існуючі системи моделювання лісових пожеж відіграють важливу роль для успішного виявлення та ліквідації пожеж у лісових масивах та можуть бути адаптовані та використовуватися для пожеж у радіоактивно забруднених лісах. Розрахунок сил і засобів для локалізації пожежі та час локалізації можуть бути визначені за запропонованою математичною моделлю з урахуванням чисельності особового складу, тактико-технічними характеристиками засобів пожежогасіння та погодними умовами, які визначають поширення пожежі.

3.5. Висновки до Розділу 3

1. Ефективність гасіння лісових пожеж на забруднених радіонуклідами територіях залежить від технічних характеристик засобів пожежогасіння та пожежно-рятувальної техніки.

2. З використанням таксономічного методу за інтегральним показником ефективності встановлено, що найбільш ефективним для подання суцільного струменя є ствол РСП-50 з інтегральним показником ефективності 0,75, далі йдуть СРК-50 та РСК-50 (0,72 та 0,61, відповідно). Для подання розпиленого струменя найбільш ефективним є Protek-366 (інтегральний показник 0,71), після якого йдуть Protek-360 (0,62) та Protek-368 (0,46). Для отримання піни низької кратності найефективнішим є СППЕ-4 (0,27), далі незначно уступають у ефективності СПП-4 (0,25) і СППЕ-8 (0,22). Із пінних стволів середньої кратності найбільш ефективним є ГПС-600 (0,49), меншу ефективність мають ГПС-2000 (0,20) та ГПС-

200 (0,17). Для гасіння піною високої кратності найефективнішим є ствол ГПВ-50 (0,84), за ним йде ГПВ-30 (0,41) та ГПВ-70 (0,35).

3. Для гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах найбільш ефективно використовувати пожежну техніку, яка може пересуватися по бездоріжжю, здатна перевозити значний запас води та захистити пожежників від радіації. З авіаційних засобів найбільш ефективним є АН-32П (інтегральний показник ефективності 0,90), досить ефективними є гвинтокрил ЕС Н225 з водяним баком 4500 л (0,51) та такий же літальний апарат із скидним пристроєм СВ3000М (0,45). За наявності залізничних віток поблизу місць виникнення пожежі ефективними будуть також пожежні поїзди.

4. Способи гасіння у забруднених радіонуклідами лісах вибираються з урахуванням особливостей території, наявності відповідних сил і технічних засобів та їх ефективності.

5. Для успішної боротьби з лісовими пожежами доцільно застосовувати моделі розвитку та поширення пожеж. Запропонована математична модель поширення та ліквідації лісової пожежі дає змогу визначити необхідну кількість сил і засобів, які забезпечать локалізацію вогню.

РОЗДІЛ 4

РАДІАЦІЙНИЙ ЗАХИСТ І ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПЕРСОНАЛУ В УМОВАХ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ НА ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ТЕРИТОРІЯХ

Для ліквідації лісових пожеж на територіях, забруднених радіонуклідами, окрім авіатехніки у більшості випадків задіяні безпосередньо пожежники, які під час роботи зазнають впливу радіації. Нормування іонізуючого опромінення в Україні здійснює Національна комісія з радіаційного захисту населення України (НКРЗУ) [116].

Під час лісових пожеж та їх гасіння ризик ураження іонізуючим випромінюванням є значним. Основними загрозами, з якими стикаються пожежники, є:

- ураження радіоактивним опроміненням, забруднення спеціального спорядження та техніки;
- збільшення допустимого рівня активності радіонуклідів в повітрі під час пожежі;
- міграція радіонуклідів в повітрі у вигляді диму, та розповсюдження на значні відстані.

4.1. Індивідуальний захист персоналу, задіяного до процесу пожежогасіння

Захисний одяг пожежника – спеціальний одяг, призначений захищати пожежника від впливу небезпечних і шкідливих чинників під час гасіння пожеж та провадження пожежно-рятувальних робіт [117]. Поділяється на види: захисний одяг пожежного-рятувальника загального призначення; захисний одяг спеціального призначення; газохімзахисний та радіаційно-захисний одяг.

Під час гасіння пожежі у радіаційно-режимних зонах I – II, у лісових масивах, що відносяться до зон II – III, особовому складу аварійно-рятувальних формувань необхідно використовувати комплект засобів індивідуального захисту третьої

категорії, який рекомендується для індивідуального захисту рятувальників під час ліквідації аварії безпосередньо на радіаційно небезпечному об'єкті або поблизу нього на відстані менше ніж 50 м від джерела небезпеки.

Згідно стандарту СОУ МНС 75.2-00013528-005:2011 [118], комплекти засобів індивідуального захисту рятувальників складаються з:

- ізолювального засобу індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) (автономні регенерувальні дихальні апарати зі стисненим киснем або зі стисненим киснем і азотом та (або) апарати дихальні легкої конструкції з лінією стисненого повітря);
- захисного ізолювального костюму;
- захисного фільтрувального костюму;
- гумового та шкіряного спеціального взуття;
- гумових, шкіряних, брезентових та бавовняних рукавиць.

Під час гасіння пожежі у ближній зоні, за умови високої концентрації у повітрі α -випромінюючих радіонуклідів, необхідно використовувати ізолювальні захисний костюм та ЗІЗОД. На інших територіях достатньо використання фільтрувальних захисного костюма та ЗІЗОД.

Згідно з Нормами табельної належності підрозділів ДСНС України [119] пожежні автомобілі можуть укомплектовуватися костюмом захисним легким Л.-1, костюмом ізолюючим "Рятувальник-2", "АКВА-Т" та "Універсал". Допустима температура для роботи в даних костюмах не повинна перевищувати 45°C. Тому слід враховувати, що при гасінні лісів у зоні відчуження в літній період використовувати дані засоби захисту можливо, але потрібно додатково застосовувати охолоджувальні пристрої щоб не допустити підвищення температури всередині костюму. Час роботи пожежників в костюмах з цієї причини потрібно обмежувати. Така ж методика стосується і фільтруючих костюмів. Технічні показники захисного одягу пожежного-рятувальника «Фенікс» наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Захисний одяг пожежного-рятувника «Фенікс»

Технічні характеристики	Показники
Температурний інтервал експлуатації, °С	-40 ... +200
Стійкість до дії відкритого полум'я, с	Не менше 10
Стійкість до дії теплового випромінювання 7 кВт/м ² , с	Не менше 180
Стійкість до дії температури +200 °С, с	Не менше 300
Стійкість до контакту з нагрітою до 400 °С поверхнею, с	Не менше 3
Водонепроникність пакета матеріалів костюма, год	Не менше 3
Вага костюма, кг	Не більше 5

До захисного одягу спеціального призначення відносяться: термозахисні костюми вітчизняного виробництва типу «Індекс-1», «Індекс-3» та «Індекс-1200» (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Захисний одяг спеціального призначення: а – «Індекс-1», б – «Індекс-3», «Індекс-1200» [150, 151]

Костюми такого типу призначені для захисту пожежного-рятувальника від теплового випромінювання полум'я при короткочасному переході через зону горіння чи поблизу нагрітих конструкцій при гасінні пожеж і проведенні аварійно-рятувальних робіт. Костюм складається з куртки, напівкомбінезона з бахілами, шолома-маски і рукавиць. Костюм виготовляється з тепловідбивної тканини з металізованим покриттям. Технічні характеристики таких костюмів наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Захисний одяг спеціального призначення [150, 151]

Технічні характеристики	Показники		
	«Індекс-1»	«Індекс-3»	«Індекс-1200»
Маса	4,5 кг	4,5 кг	12 кг
Температурний інтервал експлуатації	(-50) +200 °C	(-50) +400 °C	(-50) +1200 °C
Тривалість роботи при температурі 200 °C	900 с	900с	960 с
Тривалість роботи при температурі 1200 °C	Костюм не придатний для роботи при цій температурі	Костюм не придатний для роботи при цій температурі	300 с

Внутрішнє опромінення рятувальників та осіб, які проводять роботи в радіоактивно забрудненій зоні, може відбуватися за рахунок потрапляння мігруючих радіонуклідів через органи дихання. Під дією високої температури відбувається високотемпературний викид радіонуклідів, а також утворюється дрібнодисперсний радіоактивний аерозоль. Тому особливу увагу слід приділити захисту органів дихання, адже внутрішнє опромінення наносить більш серйозні наслідки для людини.

Для інформування пожежників про рівень радіації під час гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах доцільно забезпечити їх індивідуальними дозиметрами.

Отже, для персоналу, задіяного для гасіння у забруднених радіацією лісах, потрібно використовувати індивідуальні засоби захисту, які одночасно захищають від дії високих температур та від радіонуклідів. Особливу увагу потрібно зосередити на захисті органів дихання, що дозволить уникнути проникнення радіоактивних елементів в організм через органи дихання. Також доцільно використовувати індивідуальні дозиметри для інформування про рівень радіації.

4.2. Способи та засоби осадження пилу та диму в умовах лісової пожежі

Одним із способів вирішення проблеми поширення пилу та продуктів горіння, що містять радіоактивні елементи, є їх осадження. Такий спосіб є важливим для захисту пожежників, які здійснюють гасіння лісової пожежі. Реалізують осадження розпиленням води або створенням водяних завіс, які також зменшують інтенсивність інфрачервоного випромінювання.

Об'ємна активність сумішей радіонуклідів у аерозолях приземного шару атмосферного повітря у активній фазі лісової пожежі зростають у 600 разів у порівнянні з фоновими значеннями [120]. Результати моделювання [121] показали, що зі збільшенням швидкості вітру від 1 м/с до 5 м/с розмір зони ураження збільшується в 2,7 рази, а концентрація небезпечного газу в хмарі падає в 2,5–3 рази. Запропоновано алгоритм інтеграції розробленої методики прогнозування рівня хімічного забруднення атмосфери в загальний цикл управління надзвичайними ситуаціями.

Були проведені повномасштабні експерименти [122] та чисельне моделювання для вивчення ослаблення теплового випромінювання від великих пожеж завісою водяного туману з низьким і проміжним тиском. Для чисельного моделювання використовувався симулятор динаміки пожежі (версія 6). Нова мультиінжекторна форсунка була розроблена для створення однорідної завіси водяного туману з низьким споживанням води.

Характеристики водяного туману однієї з форсунок були виміряні за допомогою технології Shadowgraphy. Джерелом пожежі вважали пожежу дизельного басейну розміром 1×1 м. Експериментальні результати показують, що завіса водяного туману має високу ефективність ослаблення теплового випромінювання, наприклад, близько 82,7% променистого теплового потоку може бути ослаблено водяною завісою з робочим тиском 2 МПа та швидкістю потоку 13,3 л/хв. Порівняння з експериментальними результатами показує, що розраховані радіаційний тепловий потік і температура дещо занижені.

У роботі [123] пропонується методика розрахунку теплопоглинання порції води залежно від діаметра монодиспергованих водяних крапель та впливу дисперсності на інтенсивність подачі води для забезпечення гасіння вогнища пожежі.

Виконано порівняльні розрахунки коефіцієнту пропускання теплового випромінювання для типової захисної водяної завіси за двома методиками: традиційною і новою, розробленою автором на основі математичної моделі. За допомогою нової розрахункової методики визначено конструктивні параметри та режими технологічного обладнання, які дозволяють при тих самих витратах води отримати зниження інтенсивності теплового випромінювання у декілька разів [124].

У Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності розроблено пристрій для осадження продуктів горіння, зниження температури та збільшення видимості в задимлених приміщеннях, який складається з корпусу, з'єднувальної муфти, манометра, перекидного крана, патрубку, насадки-розпилювача та кріплення пристрою до димовсмоктувача, який відрізняється тим, що до переносного осьового пожежного димовсмоктувача кріпиться пристрій для розпилення дрібнодисперсної води, що покращує осадження продуктів горіння, в свою чергу, збільшує видимість та понижує температуру [125]. Проте цей пристрій призначений для гасіння внутрішніх пожеж, а його використання під час гасіння лісових пожеж у забруднених радіонуклідами лісах не буде ефективним.

Запропоновано [126] просту розрахункову модель для визначення ослаблення інфрачервоного випромінювання пожежі за допомогою струменя, насиченого краплями води. Він враховує як явища розсіювання, так і явища поглинання на краплях. Досліджено оптичні властивості води в ІЧ-діапазоні та враховано в розрахунку. Представлені результати, отримані для різних діаметрів крапель і різних введених кількостей.

В роботі [127] наведено результати експериментальних досліджень ефективності використання радіальної водяної завіси від теплового випромінювання. Експериментами встановлено, що коефіцієнт екранування від теплового випромінювання в основному залежить від товщини водяної завіси. Отримані залежності дають можливість визначити величину коефіцієнта екранування водяною завісою як функцію її відстані від джерела випромінювання, товщини завіси та координати точки, яка сприймає теплове випромінювання.

Вибухонебезпечний водяний туман сильно пригнічує горіння за допомогою механізму зниження температури та ізоляції кисню з метою задушення тощо. Крім того, вибухонебезпечний водяний туман має порівняно великий імпульс, що дозволяє йому проходити крізь дим і діяти на поверхню палива, оскільки у нього велика швидкість [128].

При детальному розгляді компактного та розпиленого водяних струменів можна спостерігати наявність двох фаз: компактної (активної) та розпиленої (пасивної). У всіх випадках застосування цих струменів для охолодження, зрошення та захисту фізичних об'єктів від теплового впливу факела полум'я використовують тільки активну фазу, оскільки, як показують експерименти у полігонних умовах, тільки ця фаза струменя є суцільним потоком і тому повністю виконує функцію охолодження чи поглинання (екранування) теплової енергії. Розпилений водяний струмінь, створений за допомогою спеціального насадка та встановлений як вертикальна водяна завіса віялового типу при переорієнтуванні у горизонтальну площину спроможний діяти на палаючу площу низової лісової пожежі на довжину до 30 м із сектором розпилення води 47° [129].

Розпилення води та створення водяних завіс здійснюють за допомогою спеціального обладнання. Під час гасіння лісових пожеж або проведення дій з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на об'єктах хімічної, нафтохімічної та нафтопереробної промисловості для створення потужних розпилених струменів або щільної водяної завіси використовують турбінні й щілинні розпилювачі НРТ-5,10,20 та РВ-12. Насадки-розпилювачі НРТ-5,10 та РВ-12 встановлюють на ручні стволи замість стандартного насадка (наприклад, РС-70), а на лафетний ствол СЛК-П20 встановлюють насадок-розпилювач НРТ-20. Розпилювач щілинний (рис. 4.2 а) застосовується, як додатковий насадок на ствол пожежний ручний РС-70 і призначений для створення щільної водяної завіси. Насадок-розпилювач турбінний (рис. 4.2 б) застосовується, як додатковий насадок на ствол пожежний ручний РС-70 і призначений для формування і направлення розпиленого струменя води під час гасіння пожеж [103].



а



б

Рисунок 4.2 – Розпилювачі: а – насадок-розпилювач щілинний; б – розпилювач турбінний [103]

Хоча у більшості випадків такі насадки застосовують під час гасіння розлитих легкозаймистих рідин [103], їх можна, як і наведені вище ручні стволи, застосовувати для осадження аерозолі, пилу та зрошення поверхні під час гасіння лісових пожеж. Основні технічні характеристики таких насадків наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики насадків та розпилювачів [103]

Параметри	Турбінні розпилювачі			Щілинний розпилювач РВ-12
	НРТ-5	НРТ-10	НРТ-20	
Витрати води, л/с	5	10	20	12
Довжина струменя, м	20	25	35	-
Висота водяної завіси, м	10	12	15	8
Товщина водяної завіси, м	1,2	1,5	2,0	1,2
Площа захисної завіси, м ²	50	100	200	100
Маса, кг	0,8	0,8	0,8	1,3

Використовуючи дані таблиці 4.3, оцінимо ефективність наведеного обладнання з урахуванням показників: витрата води (мінімум), висота водяної завіси (максимум), товщина водяної завіси (максимум), площа захисної завіси (максимум) та маса (мінімум). Інтегральні коефіцієнти наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Інтегральні показники ефективності насадків розпилювачів

Показники	Турбінні розпилювачі			Щілинний розпилювач РВ-12
	НРТ-5	НРТ-10	НРТ-20	
Інтегральний показник	0,24	0,48	0,49	0,11

Найбільш ефективними є турбінні розпилювачі НРТ-20 та НРТ-10, меншу ефективність має НРТ-5, а найнижчу – щілинний розпилювач РВ-12.

У випадку використання насадків розпилювачів при доволі прийнятних площах зрошення, розглянуте обладнання має значні витрати, в умовах пожеж в природних екосистемах за критичної обмеженості сил та засобів для гасіння пожежі, не є доцільне для групового захисту та використання по площі.

Таким чином, на основі аналізу існуючих методів та пристроїв для створення водяної завіси, осадження небезпечних речовин та захисту пожежних-рятувальників і обладнання від впливу високих температур, можна зробити висновок, що недостатня увага приділяється саме груповим методам та пристроям захисту, які є більш ефективними в умовах лісових пожеж, адже швидкість поширення пожежі саме в лісовій місцевості, зокрема низової є доволі велика.

4.3. Пристрій для створення водяної завіси з метою осадження радіоактивних елементів під час гасіння лісових пожеж

Проблема водопостачання при такого роду пожежах, це звичне явище, тому прокладена магістральна (робоча) лінія від пожежного автомобіля може сягати сотні метрів, а то і більше, що в свою чергу наражає на небезпеку пожежних-рятувальників, які працюють далеко від місця встановлення пожежно-рятувального автомобіля. Прорив пожежного рукава, відсутність радіозв'язку, недостатня кількість особового складу, поломка пожежно-рятувального автомобіля або несправність пожежного насосу, можуть наражати ствольника на небезпеку спровокувати безпечний відхід пожежного-рятувальника в безпечне місце та оточення пожежного по усіх периметрах вогнем. Для попередження такого явища доцільно було б використовувати пожежний рукав для створення водяної завіси, який за допомогою розпилення води забезпечував безпечні умови для роботи на пожежі, а також попереджував би розповсюдження лінії вогню. Але пристрої для створення водяної завіси виконані у формі перфорованого пожежного рукава мають ряд недоліків, а саме: відсутність можливості регулювання витрати води, може виникнути перекручування рукавної лінії, неможливість подовження рукавної лінії та використання пожежного ствола, характеристики площі зрошення розпилювачів рукава є незмінними. Таким чином, актуальним є завдання розробки

спеціалізованого пристрою для створення водяної завіси з можливістю використання його під час ліквідації, з метою попередження можливого поширення, осадження радіоактивного пилу, хмари та захисту від теплового навантаження пожежних під час гасіння низових пожеж [130].

Відомий пожежний рукав для створення водяної завіси (патент RU138957U1 від 27.03.2014). Він належить до допоміжних пристроїв, що підвищують рівень безпеки і технологічність пересування пожежників під час гасіння вогню. Пожежний рукав для створення водяної завіси – це гнучка трубчаста конструкція з сполучними гайками на роз'ємах рукава, по довжині рукава виконані перфорації, а один кінець рукава забезпечений заглушкою. Перфорації сформовані за допомогою преса, нанесені на зовнішню поверхню рукава і розташовані на поверхні останнього уздовж поздовжньої осі в шаховому порядку.

Також відомий мобільний пристрій постановки водяної завіси (патент RU2583905C1 від 10.05.2016). Пристрій постановки водяної завіси містить гнучкий трубопровід на основі напірного пожежного рукава, заглушений з одного боку, який підключається до стаціонарних (зовнішніх або внутрішніх пожежних кранів будівель і споруд) або мобільних (пожежних машин, мобільних насосних установок) джерел водопостачання, включає поперемінно рознесені на відносно невелику відстань від центральної площини створюваної водяної завіси, запресовані по всій довжині напірного пожежного рукава, випускні патрубки.

Пристрої для створення водяної завіси, що виконані у формі пожежного рукава, мають ряд невирішених задач, що полягають у регулюванні витрати води, перекручуванні рукавної лінії, продовженні рукавної лінії та використанні пожежного ствола, яке неможливе у зв'язку з втратами напору, незмінних характеристиках площі зрошення.

Також відомим аналогом запропонованого пристрою є насадка для водяної завіси (патент US3252661A від 24.05.1966). Насадка для водяної завіси містить, як правило, плоску направляючу пластину, короткий трубчастий елемент, жорстко прикріплений до пластини, і різьбовий з'єднувальний елемент, що з різьбленням зачіплює короткий трубчастий елемент. Трубчастий елемент має виріз або зазор,

що прилягає до направляючої пластини, що визначає кутову протяжність розпилювальної завіси, тоді як з'єднувальний елемент має скошений край, відповідно до різьбового з'єднання з трубчастим елементом, який контролює товщину струменю, що видає розпилювач через щілину. З'єднувальний елемент має, переважно, достатню довжину, щоб утримувати направляючу пластину у вертикальному положенні під час використання. Дана насадка має кут розпилення 180 градусів, незмінні характеристики розпилення, складну конструкцію.

Запропонований пристрій створення водяної завіси з можливістю використання при ліквідації, для попередження осадження радіоактивного пилю, хмари та захисту від теплового навантаження пожежних під час гасіння низових пожеж.

Конструкція виконана таким чином, що на різьбове з'єднання, яке знаходиться у верхній частині пристрою є можливість встановлення різного виду форсунок, необхідних для локалізації та ліквідації певного виду надзвичайних ситуацій.

Пристрій створення водяної завіси (рис. 4.3) складається з металевого корпусу 1, двох з'єднувальних головок 2, фіксуючого металевого стержня 3, штуцера 4 для встановлення форсунки 5 та крана 6.

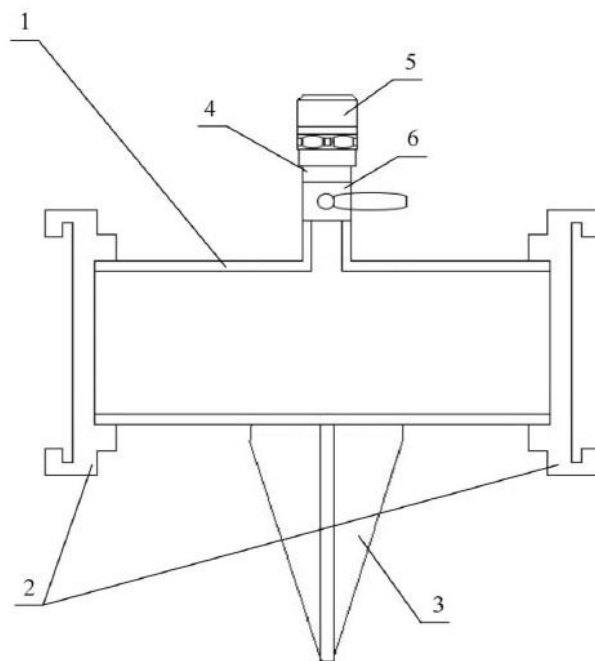
Пристрій створення водяної завіси працює наступним чином. Пристрій знерухомлюють за допомогою фіксуючого металевого стержня 3, вибирають необхідну форсунку 5 та встановлюють її на штуцер 4, пожежні рукава під'єднують до з'єднувальних головок 2. За необхідності встановлюють кілька пристроїв одночасно, з'єднуючи їх між собою пожежними рукавами. На останній пристрій встановлюють заглушку або закріплюють рукавну лінію. Для подачі вогнегасної речовини відкривають кран 6.

Вода від насоса по пожежних рукавах надходить до пристрою створення водяної завіси, потрапляє в корпус 1 та через кран 6 до штуцера 4 і далі до форсунки 5, виходячи з якої вода розпилюється, створюючи водяну завісу. Зміну параметрів водяної завіси виконують краном 6.

Для гасіння лісових пожеж такі пристрої можуть бути з'єднані послідовно в тупикову або кільцеву лінію, побудовану з пожежних рукавів. Такий спосіб дозволить підвищити ефективність гасіння лісових пожеж, зменшивши негативні наслідки для лісових територій.



а



б



в

Рисунок 4.3 – Пристрій 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.

Отже, запропонований пристрій для створення водяної завіси може використовуватися під час гасіння пожеж на забруднених радіацією територіях та забезпечувати осадження радіонуклідів у складі диму та пилу. Робочі параметри запропонованого пристрою для створення водяної завіси потребують окремого дослідження.

4.4. Ефективність роботи пристрою для створення водяної завіси

Дослідження ефективності запропонованого пристрою для створення водяної завіси проведено на базі Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. Для створення напору води використано насосний агрегат (див рис. 2.2) та на стенді (див рис. 2.1) проведено дослідження параметрів пристрою для створення водяної завіси.

Експериментальні дані отримані щодо зміни тиску, витрати води, радіуса розпилення при подачі води через пристрій для створення водяної завіси. Емпіричні залежності витрати води від тиску і радіуса розпилення від тиску отримані шляхом апроксимації експериментальних даних у вигляді поліноміальних рівнянь. Це, в свою чергу, дозволило отримати залежність інтенсивності поливу від тиску.

Для проведення досліджень до експериментального стенду прикріплюють пристрій для створення водяної завіси (рис. 4.4).

Далі відкривалася запірна арматура і до пристрою для створення водяної завіси подавалася вода.

За рахунок збільшення частоти струму за допомогою частотного перетворювача було досягнуто підвищення тиску води в системі. Дані про витрату та тиск автоматично записувалися щосекунди. Починаючи з тиску в 1 бар, радіус зони розпилення вимірювався через кожні 0,5 бар.



Рисунок 4.4 – Дослідження радіуса розпилення вогнегасної речовини пристроєм для створення водяної завіси

За результатами експериментальних досліджень з використанням розробленого пристрою для створення водяної завіси отримано залежність витрати рідини від часу (рис. 4.5).

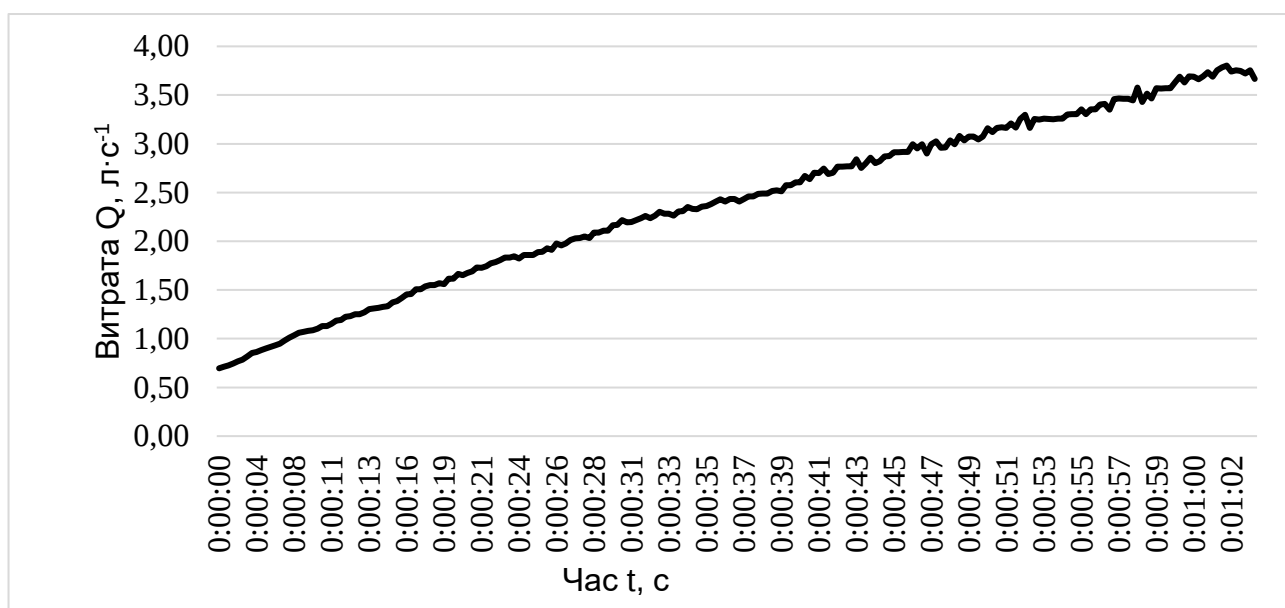


Рисунок 4.5 – Залежність витрати від часу роботи пристрою для створення водяної завіси

Залежність тиску від часу наведена на рис. 4.6.

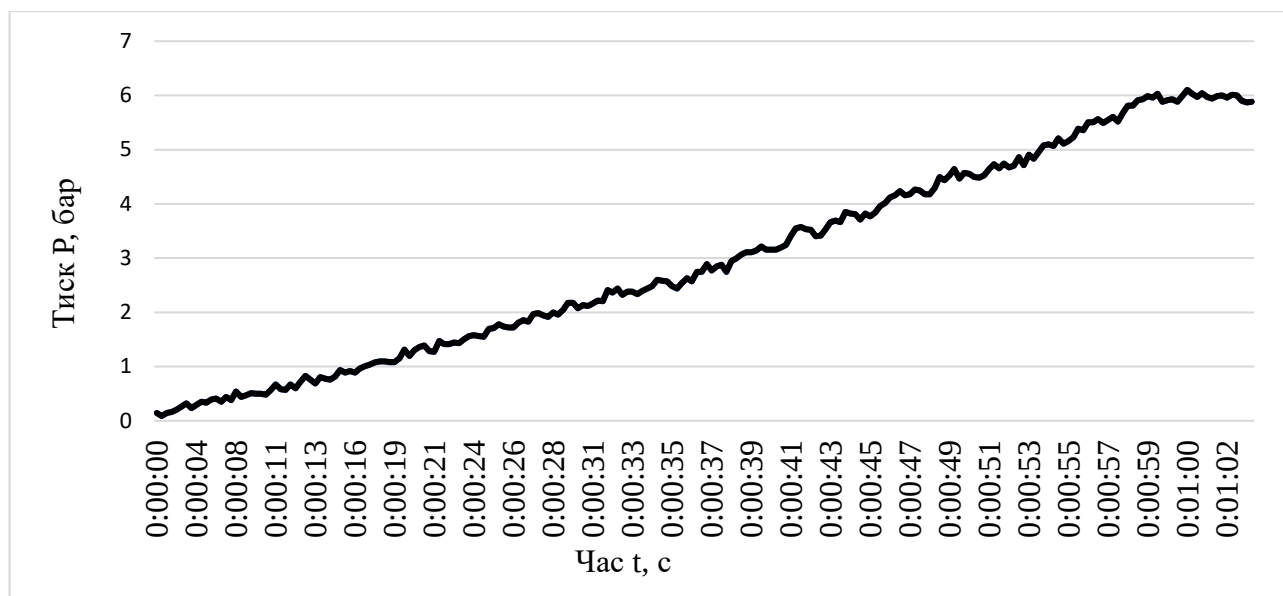


Рисунок 4.6 – Залежність тиску від часу роботи пристрою для створення водяної завіси

Залежність витрати рідини від тиску, отримана за результатами досліджень, наведене на рис. 4.7.

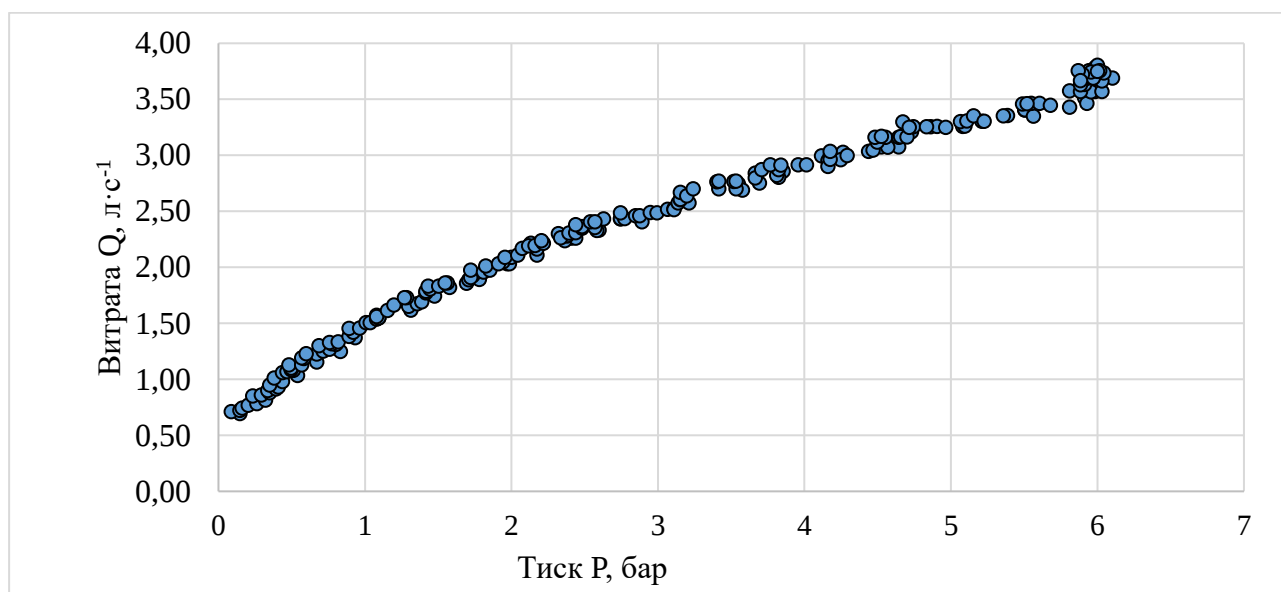


Рисунок 4.7 – Залежність витрати від тиску під час роботи пристрою для створення водяної завіси

З графіка (рис. 4.7) видно загальну залежність витрати від тиску. За максимального тиску в 6 бар витрата становить близько 3,5 літрів за секунду, що дозволяє використовувати пристрій як індивідуально, так і в групі, використовуючи існуюче гідравлічне пожежне обладнання для створення водних завіс, з метою гасіння і захисту від надмірного теплового випромінювання, а також під час локалізації аварій, пов'язаних з викидом токсичних і радіоактивних речовин з метою осадження токсичних або радіоактивних хмар.

Для визначення можливостей пристроїв для створення водяної завіси при поверхневому зрошуванні необхідно розрахувати інтенсивність поливу поверхні A , для цього необхідно виявити залежність формули (4.1):

$$q = f(Q, r), \quad (4.1)$$

де: q - інтенсивність поливу, Q - витрата, r - радіус зони розпилення.

Залежність витрати Q від тиску P можна представити у вигляді емпіричної залежності, отриманої шляхом апроксимації кривої (рис. 4.7) формулою:

$$Q = 0,0126P^3 - 0,1599P^2 + 1,0164P + 0,5986. \quad (4.2)$$

Оскільки коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,996$ є високим, то отримана модель відповідає експериментальним даним та може використовуватися для обчислень у відповідному діапазоні.

Залежність радіуса зони розпилення r від тиску P аналогічно отримано апроксимацією кривої (рис. 4.8) за формулою:

$$r = -0,0125P^3 + 0,1247P^2 + 0,2119P - 0,0433. \quad (4.3)$$

Високий коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,993$ свідчить про відповідність моделі отриманим експериментальним даним.

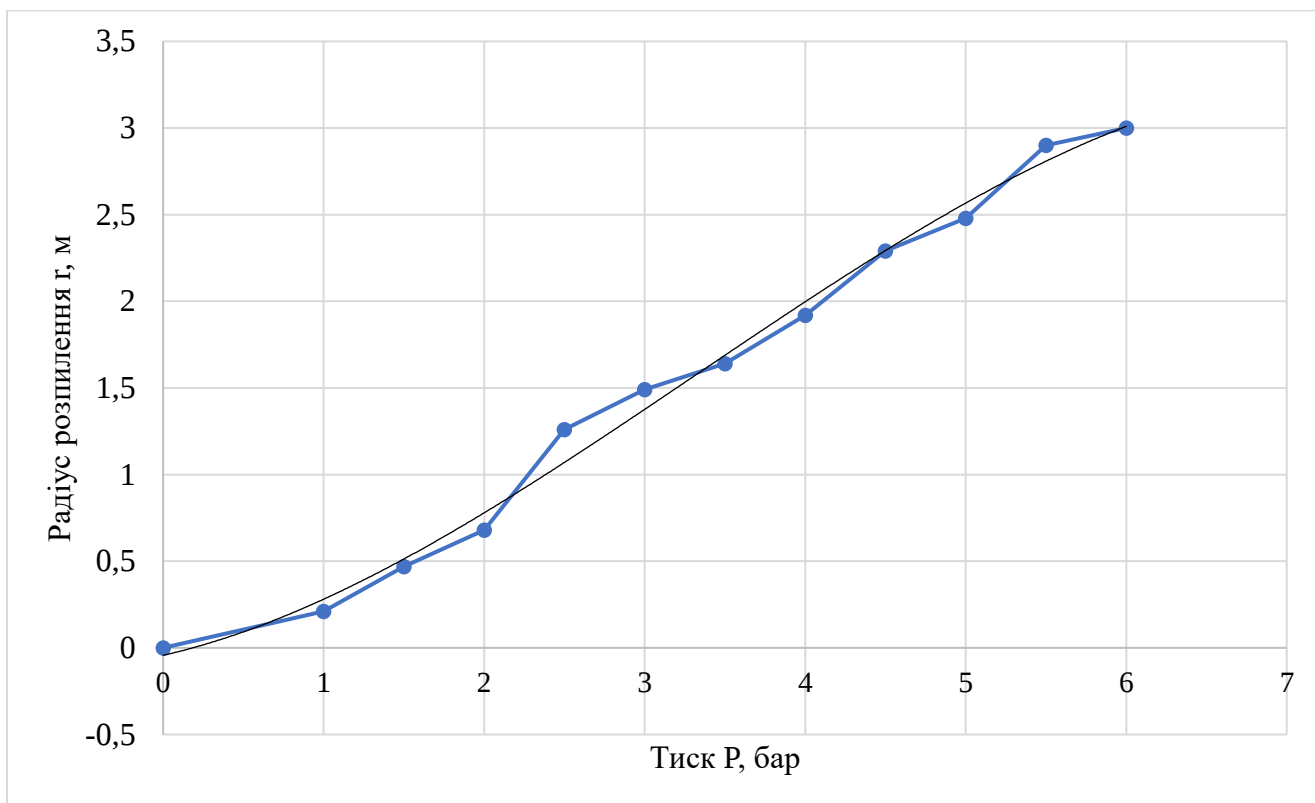


Рисунок 4.8 – Залежність радіуса розпилення пристроєм для створення водяної завіси від тиску

Припустивши, що інтенсивність зрошування в метрах зони зрошення q є рівномірною, отримаємо вираз у формулі:

$$I = \frac{q}{\pi r^2}. \quad (4.4)$$

З урахуванням залежностей (4.3) і (4.4) отримаємо формулу:

$$I = \frac{0,0126P^3 - 0,1599P^2 + 1,0164P + 0,5986}{\pi(-0,0125P^3 + 0,1247P^2 + 0,2119P - 0,0433)^2}. \quad (4.5)$$

Результати розрахунків інтенсивності зрошування пристроєм для створення водяної завіси в залежності від тиску наведені на графіку (рис. 4.9):

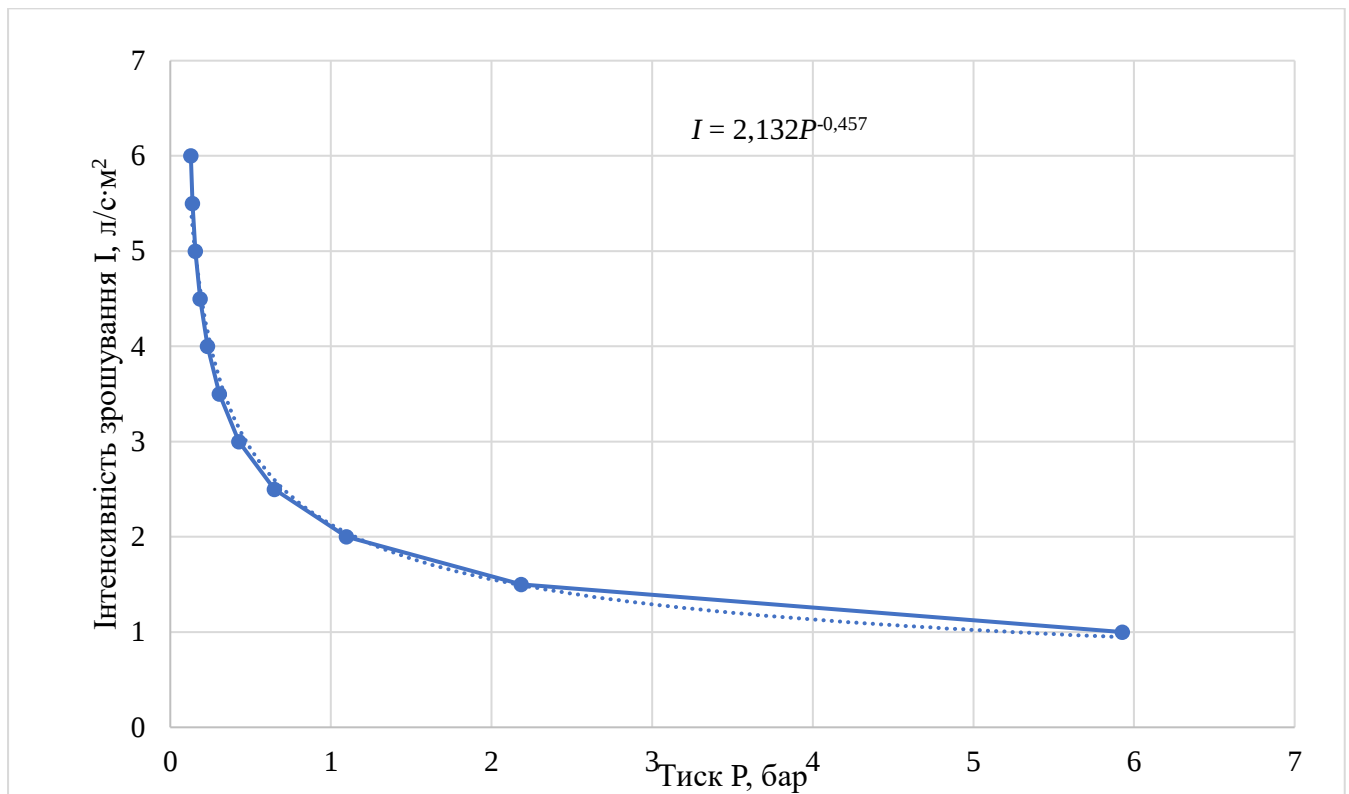


Рисунок 4.9 – Інтенсивність зрошування пристроєм для створення водяної завіси в залежності від тиску (пунктиром зображено апроксимацію степеневою функцією)

Отримані результати можуть бути використані при розрахунку схем гасіння пожеж в поверхневих шарах торфу, трав'яних пожеж в лісах.

Виходячи з них, можна сформулювати математичну модель зрошування з пристроєм для створення водяної завіси:

$$\begin{cases} Q = 0,0126P^3 - 0,1599P^2 + 1,0164P + 0,5986 \\ r = -0,0125P^3 + 0,1247P^2 + 0,2119P - 0,0433 \\ I = \frac{0,0126P^3 - 0,1599P^2 + 1,0164P + 0,5986}{\pi(-0,0125P^3 + 0,1247P^2 + 0,2119P - 0,0433)^2} \end{cases} \quad (4.6)$$

Застосувавши метод апроксимації степеневою функцією, залежність інтенсивності від напору (4.5) у математичній моделі (4.6) можна з високим коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,986$ подати у вигляді

$$I = 2,132P^{0,457}. \quad (4.7)$$

Тоді математична модель набуде вигляду

$$\begin{cases} Q = 0,0126P^3 - 0,1599P^2 + 1,0164P + 0,5986 \\ r = -0,0125P^3 + 0,1247P^2 + 0,2119P - 0,0433 \\ I = 2,132P^{0,457} \end{cases} \quad (4.8)$$

Порівняємо запропонований пристрій створення водяної завіси з існуючими розпилювачами за інтегральними показниками, наведеним в таблиці 4.4. Результати наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – 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 існуючих.

Отже, розроблена математична модель зрошення пристроєм водяної завіси, може бути використана для розрахунку зон зрошення кожного окремого зрошувача в системі з послідовним підключенням для гасіння лісових пожеж. Модель дозволить після гідравлічного розрахунку системи насос-рукав за допомогою послідовно з'єднаних форсунок визначити параметри такої системи, зокрема,

вхідний тиск у системі та відстань між форсунками. За інтегральною оцінкою ефективністю запропонований пристрій поступається НРТ-20 та НРТ 10, але у разі послідовного підключення сумарна ефективність буде вищою.

4.5. Підвищення ефективності роботи пожежників до дій в умовах задимлення та підвищеного радіаційного фону

В умовах лісової пожежі відбувається зростання температури до небезпечних показників, виникає задимленість, загазованість, можливим є падіння обгорілих дерев, а також обвалення. Під час проведення розвідки та безпосереднього гасіння пожежі, пожежні підрозділи зіштовхуються з вище зазначеними факторами, що в свою чергу уповільнюють процес проведення розвідки, евакуації та рятування людей, локалізації й ліквідації пожежі. 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.

Каска пожежного (патент KR20190095032A від 14.08. 2019) призначена для захисту голови під час виконання робіт в непридатному для дихання середовищі. Основними елементами запропонованого пристрою є тепловізійна камера, блок управління та живлення, датчики температури, вологості, складу повітря, а також температури, тиску та пульсу пожежного. З допомогою GPS модуля можливе визначення місцезнаходження, а пристрій Wi-Fi забезпечує передавання інформації на пульт керування. Інформація виводиться на дисплей, який складається з прозорої панелі прямокутної форми, що знаходиться перед обличчям пожежного на кронштейні.

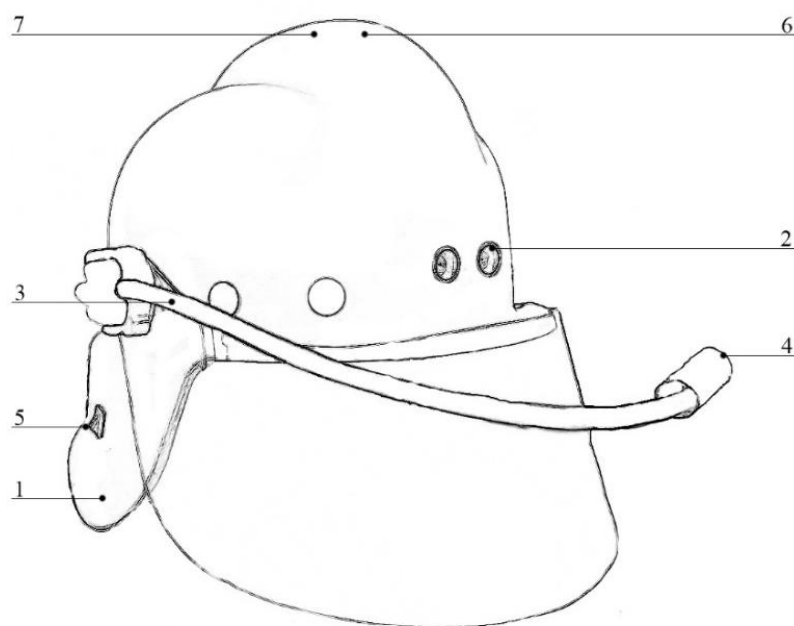
Також відомий пожежний шолом C-Thru Smoke Diving Helmet [131] – каска з забралом, яка дає можливість пожежному працювати за низької або нульової видимості в щільному димі та орієнтуватися в просторі. В шоломі використовується доповнена реальність: в умовах обмеженої видимості камера тепловізора проєктує зображення поверх тієї картини, яку бачить пожежний, а також демонструє командний, комунікаційний і тепловізійний інтерфейс.

Простим за конструкцією є пожежний шолом (патент № RU192698U1 від 26.09.2019), у якому використовується ультразвуковий датчик. Пожежний шолом включає каску з забралом і датчик розташування, розташований на касці і захищений вогнетривким корпусом. Також пристрій містить дисплей для виведення графічної інформації, мікропроцесор для обробки отриманої інформації. Недоліком даної конструкції є розташування ультразвукового датчика зовні шолома, що в свою чергу не захищає його від небезпечних чинників пожежі таких як, високої температури, а дисплей, місце кріплення якого для виводу інформації розташовано на забралі пожежної каски, перешкоджає повноцінному огляду навколишньої обстановки при роботі на відкритому повітрі та за умов коли пристроєм для орієнтації не користуються, але роботу виконують із опущеним забралом для захисту обличчя та очей. Також даний спосіб кріплення не дозволяє сфокусувати зір пожежного на даному дисплею та отримати необхідну інформацію, тому що відстань між обличчям пожежного в касці та дисплеєм є занадто малою. У пристрої відсутня кнопка вмикання і вимикання, яка доцільна в ситуації коли використання пристрою непотрібне, а інформація, яка виводиться на екран, буде заважати виконанню завдання.

На основі аналізу існуючих рішень запропоновано пристрій для орієнтації пожежного в мовах обмеженої видимості, з захищеними елементами конструкції пристрою від дії небезпечних факторів пожежі, можливістю виведення інформації за потреби та в зручному для пожежника місці [132]. До складу пристрою входить ультразвуковий датчик, який вбудовано у каску, екран для виведення інформації про відстань до перешкоди, який закріплено на гнучкому кронштейні, а також кнопка для вмикання і вимикання. Загальний вигляд запропонованого пристрою для орієнтації в умовах обмеженої видимості зображено на рис. 4.10. Він складається з корпусу каски 1, в якій вбудовано ультразвуковий датчик 2, гнучкого кронштейну 3, на якому закріплений екран для виведення інформації (про відстань до перешкоди) 4, кнопки для вмикання і вимикання 5, мікропроцесора 6 та блока живлення 7.



а



б

Рисунок 4.10 – Експериментальний взірець (а) та будова пристрою для орієнтації в умовах обмеженої видимості (б): 1 – каска, 2 – ультразвуковий датчик, 3 – гнучкий кронштейн, 4 – екран, 5 вимикач живлення, 6 – мікропроцесор (всередині каски), 7 – блок живлення (всередині каски)

Пристрій для орієнтації в умовах обмеженої видимості працює наступним чином. Під час виконання поставлених завдань в умовах задимленості пожежний

вмикає пристрій вмикачем 5, налаштовує зручне положення екрану для виведення інформації (про відстань до перешкоди) 4, за допомогою гнучкого кронштейну 3, ультразвуковий датчик 2, встановлений в корпусі каски 1, надсилає та отримує сигнали з ультразвукового датчика 2, який визначає відстань до перешкод, які знаходяться безпосередню перед пожежним, мікропроцесор 6 отримує інформацію з ультразвукового датчика 2 та виводить інформацію про відстань до перешкоди на екран для розуміння пожежним відстані до перешкоди 4, блок живлення 7 забезпечує безперебійну роботу пристрою на протязі часу роботи акумуляторної батареї.

Пристрій для орієнтування в умовах обмеженої видимості може бути використано під час рятування людей, для підвищення ефективності проведення розвідки пожежі за рахунок точного визначення відстані до перешкоди, роботи ланок ГДЗС та інших випадка пов'язаних з роботою в умовах обмеженої видимості.

Запропонований пристрій розроблено [133] на базі мікроконтролера ATmega328Pi, ультразвукового датчика вимірювання відстані HC-SR04 та світлодіодного дисплею. Платформа має 14 цифрових входів/виходів (шість з яких можуть бути використані як вихідний широкосмуговий імпульсний модуль), 6 аналогових входів, кварцовий генератор 16 МГц, роз'єм USB, силовий роз'єм. Для роботи необхідно підключити платформу до комп'ютера за допомогою кабелю USB або подати живлення від адаптера AC/DC або батареї [134].

Датчик HC-SR04 використовує ультразвукове випромінювання для визначення відстані до об'єкта. Цей безконтактний датчик забезпечує високу точність і стабільність вимірювань. Діапазон вимірювань від 2 до 400 см. На покази датчика практично не впливає світлове та електромагнітне випромінювання. До складу датчика входить ультразвуковий трансмітер і ресивер. Принцип роботи модуля полягає у вимірі часу, за який ультразвуковий імпульс досягає перепони і повертається назад. Тому під час використання даного пристрою пожежний може в реальному часі за допомогою виносного дисплею слідкувати за відстанню до перешкоди перед ним. Конструкція виконана таким чином, що всі деталі пристрою для орієнтації не заважають рятувальнику виконувати свої оперативні

дії, а навпаки – у задимленому середовищі збільшують швидкість пересування по приміщенню та виконання завдань за призначенням. Принцип вимірювання відстані (рис. 4.11) полягає у наступному.



Рисунок 4.11 – Принцип роботи ультразвукового датчика відстані

Трансмітер датчика випромінює ультразвукову хвилю. Відбившись від об'єкта, хвиля повертається назад до датчика. Знаючи швидкість поширення звуку в повітрі (v) і вимірюючи час між випромінюванням і прийняттям ультразвукової хвилі (t), мікроконтролер проводить обчислення відстані за формулою:

$$S = \frac{v \cdot t}{2}. \quad (4.9)$$

Для ідеальних газів швидкість звуку визначається формулою Лапласа:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R}{M}} T, \quad (4.10)$$

де: γ – показник адіабати газу;

R – універсальна газова стала;

M – молярна маса;

T – абсолютна температура (в К).

Ультразвукові датчики калібруються в повітрі. Швидкість поширення звуку в ньому становить 330 м/с при 0°C температури навколишнього середовища. Швидкість поширення звуку в повітрі в свою чергу практично повністю залежить тільки від температури. Ця залежність зображена на рисунку 4.12.

Крім точності вимірювання відстані, найважливішим критерієм є дальність поширення ультразвукової хвилі або максимальна робоча відстань, до якої датчик здатний проводити вимірювання. У свою чергу ця відстань залежить від згасання звуку. Згасання – це зменшення амплітуди звукового тиску зі збільшенням відстані від джерела звуку (випромінювача датчика). Якщо вимірюваний об'єкт знаходиться на відстані більшій, ніж максимальна робоча відстань, то направлена і відбита назад хвиля буде повністю поглинута середовищем і вимір стає неможливим.

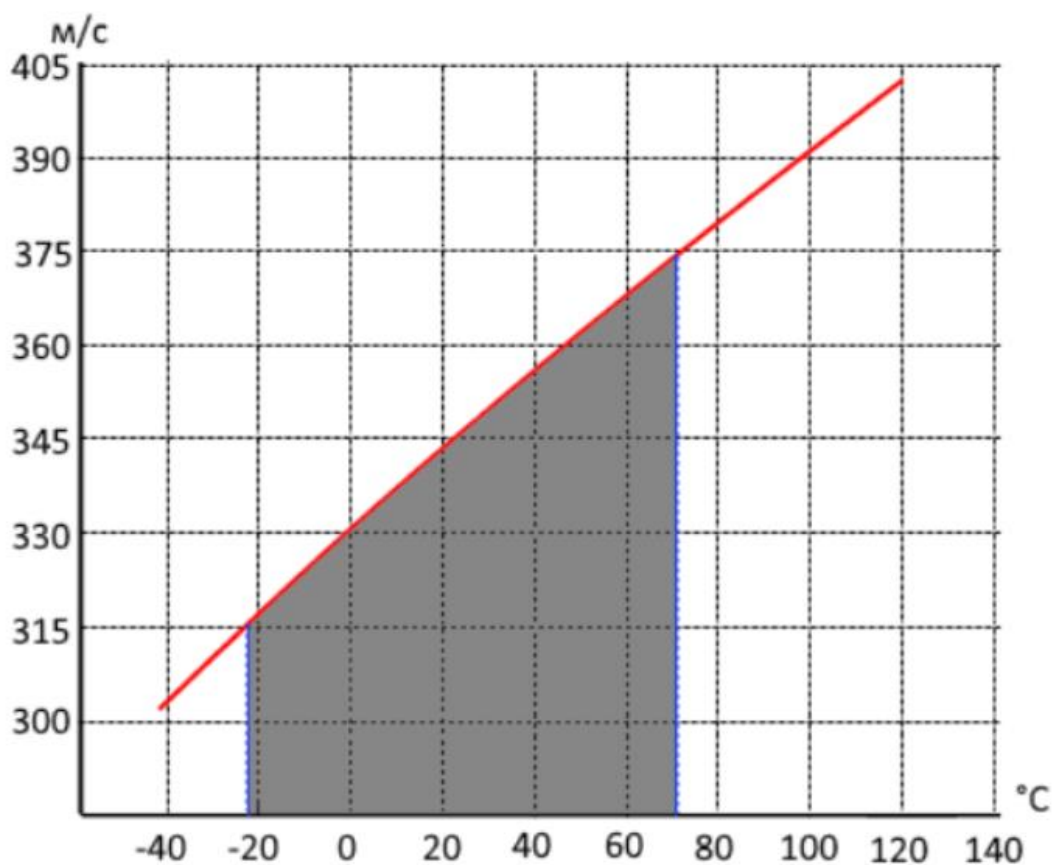


Рисунок 4.12 – Графік залежності швидкості звуку від температури

Згасання звукової хвилі описується формулою:

$$A' = A_0 e^{\delta r}, \quad (4.11)$$

де A_0 – початкова амплітуда хвилі;

A' – амплітуда на відстані r ;

δ – коефіцієнт ослаблення.

Визначають коефіцієнт ослаблення за експериментальними даними, використовуючи формулу (4.12), яку отримують з (4.11):

$$\delta = -\frac{1}{r} \ln \left(\frac{A'}{A_0} \right). \quad (4.12)$$

Інша залежність зв'язує коефіцієнт згасання з параметрами навколишнього середовища, що впливають на поглинання звуку в повітрі:

$$\delta = \left(\frac{\omega^2}{2\rho c^3} \right) \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta + \chi \left(\frac{1}{c_v} + \frac{1}{c_p} \right) \right), \quad (4.13)$$

де: ω – частота ультразвукової хвилі;

ρ – щільність середовища;

c – швидкість поширення звуку в середовищі;

η – коефіцієнт зсувної в'язкості;

ζ – коефіцієнт об'ємної в'язкості;

χ – коефіцієнт теплопровідності;

C_v – теплоємність при постійному об'ємі;

C_p – теплоємність при постійному тиску.

Таким чином, на робочу відстань датчика впливають наступні параметри середовища. Температура: впливає на в'язкість, щільність і швидкість поширення звуку. З ростом температури згасання збільшується і максимальна відстань зменшується. Проте враховуючи роботу пожежника, що рухається в задимленому середовищі, дані зміни не впливають критично на визначення

відстані до перешкоди, адже виступають в ролі додаткової системи орієнтування в задимленому середовищі.

Система для орієнтування у задимленому середовищі на базі розробленого пристрою працює відповідно до розробленого алгоритму (рис. 4.13).

Для перевірки роботи розробленої системи орієнтування в реальних умовах та визначення її параметрів проведені експериментальні дослідження в теплодимокамері на базі навчально-тренувального комплексу навчальної пожежно-рятувальної частини на території ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Метою проведення досліджень було встановлення:

- здатності пожежників орієнтуватися в просторі;
- здатності пожежників виконувати оперативні завдання в умовах різного ступеня задимленості;
- здатності пожежників виконувати оперативні завдання в умовах обмеженого простору.



Рисунок 4.13 – Алгоритм роботи системи орієнтування у задимленому середовищі

Теплодимокамера центру, в якій проходили випробування системи орієнтування, проілюстровані на рис. 4.14, призначена для проведення занять в задимленому середовищі із моделюванням ситуацій різного рівня складності, які можуть виникати на пожежі, підвищення рівня практичних навичок. Вона має два рівні поверховості та приміщення різного призначення, в яких іде моделювання ситуацій, близьких до тих, що відбуваються під час реальної пожежі.



Рисунок 4.14 – Експериментальні дослідження ефективності системи орієнтування у задимленому просторі в теплодимокамері ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.

У випробуванні системи орієнтування брали участь курсанти в кількості 21 чоловік віком від 17 до 19 років. Теплодимокamera заповнювалася димом, формувалися 7 ланок по три особи, та у відповідності до нормативних документів і з дотриманням правил безпеки праці під наглядом викладачів проводився експеримент.

Відлік часу розпочинався із моменту входу і зупинявся у момент повернення ланки на свіже повітря.

Результати випробувань відображені в таблиці 4.6, яка містить значення часу виконання завдання пожежниками у складі ланок без пристрою для орієнтування у задимленому середовищі та з його використанням.

Таблиця 4.6 – 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 4.6, 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 (таблиця 4.7).

Таблиця 4.7 – 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	Середньо-квадратичне відхилення, σ , с	Коефіцієнт варіації V , %	Розмах R , с	Асиметрія Sk	Ексцес 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 таблиці 4.7, 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 з використанням пристрою для орієнтування у задимленому середовищі 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 [135].

Перевірку нормальності розподілів здійснимо за правилом «трьох сігм», обчисливши різниці між середнім значенням та елементом вибірки. Як під час роботи без пристрою, так і з його використанням, абсолютні значення різниць не перевищують величину 3σ , а тому можна вважати розподіли нормальними. Дещо зменшився коефіцієнт асиметрії, який за обох умов експерименту є додатнім та вказує, що вибірка має високу правосторонню асиметрію. Це можна пояснити участю в експерименті курсантів, які мають незначний досвід роботи у

задимленому середовищі, що призводить до зсуву середнього значення часу у сторону зростання. Значення ексцесу свідчить про гостровершинний розподіл.

Перевірку нормальності розподілу здійснимо також шляхом порівняння значень коефіцієнтів асиметрії та ексцесу з їх стандартними похибками, які обчислюють за формулами [136]

$$S_{Sk} = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}}, \quad (4.14)$$

$$S_K = \sqrt{\frac{4(n^2-1)(S_{Sk})^2}{(n-3)(n+5)}}, \quad (4.15)$$

Для $n = 7$ значення стандартних похибок асиметрії та ексцесу становлять $S_{Sk} = 0,79$ і $S_K = 1,59$. Обчислимо частки від ділення коефіцієнтів асиметрії, ексцесу та відповідних стандартних похибок цих величин без пристрою

$$\frac{Sk}{S_{Sk}} = \frac{1,45}{0,79} = 1,83,$$

$$\frac{K}{S_K} = \frac{2,21}{1,59} = 1,39$$

та з його використанням

$$\frac{Sk}{S_{Sk}} = \frac{1,25}{0,79} = 1,58,$$

$$\frac{K}{S_K} = \frac{2,25}{1,59} = 1,42.$$

Оскільки обчислені частки не перевищують 3, то це свідчить, що розподіли можна вважати нормальними. У припущенні нормальностей розподілів для перевірки знайдемо коефіцієнт кореляції Пірсона. Він становить для значень часу без застосування пристрою та із його застосуванням $r = 0,96$ та характеризується як високий. Перевірку значущості коефіцієнта кореляції проведемо з використанням t -критерію. Емпіричне значення обчислимо за формулою

$$t = \frac{|r|\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (4.16)$$

де $n = 7$. Отримуємо $t = 7,39$. Порівняємо його з критичним значенням $t(\alpha, n-2) = t(0,05; 5) = 2,57$. Оскільки емпіричне значення більше за критичне, то коефіцієнт кореляції є значущим. Це свідчить про залежність часу виконання завдання від сформованих ланок, а саме компетентностей осіб, що входять до їх складу.

Високий коефіцієнт кореляції між значеннями часу виконання завдання ланками без застосування та із застосуванням пристрою для орієнтування у задимленому середовищі та зменшення кожного з цих показників та їх середніх значень у випадку застосування цього пристрою свідчить про його ефективність для виконання завдань у задимленому середовищі.

Таким чином, ефективність використання запропонованого пристрою сприяє покращенню орієнтування в задимленому середовищі та зменшує час, потрібний для виконання завдань, що в умовах підвищеної радіації дозволить знизити її негативний вплив на пожежників.

4.6. Висновки до Розділу 4

1. Індивідуальні засоби захисту, зокрема одяг і взуття, повинні захищати пожежника як від дії високих температур, так і від радіонуклідів. Захист органів дихання запобігає проникненню радіоактивних елементів через органи дихання.

2. Запобігти поширенню радіонуклідів під час лісової пожежі на забруднених радіацією територіях можна шляхом осадження пилу та диму за допомогою водяної завіси, утвореної розпилювачами. За інтегральним показником ефективності найбільш ефективними є турбінні розпилювачі НРТ-20 (0,49), НРТ-10 (0,48) та НРТ-5 (0,24), а щілинний розпилювач РВ-12 має найменшу ефективність – 0,11.

3. Запропонований пристрій для створення водяної завіси, який може використовуватися під час гасіння лісових пожеж на забруднених радіацією територіях і забезпечувати осадження радіонуклідів у складі диму та пилу.

4. Розроблена математична модель зрошення пристроєм для створення водяної завіси дає можливість визначати радіус зони розпилення, витрату води та інтенсивність зрошення за допомогою емпіричних залежностей.

5. Для покращення орієнтування пожежника у середовищі за недостатньої видимості запропоновано пристрій орієнтування у задимленому середовищі, який на основі визначення відстані до об'єктів прискорює виконання завдань у складі ланки та підвищує ефективність роботи пожежників на 10,7 %.

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. Розроблена математична 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про затвердження Порядку організації та застосування авіаційних сил та засобів для гасіння лісових пожеж. Наказ МВС України від 13.04.2017, № 311. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0595-17#Text>
2. Гулак О. В. Аналіз причин виникнення лісових пожеж поблизу ЧАЕС. *Международный научный журнал*. № 6, т. 3. 2016, 149-152.
3. Зібцев С. В., Борсук О. А. Охорона лісів від пожеж у світі та в Україні – виклики ХХІ сторіччя та перспективи розвитку. *Лісове і садово-паркове господарство*. 2012. № 1. С. 49-63.
4. Зібцев С. В. Проблема радіаційних лісових пожеж на землях забруднених внаслідок аварії на ЧАЕС. *Наук. вісн. НАУ*. 2007. Вип. 104. С. 88–93.
5. Зібцев С.В., Сошенський О.М., Гуменюк В.В., Корень В.А. Багаторічна динаміка лісових пожеж в Україні. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2019. Т. 10, № 3. С. 27-40.
6. Лагно Д. В., Пелипенко М. М., Ножко І. О. Аналіз існуючих пристроїв створення водяних завіс. *Проблеми пожежної безпеки 2022 («Fire Safety Issues 2022»)* : Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 12 жовтня 2022 р.). Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 196-197.
7. Flannigan M.D., Amiro B.D., Logan K.A., Stocks B.J., Wotton B.M. Forest fires and climate change in the 21st century. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2006. Vol. 11(4). Pp. 847–859. [https:// doi:10.1007/S11027-005- 9020-7](https://doi.org/10.1007/S11027-005-9020-7).
8. Sydorenko V., Yeremenko S., Vambol V., Vambol S., Poberezhna L. Distribution and influence of forest fires on the ecological and radiation situation in radioactively contaminated areas. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. Pp. 318–325. [https:// doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.041](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.041).
9. Annual area burnt by wildfires, 2012 to 2024. Our World in Data. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://ourworldindata.org/grapher/annual->

area-burnt-by-

wildfires?time=earliest..2024&country=USA~CAN~RUS~BRA~OWID_WRL .

10. Найбільші лісові пожежі в Чорнобилі та у світі за останні 20 років. Слово і діло. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://www.slovoidilo.ua/2020/04/15/infografika/suspilstvo/najbilshi-lisovi-pozhezhi-chornobyli-ta-sviti-ostanni-20-rokiv> .

11. Публічний звіт Голови Державного агентства лісових ресурсів України за 2024 рік. Державне агентство лісових ресурсів України. Офіційний сайт. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/uploaded-files/%20%D0%B7%D0%B2%D1%96%D1%82%20%D0%B7%D0%B0%202024%20%D1%80%D1%96%D0%BA.pdf> .

12. Охорона лісів від пожеж. Державне агентство лісових ресурсів України. Офіційний сайт. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisove-gospodarstvo/ohorona-i-zahist-lisiv/ohorona-lisiv-vid-pozhezh> .

13. Лагно Д., Пелипенко М., Ножко І. До питання гасіння лісових пожеж в умовах радіаційного забруднення. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю* (Черкаси, 28-29 жовтня 2021 р.). Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 113-114.

14. Blanc, E., Noy, I. Damages and Costs of Forest Wildfires in New Zealand Using Satellite Data. *EconDisCliCha*. 2024. No 8. Pp. 473–488. <https://doi.org/10.1007/s41885-024-00162-4> .

15. Clarke, H., Cirulis, B., Penman, T. et al. The 2019–2020 Australian forest fires are a harbinger of decreased prescribed burning effectiveness under rising extreme conditions. *Sci Rep*. 2022. No 12. 11871. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15262-y> .

16. Zibtsev, S., Soshenskyi, O., Gumeniuk, V., Yavorovskyi, P., Lakyda, P., Myroniuk, V., & Bogomolov, V. (2020). Wildfires and Fire Management in the

Chornobyl Exclusion Zone during 1986-2020 : monograph. Kyiv : CP “COMPRINT”, 2020. 218 Pp.

17. Liu Y., Chen J., Shi Y., Zheng W., Shan T., Wang G. Global Emissions Inventory from Open Biomass Burning (GEIOBB): utilizing Fengyun-3D global fire spot monitoring data. *Earth System Science Data*. 2024. 16 (8). Pp. 3495—3515. DOI : 10.5194/essd-16-3495-2024 .

18. Навколо Києва пожежі на торфовищах (КАРТА). TEXTY.ORG.UA. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://texty.org.ua/fragments/113432/na-kyyyivshyni-znovu-fiksuyutsya-oseredky-pozhezh-na-torfovyshah-karta/> .

19. Mickler R.A., Welch D.P., Bailey, A.D. Carbon Emissions during Wildland Fire on a North American Temperate Peatland. *Fire ecol.* 2017. No 13. Pp. 34–57. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1301034> .

20. Che Azmi N.A., Mohd Apandi N., A. Rashid, A.S. Carbon emissions from the peat fire problem—a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021. No 28. Pp. 16948–16961. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12886-x> .

21. Kiely L., Spracklen D.V., Arnold S.R. et al. Assessing costs of Indonesian fires and the benefits of restoring peatland. *Nat. Commun.* 2021. No 12, 7044. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27353-x> .

22. Mickler, R.A. Carbon emissions from a temperate coastal peatland wildfire: contributions from natural plant communities and organic soils. *Carbon Balance Manage.* 2021. No 16. 26. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00189-0> .

23. IAEA PRIS Power Reactor Information System [Електронний ресурс] <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx> .

24. Романчук Л. Д. Радіоекологічна оцінка формування дозового навантаження у мешканців сільських територій Полісся України : монографія. Житомир : Полісся, 2015. 300 с.

25. Наукові засади захисту населення і територій від наслідків лісових пожеж з радіаційно небезпечними факторами: монографія / С. І. Азаров, С. А. Єременко, В. Л. Сидоренко та ін.; за заг. ред.. П. Б. Волянського. Київ: ТОВ “Інтердрук”, 2016. 203 с.

26. Лагно Д. В., Пелипенко М. М., Ножко І. О. Пристрій створення водяної завіси. Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 114-116.

27. Давиденко В. М. Радіобіологія. Миколаїв : Видав. МДАУ, 2011. 265 с.

28. Лановенко О. Г., Остапішина О. О. Закон біогенної міграції атомів. Словник – довідник з екології : навч.-метод. посіб. Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2013. 90 с.

29. Yeremenko S., Sydorenko V., Andrii P., Shevchenko R., Vlasenko Y. Existing risks of forest fires in radiation contaminated areas: A critical review. *Ecological Questions*. 2021. Vol. 32(3). Pp. 35-47. DOI 10.12775/EQ.2021.022.

30. Ніжник В. В., Сізіков О. О. Проблемні питання моніторингу та аналізу наслідків пожеж в зоні відчуження чорнобильської АЕС. In *The 13th International scientific and practical conference “Dynamics of the development of world science”* (September 2-4, 2020). Perfect Publishing : Vancouver, Canada, 2020. P. 93.

31. Restás Á., Dudás Z. Some aspect of human features of the use of Unmanned Aerial Systems in a disaster-specific division. *2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, GA, USA, 2013. Pp. 1030-1036, doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564791.

32. Ivaniuta S. New threats to environmental and nuclear security due to russian military aggression against Ukraine. *Scientific Collection «InterConf+»*. 2022. Vol. 22(113). Pp. 366–372. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.06.2022.037>

33. Talerko M., Kovalets I., Lev T., Igarashi Y., Romanenko O. Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020. *Atmospheric Pollution Research*. 2021. Vol. 12(3). Pp. 193-204. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.010> .

34. Masson O. et al. Europe-Wide Atmospheric Radionuclide Dispersion by Unprecedented Wildfires in the Chernobyl Exclusion Zone, April 2020. *Environmental Science & Technology*. 2021. Vol. 55 (20). Pp. 13834-13848. DOI: 10.1021/acs.est.1c03314.

35. Бондар О. І. Мінімізація радіаційних наслідків лісових пожеж після Чорнобильської катастрофи на основі еколого-інформаційного моніторингу : монографія / О. І. Бондар, С. І. Азаров, В. М. Ващенко, В. І. Паламарчук, В. Л. Сидоренко; ред.: О. І. Бондар. Херсон : Грінь Д.С., 2016. 298 с.

36. Maly E. Housing Recovery and Displacement from Fukushima: Five Years Post-Nuclear Meltdown. In: Santiago-Fandiño, V., Sato, S., Maki, N., Iuchi, K. (eds) The 2011 Japan Earthquake and Tsunami: Reconstruction and Restoration. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*. 2018. Vol 47. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58691-5_13 .

37. de Menezes A. B., Gashchak S., Wood M. D., Beresford N. A. Relationships between radiation, wildfire and the soil microbial communities in the Chornobyl Exclusion Zone. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 950. 175381. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175381>

38. Yamamoto L. G. Risks and Management of Radiation Exposure. *Pediatric Emergency Care*. 2013. Vol. 29(9). Pp. 1016-1026. DOI: 10.1097/PEC.0b013e3182a380b8 .

39. Vambol S., Alqahtani F., Todorov Dolchinkov N. et al. Investigation of the Transfer Radioactive Contamination from the Chernobyl Zone and its Impact on Radiation in the Environment. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2024. Vol. 25(12). Pp. 70-84. <https://doi.org/10.12912/27197050/193261> .

40. Popovych V., Henyk Y., Gapalo A., Bosak P., Popovych N. Specific activity of radionuclides in soils disturbed by forest fires. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23(6). Pp. 265-270. <https://doi.org/10.12911/22998993/148191> .

41. Pyuskyulyan K., LaMont S.P., Atoyan V. et al. Altitude-dependent distribution of ¹³⁷Cs in the environment: a case study of Aragats massif, Armenia. *Acta Geochim*. 2020. Vol. 39. Pp. 127–138. <https://doi.org/10.1007/s11631-019-00334-0>

42. Yoschenko V. et al. Formation of Radioactive Aerosol Particles During the Wildland Fires in Chernobyl Zone and their Radioecological Impact. In: Oughton D.H., Kashparov V. (eds) *Radioactive Particles in the Environment*. NATO Science for Peace

and Security. Series C : Environmental Security. Springer, Dordrecht, 2009. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2949-2_4 .

43. Ismaeel A., Aba A., Al-Shammari H. et al. Activity size distributions of radioactive airborne particles in an arid environment: a case study of Kuwait. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. Vol. 27. Pp. 33032–33041. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09367-y> .

44. Masson O. et al. Radioiodine Releases in Nuclear Emergency Scenarios. In: Steinhauser G., Koizumi A., Shozugawa K. (eds) Nuclear Emergencies. *Current Topics in Environmental Health and Preventive Medicine*. Springer : Singapore, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8327-4_15 .

45. Garger E., Talerko M. Re-entrainment of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Air: Experimental Data and Modeling. In: Konoplev, A., Kato, K., Kalmykov, S. (eds) Behavior of Radionuclides in the Environment II. Springer, Singapore, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0_2 .

46. Evangeliou N., Eckhardt S. Uncovering transport, deposition and impact of radionuclides released after the early spring 2020 wildfires in the Chernobyl Exclusion Zone. *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. 10655. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67620-3> .

47. Sýkora I., Povinec P.P. Natural and anthropogenic radionuclides on aerosols in Bratislava air. *J Radioanal. Nucl. Chem.* 2020. Vol. 325. Pp. 245–252. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07219-0> .

48. Imanaka T. Comparison of Radioactivity Release and Contamination from the Fukushima and Chernobyl Nuclear Power Plant Accidents. In: Fukumoto, M. (eds) Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems. Springer : Singapore, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8218-5_20 .

49. Onda Y., Taniguchi K., Yoshimura K. et al. Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020. Vol. 1. Pp. 644–660. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0099-x> .

50. Liu M., Taira Y., Matsuo M. et al. Temporal variation in environmental radioactivity and radiation exposure doses in the restricted areas around the Fukushima

Daiichi Nuclear Power Plant. *Sci. Rep.* 2023. Vol. 13. 22459. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49821-8> .

51. Tsukada M., Inoue K., Ichihara M. et al. Changes in environmental radiation levels in Katsushika Ward, Tokyo after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2021. Vol. 328. Pp. 411–418. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07654-7> .

52. Ichihara M., Inoue K., Fukushi M. et al. Changes on distribution of absorbed dose rates in air in an urban area after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2021. Vol. 329. Pp. 427–435. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07800-1> .

53. Kawai M., Shimo M., Morokuzu M. Safety Evaluation of Radiation Dose Rates in Fukushima Nakadori District. In: Takahashi T. (eds) *Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future*. Springer : Tokyo, 2016. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55848-4_12 .

54. Brudecki K., Szufa K., Mielinski J.W. ^{131}I age-dependent inhalation dose in Southern Poland from Fukushima accident. *Radiat. Environ. Biophys.* 2017. Vol. 56. Pp. 9–17. <https://doi.org/10.1007/s00411-016-0672-3> .

55. Про затвердження Положення про лісові пожежні станції. Наказ Державного комітету лісового господарства України № 526 від 28.12.2005 року. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0047-06#Text> .

56. Про затвердження Порядку організації охорони і захисту лісів. Постанова Кабінету Міністрів України № 612 від 20.05.2022 року. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/612-2022-%D0%BF#top> .

57. Про затвердження Правил пожежної безпеки в лісах України Наказ Державного комітету лісового господарства України № 278 від 27.12.2004 року. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-05#Text> .

58. Carvalho F. P., Oliveira J. M., Malta M. Exposure to radionuclides in smoke from vegetation fires. *Science of the total environment*. 2014. Vol. 472. Pp. 421-424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.073>
59. Fernandez Y., Burghoffer P. Radioactive Aerosols Emission in Fires. *Aerosol Science and Technology*. 1995. Vol. 23(2). Pp. 231–238. <https://doi.org/10.1080/02786829508965306> .
60. Kashparov V. A., Lundin S. M., Kadygrib A. M. et. al. Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters. *Journal of environmental radioactivity*. 2000. Vol. 51(3). Pp. 281-298. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(00\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00082-5) .
61. Eriksen C. Wildfires in the Atomic Age: Mitigating the Risk of Radioactive Smoke. *Fire*. 2022. Vol. 5(1). 2. <https://doi.org/10.3390/fire5010002> .
62. Syarbaini S, Makhsun M, Wahyudi W, Syahrial S, Jasmiyati J. Release of Radioactive Particulates into the Air during Forest Fire in Riau Province, Indonesia. *Atom Indonesia*. 2019. Vol. 45(2). Pp. 81-87. <https://doi.org/10.17146/aij.2019.829> .
63. Hao W. M., Bondarenko O. O., Zibtsev S., Hutton D. Vegetation fires, smoke emissions, and dispersion of radionuclides in the Chernobyl exclusion zone. *Developments in environmental science*. 2008. Vol. 8. Pp. 265-275. [https://doi.org/10.1016/S1474-8177\(08\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S1474-8177(08)00012-0) .
64. Evangeliou N., Balkanski Y., Cozic A. et. al. Fire evolution in the radioactive forests of Ukraine and Belarus: future risks for the population and the environment. *Ecological Monographs*. 2015. Vol. 85. Pp. 49-72. <https://doi.org/10.1890/14-1227.1> .
65. Schöllnberger H., Aden J., Scott B.R. Respiratory Tract Deposition Efficiencies: Evaluation of Effects from Smoke Released in the Cerro Grande Forest Fire. *Journal of Aerosol Medicine* Vol. 2004. Vol. 15(4). Pp. 387-399. <https://doi.org/10.1089/08942680260473461> .
66. Kashparov V., Kirieiev S., Yoschenko V. et. al. Assessment of exposures to firefighters from wildfires in heavily contaminated areas of the Chornobyl Exclusion Zone. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024. Vol. 274, 107410. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2024.107410> .

67. Савельєв Д. І. Чіркїна М. О. Моделювання тушіння низових лісових пожеж за допомогою гелеутворюючих систем шляхом створення вогнезахисної смуги. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. Вип. 45. С. 142-148.

68. Сукач Р. Ю. Підвищення ефективності гасіння низових пожеж в екосистемах : автореф. дис. канд. техн. наук : 21.06.02 / Р. Ю. Сукач; Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Львів, 2021. 24 с.

69. Yu H.-Z. Froude-modeling-based general scaling relationships for fire suppression by water sprays. *Fire Safety Journal*. 2012. Vol. 47. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.09.006> .

70. Pancawardani F., Arini D., Yunindar R.P., Ramadhan M.L., Imran F.A., Nugroho Y.S. Analysis of Water Mist Fire Suppression System Applied on Cellulose Fire. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 170. Pp. 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.049> .

71. Hernandez-Ceballos M.A., Sangiorgi M., García-Puerta B., Montero M., Trueba C. Dispersion and ground deposition of radioactive material according to airflow patterns for enhancing the preparedness to N/R emergencies. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 216. 106178. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106178> .

72. Tang Y., Huang W. Experimental and theoretical study of the effect of particle size on the forward propagation of smoldering coal. *Fuel*. 2022. Vol. 312. 122903. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122903> .

73. Курс лекцій «Радіаційна біофізика» для магістрів кафедри біофізики Навчально-наукового центру «Інститут біології» Київського національного університету імені Тараса Шевченка: навч.-метод. розроб. / упорядн. К.І. Богуцька, Ю.І. Прилуцький, Ю.П. Склярів. Київ : Поліграфічна дільниця Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, 2012. 88 с.

74. Калиненко Л.В., Перепелятніков Г.П., Перепелятнікова Л.В., Євдін О.М., Кимаковська Н.О., Каштан Г.М., Долбіков Г.Є., Захаренко В.І., Чумаченко С.М., Хижняк В.В. Аварійно-рятувальні та інші невідкладні роботи з ліквідації наслідків радіаційних аварій : Довідник рятувальника. К.: УкрНДІЦЗ, 2013. 186 с.

75. Іванов Є.А. Радіоекологічні дослідження: навч. посібник. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2004. 149 с.
76. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) : державні гігієнічні нормативи. ДГН 6.6.1.–6.5.001-98. 135 с.
77. Статут дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж. Наказ МВС України від 26 квітня 2018 р. № 340. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0802-18#Text> .
78. Hulak O., Holiaka, D. Legal principles of forest fire protection on radiation hazardous lands of Ukraine in modern conditions. *Law. Human. Environment*. 2024. Vol. 15(2). Pp. 9-27. <https://doi.org/10.31548/law/2.2024.09> .
79. Azari H. Forest Fires, Risk And Control. *WIT Press*. 2010. Vol. 137. Pp. 233-245. <https://doi.org/10.2495/FIVA100211> .
80. Vaz G., Raposo J., Reis L., Monteiro P., Viegas, D. Rigid Protection System of Infrastructures against Forest Fires. *Fire*. 2022. Vol. 5(5). 145. <https://doi.org/10.3390/fire5050145> .
81. Yamada K., Yamaguchi I, Urata H., Hayashida N. Survey of awareness of radiation disasters among firefighters in a Japanese prefecture without nuclear power plants. *Plos One*. 2020. Vol. 15(7). e0236640. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236640> .
82. Rothman N., Correa-Villasenor A., Ford D.P., Poirier M.C., Haas R., Hansen J.A., O'Toole T., Strickland P.T. Contribution of occupation and diet to white blood cell polycyclic aromatic hydrocarbon-DNA adducts in wildland firefighters. *Cancer Epidemiol Biomark Prev*. 1993. Vol. 2(4). Pp. 341-347.
83. Materna B.L., Koshland C.P., Harrison R.J. Carbon monoxide exposure in wildland firefighting: a comparison of monitoring methods. *Appl. Occup. Environ. Hyg*. 1993. Vol. 8(5). Pp. 479-487.
84. Day M., Sturgeon P. Thermal radiative protection of fire fighters' protective clothing. *Fire Technol*. 1987. Vol. 23(1). Pp. 49-59.

85. Nayak R., Houshyar S., Padhye R. Recent trends and future scope in the protection and comfort of fire-fighters' personal protective clothing. *Fire Sci. Rev.* 2014. Vol. 3. 4. <https://doi.org/10.1186/s40038-014-0004-0> .

86. Geng J., Guo S., Gao Z. W., Wang Z., Peng W. Q. Influence of radiation mode and intensity on the protective performance of firefighting boots. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2024. Vol. 87, 105247. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105247> .

87. Kukfisz B., Polka M. Analysis of means of personal protection for rescuers during in-cidents involving radioactive materials. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*. 2018. Vol. 51, no. 2(188). Pp. 88-104. <http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0012.2493> .

88. Rathour R, Das A, Alagirusamy R. Impact of repeated radiative heat exposure on protective performance of firefighter's protective clothing. *Journal of Industrial Textiles*. 2022. Vol. 52. <https://doi.org/10.1177/15280837221117610> .

89. Lu Y., Wang L., Gao Q. Predicting tensile strength of fabrics used in firefighters' protective clothing after multiple radiation exposures. *The Journal of The Textile Institute*. 2017. Vol. 109(3). Pp. 338–344. <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1345603> .

90. Raimundo A. M., Figueiredo A. R. Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front. *Fire Safety Journal*. 2009. Vol. 44(4). Pp. 514-521. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.10.007> .

91. Cao K., Li Y., Lan M. et al. Impact of cooling vests on the physiological and perceptual responses of firefighters in high-temperature and heat radiation environments. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*. 2024. Vol. 64(6). Pp. 1039-1046. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2024.22.021> .

92. Лепетюха Н. В., Рудська І. О. Інтегральна оцінка ефективності функціонування підприємства. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2016. № 14, С. 424-429,

93. Споришев К. О., Дем'янишин В. М., Яковлев О. В. Таксономічний аналіз як метод визначення порядку евакуації пошкоджених в ході бойових дій

різнотипних зразків озброєння, військової та спеціальної техніки. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2022. Вип. 2 (40). С. 71-76.

94. 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. URL: https://forestry-ideas.info/issues/issues_Index.php?pageNum_rsIssue=1&totalRows_rsIssue=7&journalFilter=73.

95. Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels (Vol. 115). Intermountain Forest & Range Experiment Station, *Forest Service*, US Department of Agriculture, Ogden, 1972.

96. Sullivan A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*. 2009. Vol. 18. Pp. 349-368. <https://doi.org/10.1071/WF06143> .

97. Sullivan A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, 2009. Vol. 18. Pp. 369-386. <https://doi.org/10.1071/WF06142> .

98. Sullivan A. L. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, 2009. Vol. 18. Pp. 387-403. <https://doi.org/10.1071/WF06144> .

99. Alexander M. E. Estimating the length-to-breadth ratio of elliptical forest fire patterns. In *Proceedings of the eighth conference on fire and forest meteorology*. 1985. Vol. 29. Pp. 85-04. Society of American Foresters, Detroit, MI, USA.

100. Glasa J., Halada L. On elliptical model for forest fire spread modeling and simulation. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2008. Vol. 78(1). Pp. 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2007.06.001> .

101. Parks G. M. Development and Application of a Model for Suppression of Forest Fires. *Management Science*. 1964. Vol. 10(4). Pp. 760-766. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.10.4.760> .

102. Grant G., Brenton J., Drysdale D. Fire suppression by water sprays, *Progress in Energy and Combustion Science*. 2000. Vol. 26(2). Pp. 79-130. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00012-X) .

103. Довідник пожежного-рятувальника. Харків, 2017. 114 с.

104. Jones A., Nolan P. F. Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1995. Vol. 8(1). Pp. 17-22. [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(95\)90057-V](https://doi.org/10.1016/0950-4230(95)90057-V) .

105. Сукач Р. Ю., Войтович Д. П., Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б. Створення загороджувальних смуг вогнегасними пінами підвищеної стійкості для запобігання поширенню трав'яних пожеж. *Пожежна безпека*. 2022. № 40. С. 84-91. <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.10> .

106. Кузик А.Д., Попович В.В. Ефективність використання лісових пожежних автомобілів. *Пожежна безпека*. 2010. № 16. С. 18-24.

107. Helicopters/ Firefighting. Airbus. [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://mediaassets.airbus.com/pm_38_379_379366-bxfgykhhgyn.pdf .

108. Eurocopter presents new EC225 Fire-Fighting System. Vertical. February 22, 2010. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://verticalmag.com/news/eurocopter-presents-new-ec225-fire-fighting-system-html/> .

109. Ходаков В. Е., Жарикова М. В. Лісові пожежі : методи дослідження. Херсон : Гринь Д. С. 2011. 470 с.

110. Захматов В. Техніка для гасіння лісових пожеж. *Пожежна безпека*, 2011, № 2, С. 18-21.

111. Heinsch F. A., Andrews P. L. BehavePlus fire modeling system, version 5.0: Design and Features. General Technical Report RMRS-GTR-249. Fort Collins, CO : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2010. 111 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_gtr249.pdf .

112. Wu R., Allison C. S., Carthen C. vFirelib: A GPU-based fire simulation and visualization tool. *SoftwareX*. 2023. Vol. 23. 101413. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101413> .

113. Richards G. D. An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1990. Vol. 30(6), 1163–1179. <https://doi.org/10.1002/nme.1620300606> .

114. Andrews P. L. The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-371. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2018. 121 p. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://research.fs.usda.gov/treearch/55928> .

115. Viegas D. X., Ribeiro C., Barbosa, T. F., Rodrigues, T., Ribeiro, L. M. A Fireline Displacement Model to Predict Fire Spread. *Fire*. 2024. Vol. 7(4). P. 121. <https://doi.org/10.3390/fire7040121> .

116. Національна комісія з радіаційного захисту населення України : Офіційний веб-сайт. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://nkrzu.gov.ua/> .

117. ДСТУ 2273:2006 Протипожежна техніка. Терміни та визначення основних понять.

118. СОУ МНС 75.2-00013528-005:2011 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Комплекси засобів індивідуального захисту рятувальників. Класифікація і загальні вимоги. 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29543 .

119. Про затвердження Норм табельної належності, витрат і термінів експлуатації пожежно-рятувального, технологічного і гаражного обладнання, інструменту, індивідуального озброєння та спорядження, ремонтно-експлуатаційних матеріалів підрозділів ДСНС України. Наказ ДСНС України від 29.05.2013 р. № 358. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0358388-13#Text>

120. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Руденко О.В. Вивчення процесу надходження радіонуклідів у повітря при пожежах у лісах зони відчуження ЧАЕС. *Проблеми пожежної безпеки*. 2011. Вип. 30. С. 16–23.

121. Melnichenko A., Kustov M., Basmanov O. et al. Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 1(10(115)). Pp. 31–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251675> .

122. Zhu P., Wang X., Wang Z., Cong H., Ni X. Experimental and numerical study on attenuation of thermal radiation from large-scale pool fires by water mist curtain, *Journal of Fire Sciences*. 2015. Vol. 33(4). Pp. 269–289. <https://doi.org/10.1177/0734904115585796> .

123. Lusch V. I., Loik V. B., Shtanhret N. O., Matuszkiewicz R. Badania wpływu elementów konstrukcyjnych urządzeń do wytwarzania rozproszonych strumieni wody w celu zmniejszenia produktów spalania i redukcji temperatury podczas pożaru. *Zeszyty Naukowe SGSP*. 2017. Vol. 64. Pp. 125-149.

124. Виноградов А. Г. Методика розрахунків параметрів водяних завіс на основі теорії затоплених струменів. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2013. № 2(28). С. 127-139.

125. Патент UA № 55428 А 62 С 35/00 Пристрій для осадження продуктів горіння, зниження температури та збільшення видимості в задимлених приміщеннях/ Ковалишин В.В., Луц В.І., Мельник П.І. (Україна).4 с; Опубл. 10.12.2010, бюл. №23.

126. Coppalle A., Nedelka D., Bauer B. Fire protection: Water curtains. *Fire Safety Journal*. 1993. Vol. 20(3). Pp. 241-255. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(93\)90046-S](https://doi.org/10.1016/0379-7112(93)90046-S) .

127. Лазаренко О. В., Желяк В. І. Визначення захисної дії радіального водяного екрана. *Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. пр.* 2011. № 8. С. 43-47.

128. Zheng I., Quan W., Experimental Study of Explosive Water Mist Extinguishing Fire, *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 11. Pp. 258-267. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.655>

129. Дендаренко Ю. Ю., Сенчихін Ю. М., Дивень В. І., Блащук О. Д. Ефективність розпиливаних водяних струменів віялового типу в зоні теплового впливу дифузійного факела полум'я. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2019. Т. 3(1). С. 35-41.

130. Пат. 146149 Україна, МПК А62С 3/02 (2006.01), А62С 2/08 (2006.01). Пристрій створення водяної завіси / Лагно Д. В., Ножко І. О., Биченко А. О., Землянський О. М., Кузик А. Д., заявник та патентовласник Лагно Д. В. № у 2020 05865, заяв. 14.09.2020; опубл. 20.01.2021, бюл. № 3.

131. C-Thru Smoke Diving Helmet. Corflot. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://www.coroflot.com/OmerHaciomeroglu/C-Thru-smoke-Diving-Helmet>

132. Пат. 146540 Україна, МПК (2021.01) А42В 3/00. Пристрій для орієнтації в умовах обмеженої видимості / Лагно Д. В., Бас О. В., заявник та патентовласник Лагно Д. В., Бас О. В. № у 2020 07133, заяв. 09.11.2020; опубл. 24.02.2021, бюл. № 8.

133. Бас О., Лагно Д., Ножко І., Пелипенко М. Використання ультразвуку для орієнтування у задимленому середовищі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2021. Т. 5, № 1. С. 15-26. DOI: 10.31731/2524-2636.2021.5.1.-15-26.

134. Arduino. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://www.arduino.cc/>.

135. Данілов В. Я. Статистична обробка даних : навчальний посібник. К. : КНУ ім. Т. Шевченка, 2019. 156 с.

136. Cramer D. Fundamental statistics for social research: step-by-step calculations and computer techniques using SPSS for Windows. London: Routledge, 2003. 455 p.

137. Розробка плану управління пожежами та системи підтримки прийняття рішень для попередження, раннього реагування та радіологічно-безпечного гасіння лісових пожеж у зоні відчуження. Технічний звіт. Україна. Листопад 2020.

[Електронний ресурс]. Режим доступу : https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u184/chrebz_fire_management_plan_fin_7_08.11.21.pdf.

138. Колєнов О.М., Безуглов О.Є., Іщук В.М. Первинна підготовка рятувальника : навчальний посібник. Харків : НУЦЗУ, 2013. 455 с.

139. Довідник керівника гасіння пожежі. За заг. Ред. В. С. Кропивницького. К. : ТОВ «Літера-Друк», 2016. 320 с.

140. Довідник керівника гасіння пожежі. Перша редакція. К.: ДСНС України, 2015. 85 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу : http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/9477/1/Persha_redakciya_dovidnika_KGP_1.pdf .

141. Валь В., Сукач Ю. Особливості застосування гусеничних пожежних машин для гасіння надскладних пожеж арсеналів та складів та вибухонебезпечних речовин. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Зб. наук. праць Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів*. Львів: ЛДУ БЖД, 2023. С. 329-332.

142. Вікович І. А., Лаврівський М. З., Зінько Р. В. Теорія, адаптування та застосування пожежних автомобілів для ліквідації надзвичайних ситуацій : Монографія. Львів: Галицька Видавнича спілка, 2020. 167 с.

143. Писарська Н., Єпіфанов В., Назаренко С. Історія розробки та виробництва тракторів і тягачів Харківськими конструкторським бюро з машинобудування імені ОО Морозова та заводом імені ВО Малишева. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Машинознавство та САПР, 2021. №1. С. 74-80.

144. Товарянський В. І., Ренкас А. А. Застосування протипожежної техніки для ліквідації лісових пожеж в умовах війни в Україні. *Лісові пожежі в умовах війни : збірник тез доповідей Круглого столу*, м. Львів, 24 травня 2024 року. Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 57-61.

145. Ан-32П. Вікіпедія. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD-32%D0%9F>

146. Масштабні лісові пожежі біля ЧАЕС. Хронологія. ТСН. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://tsn.ua/ukrayina/masshtabna-pozhezha-bilya-chaes-hronologiya-podiy-424292.html>

147. Мі-8. Вікіпедія. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D1%96-8>

148. НАПБ 02.013-2006 Положення про пожежні поїзди на залізницях України.

149. Файл:H225 Super Puma helicopter Number 54 in 2020.jpg. Вікіпедія. [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:H225_Super_Puma_helicopter_Number_54_in_2020.jpg

150. Термозахисний костюм спеціальний "Індекс-1". Пожежна безпека України. [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://euroservis.com.ua/ua/termozakhisniy-kostum-spetsialniy-indeks-1/?srsltid=AfmBOorGskD1I0Kjv8_OAF_WXTQzLgOm05KeNmreBW4q8xnJ3UMG0Syl

151. Спеціальний термозахисний костюм «Індекс-1200 (конструкція — комбінезон). Спецодяг та засоби захисту від ПП "Нікатрейд". [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://nikatrejd.com.ua/ua/p704199-spetsialnyj-termozaschitnyj-kostyum.html>

ДОДАТКИ

Додаток А. Список публікацій здобувача за темою 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. *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.

Патент 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. **Лагно 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, урбоєкології 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.

Додаток Б. Відомості про апробацію результатів дисертації

1. Міжнародна науково-практична конференція «Сучасний стан і перспективи розвитку ландшафтної архітектури, садово-паркового господарства, урбоекології та фітомеліорації»

м. Львів: НЛТУ України, 4-5 квітня 2019 р., форма участі – заочна.

2. X Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»

м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 11-12 квітня 2019 р., форма участі – очна.

3. 21 Всеукраїнська науково-практична конференція (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах»

м. Київ: ІДУЦЗ, 8 жовтня 2019 р., форма участі – заочна.

4. XI Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»

м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 9-11 квітня 2020 р., форма участі – очна.

5. X Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»

м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 29-30 жовтня 2020 р., форма участі – очна.

6. XII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»

м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 8-9 квітня 2021 р., форма участі – очна.

7. XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»

м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 28-29 жовтня 2021 р., форма участі – очна.

8. Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми пожежної безпеки 2022 («Fire Safety Issues 2022»))»

м. Харків: НУЦЗ України, 12 жовтня 2022 р. , форма участі – заочна.

9. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»

м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 26 квітня 2022 р., форма участі – очна.

Додаток В. Акти впровадження результатів дисертації

В1. Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження у діяльність Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Чорнобильського
радіаційно-екологічного біосферного
заповідника



Денис НЕСТЕРОВ

« 07 » 2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження ЛАГНА Дениса Вікторовича на тему «Підвищення ефективності гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах» у практичну діяльність Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника

Комісія у складі голови комісії – МЕЛЬНИЧУКА Тараса Васильовича, заступника директора з наукової роботи та міжнародної співпраці, членів комісії ВИШНЕВСЬКОГО Дениса Олександровича, завідувача наукового відділу, БОРСУКА Олександра Анатолійовича, заступника завідувача наукового відділу, ВАРУХИ Альони Василівни, старшого наукового співробітника, склала цей акт про те, що результати дисертаційних досліджень ЛАГНА Дениса Вікторовича впроваджені у практичну діяльність Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника, зокрема запропонований у роботі метод осадження забрудненого радіонуклідами пилу та продуктів горіння під час пожеж у природних екосистемах, та результати оцінювання ефективності протипожежної техніки й обладнання за інтегральними показниками.

Голова комісії:

Тарас МЕЛЬНИЧУК

Члени комісії:

Денис ВИШНЕВСЬКИЙ

Олександр БОРСУК

Альона ВАРУХА

В2. Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з навчальної роботи
Національного університету цивільного
захисту України
полковник служби цивільного захисту



Олександр ДЖУЛАЙ

2025р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження ЛАГНА
Дениса Вікторовича в навчальний процес Національного університету
цивільного захисту України

Комісія у складі: голови комісії — полковника служби цивільного захисту ДЯДЮШЕНКА Олександра Олександровича, начальника навчально-методичного центру; членів комісії:

- полковника служби цивільного захисту ЛІСНЯКА Андрія Анатолійовича, начальника кафедри пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт навчально-наукового інституту оперативно-рятувальних сил;

- полковника служби цивільного захисту МАЙБОРОДИ Артема Олександровича, тимчасово виконуючого обов'язки начальника кафедри інженерної та аварійно-рятувальної техніки навчально-наукового інституту оперативно-рятувальних сил;

- полковника служби цивільного захисту НУЯНЗІНА Віталія Михайловича, начальника кафедри радіаційного і хімічного захисту навчально-наукового інституту інженерної та спеціальної підготовки,

встановила, що результати дисертаційного дослідження ЛАГНА Дениса Вікторовича на тему «Підвищення ефективності гасіння пожеж у забруднених радіонуклідами лісах» впроваджені в освітній процес університету, зокрема в такі навчальні дисципліни:

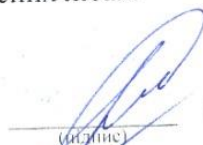
- «Пожежна тактика», тема 1.3 «Гасіння лісових пожеж і пожеж у сільській місцевості та населених пунктах, у тому числі в районах ведення бойових дій», зокрема методи осадження радіоактивного пилу та продуктів горіння, а також заходи захисту рятувальників під час гасіння пожеж у радіаційно забруднених лісах;

- «Реагування на ризики радіаційного та хімічного походження», тема 1.3 «Оцінка ризиків виникнення радіаційних інцидентів в Україні», зокрема методи осадження радіоактивного пилу та продуктів горіння, а також заходи захисту рятувальників під час гасіння пожеж у радіаційно забруднених лісах;

- «Протипожежна та аварійно-рятувальна техніка», тема 3.3 «Основні пожежні автомобілі загального призначення», тема 3.4 «Будова автомобілів

пінного гасіння», зокрема питання застосування пожежних автомобілів під час гасіння пожеж у радіаційно забруднених лісах.

Голова комісії



(підпис)

Олександр ДЯДЮШЕНКО

Члени комісії:



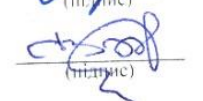
(підпис)

Андрій ЛІСНЯК



(підпис)

Артем МАЙБОРОДА



(підпис)

Віталій НУЯНЗІН

«__» _____ 20__ року

Додаток Г. Патент на корисну модель № 146149



Додаток Д. Патент на корисну модель № 146540

