

УДК 349.2

- Б. М. Цимбал¹, д.держ.упр., доцент, проф. каф. (ORCID 0000-0002-2317-3428)*
Є. О. Рибка¹, д.т.н., проф., проректор з наук. роботи (ORCID 0000-0002-5396-5151)
Є. М. Голобородько¹, здобувач вищої освіти (ORCID 0009-0005-7915-8058)
В. Г. Погребняк², д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-7735-3408)
А. С. Петрищев³, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-2631-1723)
¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна
²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Івано-Франківськ, Україна
³Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОБОТІВ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ

Досліджено теоретичні та прикладні аспекти забезпечення безпечної експлуатації роботизованих систем для гасіння пожеж у складних, динамічних та небезпечних умовах. Обґрунтовано актуальність впровадження роботизованих технологій у практику реагування на пожежі з огляду на необхідність зниження рівня професійних ризиків та підвищення ефективності виконання аварійно-рятувальних робіт. Проведено узагальнений аналіз сучасного стану розвитку роботизованих систем пожежогасіння, що дозволило визначити їх основні функціональні можливості, технічні характеристики, а також переваги порівняно з традиційними засобами. Встановлено, що попри значний технологічний потенціал, використання таких систем супроводжується низкою обмежень, серед яких недостатня адаптивність до впливу високих температур та задимлення, обмежена автономність, нестабільність каналів зв'язку та складність інтеграції в існуючі організаційні структури реагування. У ході дослідження ідентифіковано основні небезпечні фактори та ризики, пов'язані з експлуатацією роботизованих систем, які включають технічні відмови обладнання, збої програмного забезпечення, похибки сенсорних систем, вплив агресивного середовища, а також людський фактор, зокрема помилки оператора в умовах обмеженого часу та підвищеного психоемоційного навантаження. Запропоновано методику оцінювання професійних ризиків, що базується на системному підході та передбачає послідовну ідентифікацію небезпек, аналіз умов їх виникнення, визначення ймовірності реалізації та тяжкості наслідків з подальшим ранжуванням ризиків за рівнем критичності. Обґрунтовано доцільність застосування комплексного підходу до забезпечення безпечної експлуатації роботизованих систем, який поєднує технічні, організаційні та правові заходи. Встановлено, що реалізація запропонованих підходів сприяє підвищенню ефективності функціонування роботизованих систем.

Ключові слова: безпечна експлуатація, професійні ризики, аварійно-рятувальні роботи, технічні відмови, сенсорні системи

1. Вступ

Для того щоб впоратися зі зростаючою кількістю пожежних ситуацій в умовах збройної агресії РФ, суттєво актуалізується проблема підвищення ефективності та безпеки реагування на надзвичайні події. Военні дії спричиняють руйнування об'єктів критичної інфраструктури, промислових підприємств, житлового фонду, що призводить до виникнення масштабних пожеж у складних, динамічних та важкодоступних умовах. У таких ситуаціях традиційні підходи до пожежогасіння часто виявляються недостатньо ефективними через обмежений доступ до осередків займання, високий рівень задимлення, наявність вибухонебезпечних факторів та значні ризики для життя та здоров'я рятувальників.

У зв'язку з цим особливого значення набуває впровадження роботизованих систем пожежогасіння як одного з ключових напрямів технологічного розвитку у сфері цивільного захисту. Сучасні пожежні роботи, оснащені мультисенсорними системами, засобами технічного зору, автономної навігації та дистанційного ке-

рування, здатні виконувати завдання з виявлення, моніторингу та ліквідації пожеж у режимі реального часу. Їх використання дозволяє мінімізувати участь людини у небезпечних зонах, підвищити оперативність реагування, забезпечити безперервний контроль за розвитком пожежі та зменшити матеріальні збитки [1].

Разом із тим, попри значний науково-технічний прогрес у розвитку роботизованих систем, їх практичне застосування в реальних умовах супроводжується низкою суттєвих обмежень та ризиків. До них належать недостатня стійкість до впливу високих температур та агресивного середовища, обмежена автономність та енергозабезпечення, нестабільність каналів зв'язку, похибки сенсорних систем, а також складність інтеграції роботів у існуючі системи управління аварійно-рятувальними роботами. Додатково ускладнює ситуацію людський фактор, пов'язаний із необхідністю прийняття рішень оператором в умовах дефіциту часу, високого рівня стресу та невизначеності.

Аналіз сучасних досліджень свідчить, що переважна більшість наукових робіт зосереджена на вдосконаленні технічних характеристик роботів, алгоритмів навігації та систем виявлення пожеж, тоді як питання забезпечення їх безпечної експлуатації розглядаються фрагментарно та без урахування комплексної взаємодії елементів системи «людина–робот–середовище». Зокрема, недостатньо дослідженими залишаються методи системної ідентифікації небезпек, кількісного оцінювання професійних ризиків та формування інтегрованих підходів до управління безпекою експлуатації роботизованих засобів у реальних умовах пожежогасіння.

Таким чином, виникає суперечність між зростаючою потребою у широкому застосуванні роботизованих систем для гасіння пожеж в умовах підвищеної безпеки та недостатнім рівнем науково обґрунтованих підходів до забезпечення їх надійної та безпечної експлуатації.

У зв'язку з цим актуальною науково-практичною проблемою є розроблення комплексних підходів до оцінювання та управління ризиками при експлуатації роботів для гасіння пожеж, що дозволить підвищити рівень безпеки персоналу, надійність функціонування роботизованих систем та ефективність виконання аварійно-рятувальних робіт.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Існує модельно-прогнозний, ймовірно безпечний розподілений алгоритм керування для співпраці людини та робота під час гасіння лісових пожеж, який дозволяє оцінити динаміку поширення прихованого вогню, щоб забезпечити інтелектуальну, розширену в часі координацію БПЛА для підтримки наземних пожежників-людей. Дозволяє БПЛА розподіляти свої ресурси та забезпечує ймовірнісну гарантію безпеки людей, зберігаючи при цьому здатність БПЛА охоплювати всю пожежу [2].

Існує пожежний робот, який може перевіряти рівень води в режимі реального часу. Робот здатним боротися з пожежами та адаптуватися до різних середовищ. Серед компонентів є шасі, системи мобільності, системи зберігання води, насоси та пожежогасіння. Для тривалого використання він має ефективну систему живлення. Робот здатний орієнтуватися на різноманітній місцевості. Для автономної роботи включено інфрачервоні та ультразвукові датчики. Калібровані датчики рівня води, які надсилають дані на мікроконтролер, дозволяють інтегрувати дані про рівень води в режимі реального часу. Передача даних у режимі реального часу, методи пожежогасіння, навігація та уникнення перешкод залежать від про-

грамування. Дистанційне керування та моніторинг у режимі реального часу стали можливими завдяки системам зв'язку, що використовують Wi-Fi. Робот відповідає стандартам безпеки [1].

Роботизовані технології мають обмежене використання та маргіналізуються у разі лісових пожеж. Відповідні технології лише розробляються до задовільного рівня якості, пов'язаного з робототехнічними функціями. Це висвітлює нові можливості для вдосконалення та спрямовує впровадження вимог, сформульованих пожежниками. Оперативний потенціал безпілотної робототехніки особливо очевидний у забезпеченні безпеки пожежників, ситуаційної обізнаності та підтримки систем пожежогасіння. Розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) може бути двостороннім. Перший шлях передбачає вдосконалення платформи робота, щоб зробити її більш оперативною в лісі та стійкою до суворих умов лісових пожеж. Другий шлях стосується розробки технологій, які можна інтегрувати в робота, а саме сенсори, системи підтримки рішень (включаючи глибоке навчання, машинне навчання, штучний інтелект), телекомунікаційні системи, ІТ-системи, БПЛА, енергетичні пристрої, а також транспортні засоби та пожежогасіння. Перспективними напрямками є машинне навчання, глибоке навчання та штучний інтелект, технологічна інтеграція, управління операційними ризиками та використання іншими групами зацікавлених сторін [3].

Використання безпілотних літальних апаратів в оперативно-розшуковій діяльності є ефективним інструментом підвищення результативності правоохоронних заходів завдяки можливостям оперативного моніторингу, зниження ризиків для персоналу та розширення функцій збору доказів, водночас ключовими проблемами є недосконалість нормативно-правового регулювання, загрози порушення приватності громадян, значні фінансові витрати та потреба у висококваліфікованих фахівцях [4]. Існує необхідність удосконалення законодавчої бази, технічного забезпечення та системи підготовки кадрів для забезпечення безпечного, ефективного й контрольованого використання дронів у правоохоронній сфері.

Сучасні підходи до застосування БПЛА у сфері безпеки, зокрема моніторинг територій, пошук осіб, фіксація правопорушень та збір доказової інформації забезпечують підвищення оперативності та зниження ризиків для персоналу, однак поряд із перевагами визначено низку суттєвих проблем, серед яких правові обмеження та колізії, ризики порушення прав людини, технічні труднощі експлуатації, обмежений ресурс роботи, а також потреба у значних фінансових витратах та спеціалізованій підготовці кадрів; у результаті існує необхідність комплексного вдосконалення нормативно-правового регулювання, розвитку технічної бази та підвищення рівня професійної підготовки для ефективного та безпечного використання таких технологій [5].

Застосування БПЛА, зокрема FPV-дронів, активно досліджується як українськими, так і іноземними науковцями. Загальні тенденції розвитку безпілотної авіації, досвід їх використання у збройних конфліктах, а також технічні та тактичні аспекти застосування БПЛА є перспективними. Водночас більшість досліджень має узагальнений характер та не повною мірою відображає специфіку використання FPV-дронів у сучасних умовах інтенсивних бойових дій, зокрема під час російсько-української війни. З урахуванням стрімкого розвитку цих технологій, їх масового застосування та суттєвого впливу на ефективність ураження противника виникає необхідність у поглибленому аналізі особливостей їх бойового застосування, узагальненні практичного досвіду та визначенні перспектив пода-

льшого використання [6].

Сучасні дослідження у сфері пожежних роботів зосереджені на інтеграції мехатронних систем, технологій Інтернету речей та інтелектуальних методів керування, зокрема PID-регуляторів та машинного навчання, що дозволяє підвищити точність виявлення та швидкість реагування на пожежу. Водночас значна увага приділяється використанню роботів як засобу навчання у технічній освіті, де вони сприяють розвитку критичного мислення, практичних навичок та реалізації проєктно-орієнтованого підходу. Однак незважаючи на наявність численних технічних рішень та прототипів, у наукових працях відзначається недостатня інтеграція таких робототехнічних систем у навчальний процес, зокрема відсутність ефективних практичних засобів, що відповідають вимогам освітніх програм та потребам галузі. Це зумовлює необхідність розроблення інноваційних навчальних платформ на основі мобільних роботів з мультисенсорними системами та адаптивним керуванням [7].

Проблема забезпечення безпеки застосування БПЛА розглядається в контексті їх функціонування як складних кіберфізичних систем, для яких характерне поєднання ризиків фізичної та кібербезпеки. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється вразливостям каналів зв'язку, можливостям кібератак (перехоплення управління, GPS-спуфінг, порушення передачі даних) та методам їх протидії, однак переважна більшість підходів забезпечує лише якісну оцінку безпеки. Водночас недостатньо дослідженим залишається питання кількісного оцінювання впливу кібератак та ефективності контрзаходів на безпеку функціонування БПЛА, особливо з урахуванням комплексних атак та різних сценаріїв їх реалізації. Це обумовлює необхідність розроблення формалізованих моделей, зокрема на основі марковських процесів, які дозволяють адекватно описати стани системи, переходи між ними та забезпечити обґрунтовану оцінку рівня безпеки застосування БПЛА [8].

Забезпечення безпечної експлуатації FPV-дронів є комплексною проблемою, що поєднує технічні, організаційні та людські чинники. Безпека використання безпілотних систем значною мірою залежить не лише від надійності обладнання, але й від рівня підготовленості оператора, його фізичного та психоемоційного стану. Важливо дотримуватись стандартів експлуатації, регулярного технічного обслуговування дронів, а також впровадження систем навчання та сертифікації операторів. Особлива увага приділяється здатності операторів діяти в умовах стресу, швидко приймати рішення та мінімізувати ризики аварійних ситуацій [9]. Водночас недостатня розробленість комплексних підходів до забезпечення безпеки експлуатації FPV-дронів, з урахуванням сучасних бойових умов, обумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

Сучасні наукові підходи у сфері роботизованих систем пожежогасіння свідчать, що забезпечення безпечної експлуатації є ключовою умовою їх ефективного використання. Впровадження автономних роботизованих платформ дозволяє значно знизити ризики для людини під час ліквідації пожеж, особливо в небезпечних та важкодоступних умовах. Особлива увага приділяється інтеграції багатосенсорних систем, алгоритмів обробки даних та інтелектуального керування, що забезпечує своєчасне виявлення загроз та прийняття оптимальних рішень [10]. Разом із тим, існуючі технічні рішення мають певні обмеження щодо адаптивності, габаритів та універсальності застосування, що зумовлює необхідність подальшого вдосконалення підходів до забезпечення безпеки експлуатації таких систем.

Сучасні розробки у сфері роботизованих систем пожежогасіння орієнтовані на підвищення рівня безпеки експлуатації за рахунок мінімізації участі людини в

небезпечних умовах. Використання автономних роботів із багатосенсорними системами (інфрачервоні, температурні, димові датчики, комп'ютерний зір) забезпечує точне виявлення пожеж та оперативне реагування на загрози. Важливу роль відіграють алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання, які дозволяють ідентифікувати небезпечні ситуації, здійснювати навігацію в складному середовищі та обирати оптимальні способи гасіння [11]. Незважаючи на значні досягнення, існує потреба у підвищенні універсальності, надійності та адаптивності таких систем, що визначає актуальність подальшого вдосконалення технологій безпечної експлуатації роботизованих засобів пожежогасіння.

У сучасній промисловості активно впроваджуються робототехнічні системи з використанням технологій розпізнавання зображень, що забезпечують автоматизацію виробничих процесів та підвищення їх ефективності. Водночас їх застосування супроводжується низкою ризиків, що впливають на безпечну експлуатацію. Основними факторами небезпеки є помилки в алгоритмах та вихідних даних, несправності апаратного забезпечення, недосконалість структур обробки інформації, а також вплив людського фактора та умов експлуатації. Особливу проблему становить недостатня формалізація процесів розробки систем на основі нейронних мереж, що потребує їх експериментального налаштування та підвищує ймовірність збоїв [12]. Це зумовлює необхідність удосконалення методів оцінювання та управління ризиками для забезпечення надійності й безпеки функціонування робототехнічних систем.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється розробці автономних робототехнічних систем для підвищення рівня безпеки при ліквідації пожеж та виконанні аварійно-рятувальних робіт. Використання пожежних роботів дозволяє зменшити ризик для життя людей, забезпечуючи виконання небезпечних операцій у важкодоступних та екстремальних умовах без безпосередньої участі оператора. Такі системи здатні автономно виявляти осередки займання, уникати перешкод, передавати відеодані в режимі реального часу та виконувати гасіння пожежі. Водночас існують проблеми, пов'язані з обмеженою автономністю, складністю навігації в динамічному середовищі, залежністю від сенсорів та каналів зв'язку, що може впливати на надійність їх функціонування [13]. Тому існує необхідність подальшого вдосконалення технічних та алгоритмічних рішень для забезпечення ефективної та безпечної експлуатації автономних роботів.

Застосування БПЛА дозволяє підвищити ефективність моніторингу об'єктів, своєчасно виявляти аварійні ситуації та зменшити ризики для життя та здоров'я персоналу. Водночас їх експлуатація супроводжується рядом проблем, пов'язаних із надійністю функціонування бортових систем, обмеженнями автономності, впливом зовнішніх факторів (погодні умови, перешкоди), а також можливими відмовами каналів зв'язку та систем навігації. Додаткову складність становить необхідність забезпечення безпечної взаємодії БПЛА з іншими технічними засобами та інфраструктурою [14]. Це обумовлює потребу у вдосконаленні методів контролю технічного стану, підвищенні надійності систем керування та розробці ефективних підходів до забезпечення безпечної експлуатації безпілотних літальних апаратів.

Забезпечення безпечної експлуатації в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема під час гасіння пожеж, розглядається як комплексна проблема, що поєднує дефіцит ресурсів, високі ризики для персоналу та недостатній рівень оперативної інформації про обстановку. Ключовими загрозами є небезпека для життя рятувальників, складність координації дій та обмежені можливості своєчасного моніторингу

розвитку небезпечних процесів. При цьому традиційні засоби та методи не забезпечують необхідного рівня безпеки, що обумовлює активне впровадження роботизованих систем та безпілотних технологій, здатних підвищити інформованість, зменшити вплив людського фактора та мінімізувати ризики під час виконання небезпечних робіт [15]. Таким чином, актуальною науково-практичною проблемою є розроблення та інтеграція ефективних технологічних рішень для підвищення рівня безпечної експлуатації в умовах динамічних та потенційно небезпечних середовищ.

Пожежогасіння є небезпечним та технічно складним процесом, який часто супроводжується загрозою для життя та значними матеріальними втратами, особливо в умовах обмеженого доступу або складного середовища. У зв'язку з цим значна увага приділяється впровадженню роботизованих систем, здатних виконувати завдання в небезпечних зонах, здійснювати моніторинг, виявлення та локалізацію джерел займання, а також передавати інформацію в режимі реального часу [16]. Незважаючи на суттєвий прогрес у розвитку таких технологій, актуальною залишається проблема підвищення їх ефективності, автономності та надійності, що визначає необхідність подальших досліджень у напрямі забезпечення безпечної експлуатації в екстремальних умовах.

Сучасні наукові підходи орієнтовані на впровадження роботизованих систем, здатних працювати в небезпечних та важкодоступних умовах, виконуючи функції моніторингу, виявлення та ліквідації пожеж. Водночас аналіз існуючих рішень свідчить про наявність низки недоліків, зокрема обмежену автономність, недостатню стійкість до екстремальних температур та недосконалість сенсорних систем, що зумовлює необхідність подальших досліджень у напрямі підвищення ефективності та надійності засобів забезпечення безпечної експлуатації [17].

Існуючі підходи до підвищення безпеки експлуатації в умовах пожежонебезпечних середовищ шляхом використання роботизованих систем пожежогасіння дозволяють мінімізувати участь людини у небезпечних процесах. Існує мобільний робот з інтегрованими датчиками виявлення полум'я, системою дистанційного керування та автоматизованим модулем гасіння, який здатний функціонувати в обмежених та небезпечних зонах, де перебування персоналу є ризикованим. Впровадження таких рішень сприяє зниженню травматизму, запобіганню впливу токсичних продуктів горіння та підвищенню оперативності реагування на надзвичайні ситуації [18]. Існуючі системи потребують подальшого вдосконалення в частині надійності, автономності та адаптивності до складних умов експлуатації, що обумовлює актуальність досліджень у напрямі забезпечення безпечної експлуатації роботизованих комплексів.

Використання БПЛА у сільському господарстві дозволяє зменшити безпосередню участь працівників у небезпечних процесах, зокрема на потенційно замінованих територіях або в складних природно-кліматичних умовах, однак супроводжується виникненням нових небезпек, пов'язаних із експлуатацією техніки, впливом погодних факторів, електробезпекою та можливими відмовами систем управління. Існує необхідність суворого дотримання вимог інструктажу, технічного обслуговування, контролю стану обладнання та підготовки персоналу, що є ключовими умовами мінімізації виробничого травматизму [19]. Встановлено, що існуюча нормативна база та практичні підходи потребують подальшого вдосконалення з урахуванням швидкого розвитку технологій та появи нових факторів ризику, що обумовлює необхідність подальших досліджень у напрямі забезпечення безпечної експлуатації БПЛА.

Дослідження показують, що використання роботизованих систем пожежогасіння підвищує безпеку експлуатації, зменшуючи ризики для людини та забезпечуючи швидке реагування на загоряння [20]. Існуючі рішення мають обмеження у навігації, автономності та інтеграції, що потребує подальшого вдосконалення технологій.

Одним із перспективних напрямів підвищення безпеки є використання роботизованих систем пожежогасіння, оснащених датчиками, системами навігації та елементами штучного інтелекту, які здатні працювати в умовах високих температур, задимлення та наявності небезпечних речовин [21]. Незважаючи на значні переваги таких систем (зменшення травматизму, підвищення ефективності реагування, можливість роботи в екстремальних умовах), існують невирішені проблеми, зокрема недостатній рівень автономності, складність інтеграції в існуючі системи безпеки, висока вартість та обмежена надійність у динамічних середовищах.

Доцільним є застосування роботизованих систем пожежогасіння з елементами штучного інтелекту та мультисенсорними системами, які забезпечують автономне виявлення осередків займання, навігацію та гасіння пожеж на ранніх стадіях [22]. Існуючі технічні рішення мають низку суттєвих обмежень, зокрема громіздкість конструкцій, залежність від зовнішніх ресурсів (водопостачання), складність роботи в обмежених просторах та недостатню адаптивність до змінних умов середовища.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється впровадженню роботизованих засобів пожежогасіння, які дозволяють мінімізувати участь людини у небезпечних зонах та підвищити ефективність реагування. Водночас існуючі рішення мають низку недоліків, зокрема обмежену прохідність, недостатній рівень автономності, складність керування та адаптації до змінних умов пожежі [23]. Таким чином, наявні суперечності між потребою у підвищенні рівня безпеки та обмеженими можливостями сучасних технічних засобів обумовлюють необхідність подальших досліджень, спрямованих на розроблення більш ефективних та надійних систем забезпечення безпечної експлуатації.

Традиційні системи реагування характеризуються обмеженою оперативністю, недостатнім рівнем моніторингу та неефективним управлінням ресурсами, що знижує загальний рівень безпеки. Водночас сучасні підходи передбачають використання сенсорних систем для раннього виявлення небезпечних факторів, мобільних роботизованих платформ для мінімізації участі людини в небезпечних умовах та хмарних сервісів для аналізу даних у режимі реального часу [24]. Незважаючи на значний прогрес, залишається актуальною проблема інтеграції цих технологій у єдині надійні системи, здатні забезпечити безпечну експлуатацію об'єктів у складних виробничих умовах, що потребує подальших досліджень і вдосконалення технічних рішень.

Пожежогасіння є однією з найбільш небезпечних професій через вплив високих температур, токсичних продуктів горіння та ризик обвалів, що обґрунтовує необхідність впровадження роботизованих рішень. Водночас, поряд із технічними перевагами існує низка проблем, зокрема недостатній інтеграція роботів у реальні операційні процеси, необхідність забезпечення надійного контролю та безпеки автономних систем, а також дотримання етичних, правових та організаційних вимог їх застосування [25]. Існує науково-практична проблема розроблення комплексних підходів до створення та впровадження роботизованих систем, які б забезпечували не лише підвищення ефективності реагування, але й гарантований рівень безпечної експлуатації в реальних умовах.

Забезпечення безпечної експлуатації в умовах підвищеної пожежної небезпеки є складною науково-практичною задачею, що потребує впровадження сучасних технічних рішень, зокрема робототехнічних систем, здатних працювати в небезпечних середовищах та мінімізувати ризики для персоналу [26]. Але існують проблеми, пов'язані з недостатньою інтеграцією таких систем у реальні процеси, обмеженою автономністю та необхідністю підвищення надійності їх функціонування, що обумовлює потребу у подальшому вдосконаленні підходів до забезпечення їх безпечної експлуатації.

Забезпечення безпечної експлуатації роботизованих систем пожежогасіння є актуальним через високі ризики для людей та майна. Використання сенсорів, систем навігації та IoT слугує для підвищення ефективності реагування на пожежі та зменшення участі людини в небезпечних умовах [27]. Тому існуючі рішення мають обмеження щодо точності, адаптивності та надійності, що обумовлює необхідність подальших досліджень у напрямі підвищення безпеки їх експлуатації.

Використання роботизованих систем у пожежогасінні дозволяє зменшити ризики для людини та підвищити оперативність реагування. Такі системи здатні працювати в небезпечних та важкодоступних умовах, забезпечують раннє виявлення пожеж завдяки сенсорам та інтеграції з IoT, проте мають суттєві недоліки, зокрема високу вартість, обмежений ресурс автономної роботи, складність функціонування у складних середовищах та ризики відмов [28].

Сучасні роботизовані системи пожежогасіння характеризуються високим рівнем технологічності та здатністю ефективно функціонувати в небезпечних середовищах завдяки використанню сенсорів, систем штучного інтелекту та автономної навігації [29]. Встановлено, що такі системи забезпечують підвищення безпеки рятувальників, точність виявлення осередків займання та ефективність гасіння пожеж, однак їх впровадження супроводжується низкою проблем, зокрема складністю взаємодії людини та робота, необхідністю підвищення надійності роботи в динамічних умовах та врахуванням екологічних аспектів експлуатації.

Використання пожежних роботів сприяє зниженню ризиків для рятувальників та підвищенню ефективності ліквідації надзвичайних ситуацій [30]. Актуальною залишається проблема забезпечення їх надійної та безпечної експлуатації через обмежену автономність, складність функціонування в непередбачуваних умовах, високу вартість та недостатній рівень стандартизації.

Для підвищення рівня безпечної експлуатації використовують сенсорні системи моніторингу фізіологічних та біомеханічних показників, а також роботизованих та допоміжних пристроїв, які дозволяють контролювати стан рятувальника в реальному часі та зменшувати навантаження на організм [31]. Актуальною є проблема забезпечення надійності таких систем у складних умовах, їх інтеграції у засоби індивідуального захисту та підвищення ефективності застосування для попередження виробничих ризиків.

Використання сенсорних технологій, штучного інтелекту та систем автономної навігації пожежних роботів дозволяє своєчасно виявляти осередки займання, оперативно реагувати та мінімізувати участь персоналу в небезпечних зонах [32]. Тому із тим актуальними залишаються проблеми обмеженої енергоефективності, високої вартості впровадження та необхідності підвищення надійності таких систем.

Сучасні роботизовані системи для гасіння пожеж орієнтовані на зниження ризиків для людини шляхом автоматизації процесів виявлення та локалізації займання із застосуванням мікроконтролерів, сенсорів температури, вологості та

інфрачервоного випромінювання, а також систем технічного зору для роботи в умовах обмеженої видимості. У дослідженні показано ефективність інтеграції датчиків і модулів бездротового зв'язку для забезпечення автономної навігації, дистанційного контролю та передачі даних у реальному часі, що підвищує оперативність реагування [33]. Виявлено обмеження, пов'язані з дальністю дії сенсорів, автономністю живлення, стабільністю зв'язку та відсутністю повноцінної системи пожежогасіння, що вказує на необхідність подальших досліджень у напрямі підвищення надійності, функціональної інтеграції та ефективності застосування роботів у реальних умовах пожеж.

Розвиток роботизованих систем для гасіння пожеж характеризується активним впровадженням автономних рішень, що поєднують сенсорні технології виявлення полум'я, мікроконтролерне керування та виконавчі механізми подачі вогнегасних речовин, забезпечуючи оперативне реагування на займання без безпосередньої участі людини. Використання багатоканальних датчиків, сервоприводів та насосних систем сприяє підвищенню точності локалізації пожежі та ефективності її гасіння, тоді як інтеграція алгоритмів автономної навігації та систем безпеки дозволяє роботам функціонувати у складних та небезпечних середовищах [34]. Залишаються актуальними проблеми підвищення надійності роботи в умовах високих температур та задимлення, удосконалення енергозабезпечення та забезпечення стабільності функціонування в реальних сценаріях пожежогасіння, що зумовлює необхідність подальших наукових досліджень у цьому напрямі.

Сучасні роботизовані системи пожежогасіння орієнтовані на автоматизацію процесів виявлення та ліквідації займання шляхом використання сенсорів полум'я, температури та диму, поєднаних із мікроконтролерним керуванням та виконавчими механізмами подачі вогнегасних речовин. Застосування таких технічних рішень забезпечує підвищення оперативності реагування, точності наведення на осередок пожежі та зниження ризику для людини під час виконання небезпечних робіт [35]. Ефективність функціонування подібних систем суттєво залежить від умов експлуатації, зокрема впливу високих температур, задимленості, перешкод у середовищі та обмежень енергозабезпечення, що зумовлює необхідність удосконалення їх надійності, автономності та функціональної безпеки.

У роботі [36] проведено оцінювання ефективності використання роботизованого обладнання для гасіння пожеж на нафтопереробних підприємствах, де обґрунтовано доцільність застосування пожежних роботів типу LUF-60 як альтернативи традиційній пожежній техніці; автори доводять, що такі системи забезпечують підвищення рівня безпеки за рахунок можливості роботи в умовах високих температур, задимлення та токсичного середовища, а також демонструють економічну ефективність їх впровадження через зниження експлуатаційних витрат та потреби в персоналі; водночас дослідження має обмеження, пов'язані з орієнтацією на специфічні умови нафтогазової галузі та недостатнім урахуванням факторів автономності, надійності зв'язку й адаптивності роботів у змінних умовах пожежі, що потребує подальших досліджень у цьому напрямі.

У роботі [37] розглянуто питання безпеки використання безпілотних літальних апаратів у військових операціях із акцентом на їх екологічний вплив, при цьому автор обґрунтовує доцільність застосування еколого-економічного підходу на основі оцінки «життєвого циклу» БПЛА, що дозволяє врахувати вплив на довкілля на етапах виробництва, експлуатації та утилізації; у статті наведено орієнтовні показники енергоспоживання та ресурсних витрат, що підкреслює значний

вплив безпілотників на природне середовище, однак дослідження має узагальнений характер та базується на приблизних розрахунках без глибокого кількісного моделювання та порівняльного аналізу різних типів БПЛА, що обмежує точність висновків і визначає необхідність подальших досліджень у напрямі деталізації екологічних ризиків та розроблення практичних заходів їх мінімізації.

Розглянуто підхід до проектування побутового пожежного робота з автоматизованою системою керування, що поєднує сенсорне виявлення осередку займання, мобільну платформу та маніпулятор із PID-регулюванням, завдяки чому забезпечується швидке реагування та точне позиціонування виконавчих органів; обґрунтовано конструктивні рішення на основі моделювання напружень та оптимізації елементів, а також використання багатосенсорної системи (дим, світло, камера, GPS), що підвищує ефективність виявлення пожежі; водночас запропоноване рішення має обмеження, пов'язані з орієнтацією на побутові умови, відсутністю детального аналізу надійності в екстремальних середовищах та недостатньою увагою до питань відмовостійкості й безпеки взаємодії з людиною, що вказує на необхідність подальшого вдосконалення систем керування та адаптації до реальних умов пожежогасіння [38].

Сучасні роботизовані системи пожежогасіння забезпечують високу точність виявлення осередків займання, автономність дій та ефективність гасіння завдяки використанню багатосенсорних систем, алгоритмів керування та мікроконтролерних платформ. Водночас, попри досягнуті результати (зокрема високу точність детекції та стабільність роботи), актуальними залишаються проблеми обмеженої автономності, залежності від умов середовища, надійності сенсорів та необхідності підвищення відмовостійкості. Це зумовлює потребу у подальшому вдосконаленні підходів до забезпечення безпечної експлуатації таких систем у реальних умовах пожежогасіння [39].

У роботі [40] реалізацію сенсорного виявлення осередків займання, алгоритмів керування та механізмів гасіння. Запропоноване рішення забезпечує підвищення оперативності реагування та точності локалізації пожежі за рахунок використання багатосенсорної системи та мікроконтролерного керування. Водночас виявлено обмеження, пов'язані з залежністю ефективності роботи від умов середовища, обмеженою автономністю та недостатньою відмовостійкістю системи, що свідчить про необхідність подальшого вдосконалення технічних та алгоритмічних рішень для забезпечення надійної та безпечної експлуатації в реальних умовах.

У роботі авторів [41] досліджено конструктивні та функціональні особливості роботизованої системи пожежогасіння з використанням сенсорів полум'я, температури та системи керування на базі мікроконтролера. Встановлено, що інтеграція сенсорних елементів та алгоритмів керування забезпечує своєчасне виявлення пожежі та підвищує ефективність її локалізації. Водночас визначено, що система має обмеження, пов'язані з автономністю роботи, стабільністю функціонування в складних умовах та залежністю від технічних характеристик сенсорів, що потребує подальшого вдосконалення для забезпечення надійної та безпечної експлуатації.

Впровадження роботизованих систем у сферу пожежогасіння розглядається як ефективний інструмент зниження ризиків для персоналу та підвищення оперативності реагування, однак водночас актуалізує проблему забезпечення їх безпечної експлуатації. Дослідження у галузі взаємодії людини та автономних систем показують, що навіть за високого рівня автономності роботів вирішальну роль

зберігає людський контроль, особливо в умовах морально чутливих та небезпечних ситуацій, характерних для пожежогасіння. Окрему увагу приділено питанням прозорості прийняття рішень роботами та використанню технологій пояснюваного штучного інтелекту, які підвищують довіру операторів та сприяють більш ефективній координації дій [42]. У наукових працях недостатньо досліджено комплексні підходи до забезпечення безпечної експлуатації пожежних роботів з урахуванням технічних, організаційних та правових аспектів, що зумовлює необхідність подальшого дослідження цієї проблематики та формування системних рішень у зазначеній сфері.

Аналіз сучасних наукових джерел свідчить, що розвиток робототехнічних систем для гасіння пожеж зумовлений необхідністю підвищення рівня безпеки та ефективності реагування на надзвичайні ситуації, оскільки пожежі характеризуються високою динамічністю, непередбачуваністю поширення та значними ризиками для життя людей. Дослідження демонструють активне впровадження автономних та напіваавтономних роботів, оснащених сенсорними системами (інфрачервоними, ультразвуковими, LIDAR) та алгоритмами навігації, що дозволяє виконувати завдання з виявлення, локалізації та ліквідації пожеж у небезпечних та важкодоступних середовищах. Водночас результати наукових робіт підтверджують, що, незважаючи на технологічний прогрес, існують проблеми, пов'язані з надійністю функціонування роботів, їх адаптацією до складних умов експлуатації, а також необхідністю інтеграції з системами раннього виявлення пожеж та управління [43]. Крім того, недостатньо дослідженими залишаються питання комплексного забезпечення безпечної експлуатації таких систем, зокрема з урахуванням організаційно-правових аспектів та взаємодії людини та роботизованих засобів, що обумовлює актуальність подальших досліджень у даному напрямі.

Застосування роботизованих та телеоператорних систем у пожежогасінні розглядається як перспективний напрям підвищення безпеки особового складу та ефективності дій у небезпечних середовищах, однак їх практичне використання залишається обмеженим через низку технічних та ергономічних проблем. Зокрема, дослідження показують, що ефективність застосування таких роботів значною мірою залежить не лише від технічних характеристик, а й від рівня підготовки оператора, його професійного досвіду та здатності до багатофакторної оцінки обстановки. Встановлено, що досвідчені фахівці здійснюють більш комплексний аналіз пожежної ситуації, враховуючи широкий спектр чинників (поширення вогню, умови середовища, часову динаміку), тоді як новачки обмежуються вузьким набором параметрів. Водночас відсутність ефективних інтерфейсів взаємодії «людина–робот» та недостатня адаптація систем до підтримки прийняття рішень ускладнюють повноцінну реалізацію потенціалу роботизованих засобів [44]. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на розроблення комплексних підходів до забезпечення безпечної експлуатації роботів для гасіння пожеж, з урахуванням технічних, організаційних і когнітивних аспектів їх використання.

У роботі [45] розглянуто проектування безпілотного вогнестійкого робота для ліквідації пожеж у небезпечних та недоступних середовищах (паливні резервуари, ринки, промислові об'єкти). Сучасні роботизовані системи базуються на поєднанні механічних, електронних та програмних компонентів, включаючи сенсори, камери та мікроконтролери, що дозволяє реалізувати дистанційне керування і часткову автономність. Разом із тим, автори акцентують увагу на проблемі високого рівня безпеки пожеж, обмеженої доступності до осередків загоряння та не-

достатньої ефективності традиційних засобів, що зумовлює потребу в удосконаленні конструкцій роботів, підвищенні їх термостійкості, енергоефективності та здатності працювати в екстремальних умовах.

У праці [46] здійснено огляд розвитку роботів пожежогасіння як інтелектуальних систем, що використовують датчики, камери та алгоритми керування для автономного або дистанційного реагування на пожежі. Аналіз показує, що такі роботи здатні значно підвищити ефективність реагування, забезпечити доступ до небезпечних зон та зменшити втрати серед людей. Проте виявлено проблему недостатньої інтеграції інтелектуальних систем прийняття рішень, обмеженої адаптації до різних типів пожеж та складних середовищ, що визначає необхідність подальших досліджень у напрямі розвитку автономності, IoT-інтеграції та підвищення точності виявлення й гасіння пожеж.

У статті [47] проаналізовано сучасні підходи до створення роботів для гасіння пожеж, зокрема автономних та дистанційно керованих систем, що використовують IoT-технології, датчики вогню, газу та температури. Автори узагальнюють значну кількість досліджень, які доводять ефективність роботів у виявленні та ліквідації пожеж у важкодоступних місцях, а також підкреслюють їхню роль у зниженні ризиків для пожежників. Водночас встановлено, що існуючі рішення здебільшого є прототипами з обмеженою функціональністю (обмежений радіус дії, відсутність візуального контролю, залежність від оператора), що формує проблему необхідності підвищення автономності, надійності та адаптивності таких роботів у реальних умовах пожежогасіння.

Дослідження застосування безпілотних літальних апаратів демонструють їх високу ефективність у моніторингу, зборі даних, зниженні ризиків для персоналу та підвищенні оперативності реагування на надзвичайні ситуації, що є релевантним та для пожежогасіння. Водночас у наукових працях наголошується на наявності низки невирішених питань, серед яких ключовими є відсутність комплексної нормативно-правової бази, недостатня стандартизація вимог до безпечної експлуатації роботизованих комплексів, а також проблеми інтеграції таких систем у існуючу інфраструктуру реагування. Окрему увагу приділено ризикам, пов'язаним із надійністю технічних систем, кібербезпекою та дотриманням правових та етичних норм. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на формування цілісного підходу до забезпечення безпечної експлуатації роботів для гасіння пожеж з урахуванням технічних, організаційних та правових аспектів.

Узагальнення результатів аналізу сучасних наукових досліджень свідчить, що роботизовані системи пожежогасіння активно розвиваються та демонструють значний потенціал щодо підвищення ефективності ліквідації пожеж та зниження ризиків для персоналу. Основна увага науковців зосереджена на вдосконаленні технічних характеристик роботів, розвитку сенсорних систем, алгоритмів навігації та елементів штучного інтелекту. Водночас встановлено, що питання забезпечення безпечної експлуатації таких систем розглядається фрагментарно та не має комплексного характеру. Існуючі підходи здебільшого не враховують повною мірою взаємодію складових системи «людина–робот–середовище», вплив екстремальних умов функціонування, а також необхідність системного оцінювання професійних ризиків під час їх застосування.

Тому, існує суперечність між високим рівнем розвитку технічних рішень у сфері роботизованих систем пожежогасіння та недостатнім рівнем науково обґрунтованих підходів до забезпечення їх безпечної експлуатації в реальних умовах. Невирішеною частиною науково-практичної проблеми є відсутність комплексної

методики оцінювання та управління ризиками при експлуатації роботів для гасіння пожеж, яка б враховувала технічні, організаційні та людські чинники в умовах динамічного та небезпечного середовища. Саме вирішення цієї задачі і є предметом дослідження.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є обґрунтування комплексних теоретичних і практичних підходів до оцінювання та управління ризиками з метою забезпечення безпечної експлуатації роботів для гасіння пожеж з урахуванням технічних, організаційних та правових аспектів їх застосування в умовах підвищеної небезпеки.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

- розробити методику оцінювання професійних ризиків при експлуатації роботів для гасіння пожеж;
- здійснити ідентифікацію і оцінювання основних небезпечних факторів та ризиків, що виникають під час їх експлуатації та розробити рекомендації щодо підвищення рівня безпечної експлуатації роботизованих систем з урахуванням умов надзвичайних ситуацій та бойових дій.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес забезпечення безпечної експлуатації роботизованих систем для гасіння пожеж в умовах підвищеної небезпеки, зокрема під час ліквідації надзвичайних ситуацій та в умовах обмеженого доступу до осередків займання.

Предметом дослідження є технічні, організаційні та правові аспекти забезпечення безпечного функціонування пожежних роботів, а також сукупність факторів, що впливають на їх надійність, ефективність та безпеку використання.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що впровадження комплексного підходу, який передбачає інтеграцію сучасних роботизованих платформ, мультисенсорних систем, алгоритмів інтелектуального керування та вдосконаленого нормативно-правового забезпечення, дозволить суттєво підвищити рівень безпечної експлуатації роботів для гасіння пожеж та зменшити ризики для персоналу в умовах підвищеної небезпеки.

Аналіз методів дослідження засвідчив доцільність використання системного підходу, що поєднує теоретичні та емпіричні методи. Зокрема, застосовано методи аналізу та узагальнення наукових джерел для визначення сучасного стану проблеми, порівняльний аналіз для оцінки існуючих технічних рішень, а також методи системного аналізу для дослідження взаємодії елементів системи «людина–робот–середовище». Окрім цього, використано експериментальні методи для перевірки ефективності роботизованих систем у змодельованих умовах пожежі та методи математичного моделювання для оцінювання ризиків та рівня безпеки експлуатації.

Дослідження проводили із застосуванням роботизованого обладнання, яке включає мобільні платформи для пожежогасіння, оснащені датчиками температури, диму та полум'я, системами технічного зору та бездротового зв'язку, а також виконавчими механізмами подачі вогнегасних речовин. Управління роботизованими системами здійснювалося в дистанційному та напівавтономному режимах із використанням алгоритмів навігації та уникнення перешкод, що дозволило відтворити умови, наближені до реальних сценаріїв пожежогасіння.

Для аналізу та обробки експериментальних даних було застосовано персональний комп'ютер. Обробка результатів випробувань здійснювалася із використанням сучасних програмних засобів, що забезпечують статистичний аналіз, візуалізацію даних та оцінку ефективності функціонування роботизованих систем у різних умовах експлуатації, що дозволило отримати обґрунтовані висновки щодо рівня їх безпечної експлуатації.

5. Розробка методики оцінки професійних ризиків для забезпечення безпеки роботів для гасіння пожеж

Розробка методики оцінки професійних ризиків при експлуатації роботів для гасіння пожеж ґрунтується на необхідності комплексного врахування технічних, організаційних та людських факторів, що впливають на безпеку виконання робіт у надзвичайних умовах. Особливістю таких систем є поєднання ризиків, пов'язаних як із функціонуванням роботизованого обладнання, так і з взаємодією оператора, середовища та інформаційно-керуючих систем.

Запропонована методика базується на принципах системного аналізу та передбачає поетапну ідентифікацію небезпек, оцінювання ймовірності їх виникнення та визначення можливих наслідків. На першому етапі здійснюється ідентифікація небезпечних факторів, до яких належать: високі температури, задимлення, токсичні продукти горіння, відмови технічних систем, порушення каналів зв'язку, помилки програмного забезпечення та людський фактор.

Другий етап передбачає якісну та кількісну оцінку ризиків із використанням показників ймовірності виникнення небезпечної події та тяжкості її наслідків. Для цього формується матриця ризиків, у якій кожному фактору відповідає певний рівень безпеки. Ризик визначається як інтегральний показник, що враховує ймовірність події та рівень її впливу на безпеку персоналу, ефективність гасіння пожежі та технічний стан роботизованої системи.

На третьому етапі здійснюється ранжування ризиків за ступенем критичності, що дозволяє виділити пріоритетні напрями для впровадження заходів безпеки. До найбільш критичних ризиків віднесено відмови систем керування, втрату зв'язку з роботом, помилки навігації в умовах обмеженої видимості, а також неконтрольовану поведінку системи внаслідок збоїв програмного забезпечення.

Четвертий етап передбачає розроблення та впровадження заходів щодо зниження ризиків, які включають технічні рішення (резервування систем, використання надійних сенсорів, впровадження систем самодіагностики), організаційні заходи (регламентоване технічне обслуговування, підготовка операторів, розробка інструкцій) та програмні засоби (алгоритми відмовостійкості, системи кіберзахисту, інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень).

Заключний етап методики передбачає моніторинг та періодичний перегляд ризиків на основі отриманих експериментальних даних та досвіду експлуатації роботів у реальних умовах. Це дозволяє адаптувати систему управління ризиками до змінних умов середовища та підвищити рівень безпечної експлуатації роботизованих засобів пожежогасіння.

Перший етап методики – ідентифікація небезпечних факторів – є базовим, оскільки саме від повноти виявлення потенційних загроз залежить достовірність подальшої оцінки ризиків. На цьому етапі здійснюється систематичне визначення всіх можливих джерел безпеки, що можуть виникати під час експлуатації роботів для гасіння пожеж у реальних та змодельованих умовах.

Ідентифікація небезпек проводиться з урахуванням концепції системи «людина–робот–середовище», що дозволяє комплексно охопити всі групи факторів. До першої групи належать небезпеки, пов'язані із зовнішнім середовищем. Це, насамперед, високі температури, відкритий вогонь, задимлення, токсичні та вибухонебезпечні гази, обмежена видимість, нестабільність конструкцій (ризик обвалів), а також складний рельєф або захаращеність території. Такі фактори можуть впливати як на технічний стан робота, так і на якість виконання ним функцій.

Друга група небезпек пов'язана безпосередньо з роботизованою системою. До неї відносяться відмови апаратного забезпечення (перегрів електроніки, пошкодження сенсорів, відмова приводів), збої у роботі систем живлення, обмежений ресурс акумуляторів, а також помилки у функціонуванні сенсорних систем (помилкове виявлення або невиявлення осередку пожежі). Важливу роль відіграють також ризики, пов'язані з нестабільністю каналів зв'язку, затримками передачі даних або повною втратою управління.

Третя група включає небезпеки програмного та алгоритмічного характеру. Сюди відносяться помилки в алгоритмах керування, некоректна робота систем автономної навігації, збої в обробці сенсорної інформації, а також ризики, пов'язані з використанням систем штучного інтелекту (наприклад, некоректна класифікація об'єктів або прийняття помилкових рішень у нестандартних ситуаціях). Окремо враховуються кіберзагрози, зокрема можливість несанкціонованого втручання в систему керування.

Четверта група небезпек пов'язана з людським фактором. До неї належать помилки оператора під час керування роботом, недостатній рівень підготовки персоналу, перевтома або стрес у складних умовах, а також неправильна інтерпретація отриманої інформації. В умовах надзвичайних ситуацій ці фактори можуть суттєво підвищувати ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

Ідентифікація небезпечних факторів здійснюється із застосуванням таких методів, як аналіз наукових джерел, експертне оцінювання, аналіз сценаріїв розвитку пожежі, а також аналіз відмов та їх наслідків (FMEA). Додатково використовуються результати експериментальних досліджень та моделювання, що дозволяє виявити приховані або малоїмовірні ризики.

Результатом першого етапу є формування повного переліку небезпечних факторів із їх класифікацією за джерелами виникнення та характером впливу. Цей перелік слугує основою для подальшого етапу – кількісної та якісної оцінки ризиків, а також для розроблення ефективних заходів щодо підвищення безпеки експлуатації роботів для гасіння пожеж.

Другий етап методики – оцінювання професійних ризиків – полягає у визначенні рівня небезпеки кожного ідентифікованого фактору шляхом кількісної та якісної оцінки ймовірності його виникнення та тяжкості наслідків. На цьому етапі здійснюється формалізація ризиків, що дозволяє перейти від описового переліку небезпек до їх числового та категоріального представлення.

Інтегральний рівень ризику R доцільно визначати як добуток ймовірності виникнення небезпечної події та тяжкості її наслідків:

$$R = P \cdot S, \quad (1)$$

де P – ймовірність виникнення небезпечної події; S – тяжкість (серйозність) наслідків; R – інтегральний показник ризику.

Для підвищення точності оцінювання може застосовуватися розширена модель, яка враховує вплив додаткових факторів (наприклад, рівень контролю або виявлення небезпеки):

$$R = P \cdot S \cdot D, \quad (2)$$

де D – коефіцієнт виявлення або контрольованості ризику (чим гірше виявляється небезпека – тим більший ризик).

Оцінювання ймовірності виникнення небезпечних подій здійснюється на основі аналізу умов експлуатації роботизованих систем, технічних характеристик обладнання, результатів експериментальних досліджень та експертних оцінок. Ймовірність визначається за шкалою з фіксованими рівнями, що відображають частоту або можливість реалізації небезпечної події в процесі функціонування системи (табл. 1).

Ймовірність виникнення небезпечної події P у контексті експлуатації роботів для гасіння пожеж доцільно трактувати не лише як абстрактну категорію, а як показник, що відображає частоту реалізації відмов або небезпечних ситуацій у конкретних умовах середовища. Значення $P=1$ (дуже низька ймовірність) відповідає подіям, які мають виключний характер та практично не виникають у штатних умовах експлуатації. Це можуть бути поодинокі випадки, зумовлені одночасною відмовою кількох незалежних систем, наприклад, збій основного та резервного контролера після повного технічного обслуговування. $P=2$ (низька ймовірність) характеризує події, що трапляються рідко та зазвичай пов'язані з локальними несприятливими умовами, наприклад, короткочасним погіршенням зв'язку через електромагнітні завади або екранування сигналу.

Табл. 1. Матриця оцінки ризиків роботів для гасіння пожеж

Ймовірність / Тяжкість	1 (незначні)	2 (помірні)	3 (суттєві)	4 (критичні)	5 (катастрофічні)
5 (дуже висока)	5 (Середній)	10 (Високий)	15 (Високий)	20 (Критичний)	25 (Критичний)
4 (висока)	4 (Низький)	8 (Середній)	12 (Високий)	16 (Критичний)	20 (Критичний)
3 (середня)	3 (Низький)	6 (Середній)	9 (Середній)	12 (Високий)	15 (Високий)
2 (низька)	2 (Низький)	4 (Низький)	6 (Середній)	8 (Середній)	10 (Високий)
1 (дуже низька)	1 (Низький)	2 (Низький)	3 (Низький)	4 (Низький)	5 (Середній)

Середній рівень $P=3$ відображає події, які виникають періодично в реальних умовах пожежогасіння, особливо у складних середовищах із високим рівнем задимлення або температурного впливу. До таких ситуацій належать помилки сенсорів полум'я або тепловізійних систем, які можуть некоректно інтерпретувати дані через наявність диму або відбиттів теплового випромінювання. Значення $P=4$ (висока ймовірність) характерне для подій, що часто виникають під час роботи в екстремальних умовах, наприклад, перебоїв у передачі сигналу в будівлях із залізобетонними конструкціями або часткової втрати керування в умовах складного рельєфу. Найвищий рівень $P=5$ (дуже висока ймовірність) відповідає ситуаціям, коли небезпечна подія є практично неминучою за певних умов, наприклад, повна втрата зв'язку чи навігації при роботі в підземних приміщеннях або тунелях, де сигнал систем керування суттєво екранується.

Тяжкість наслідків визначається з урахуванням впливу небезпечної події на життя та здоров'я персоналу, працездатність роботизованої системи, ефективність виконання завдань з гасіння пожежі та рівень матеріальних втрат. Оцінка проводиться за градаційною шкалою, яка відображає ступінь критичності наслідків – від незначних до катастрофічних. Матриця ризиків дозволяє класифікувати небезпеки за рівнями критичності.

Тяжкість наслідків S характеризує рівень впливу небезпечної події на функціонування роботизованої системи, безпеку персоналу та ефективність виконання завдань пожежогасіння. Рівень $S=1$ (незначні наслідки) відповідає подіям, які не впливають на виконання завдання та не потребують втручання оператора, наприклад, короткочасна затримка передачі телеметричних даних або незначна похибка сенсора. $S=2$ (помірні наслідки) характеризує ситуації, коли відбувається часткове погіршення роботи системи без критичного впливу на процес, зокрема зниження якості відеосигналу або незначне відхилення від траєкторії руху робота.

Рівень $S=3$ (суттєві наслідки) означає порушення роботи окремих підсистем, що призводить до затримки або ускладнення виконання завдання, наприклад, збій навігаційної системи або часткова втрата сенсорної інформації. $S=4$ (критичні наслідки) відповідає відмові ключових функціональних елементів роботизованої системи, таких як система руху або пожежогасіння, що може створити загрозу для рятувальників та суттєво вплинути на перебіг ліквідації пожежі. Найвищий рівень $S=5$ (катастрофічні наслідки) характеризується виникненням ситуацій із важкими або незворотними наслідками, включаючи повну втрату керованості роботом, його руйнування, вибух чи створення безпосередньої загрози життю та здоров'ю персоналу.

Інтегральний показник ризику визначається шляхом поєднання значень ймовірності та тяжкості наслідків. Для цього використовується функціональна залежність, яка дозволяє отримати узагальнений показник рівня ризику для кожного небезпечного фактору. Отримані значення ризиків систематизуються та відображаються у вигляді матриці ризиків, що забезпечує їх класифікацію за рівнями безпеки відповідно до встановлених критеріїв прийнятності.

Під час оцінювання додатково враховуються умови експлуатації роботизованих систем, рівень їх автономності, надійність каналів зв'язку, стабільність функціонування сенсорних систем та вплив людського фактора. Це дозволяє забезпечити адекватність оцінки ризиків реальним умовам застосування роботів для гасіння пожеж.

Результатом другого етапу є формування кількісно визначених показників ризику для кожного небезпечного фактору та їх класифікація за рівнем безпеки, що створює основу для подальшого ранжування ризиків і розроблення заходів щодо їх зниження.

Третій етап методики передбачає кількісне оцінювання рівня професійних ризиків під час експлуатації роботів для гасіння пожеж. На цьому етапі здійснюється визначення ймовірності виникнення кожної ідентифікованої небезпеки та оцінка тяжкості її наслідків для персоналу, обладнання та навколишнього середовища. Ймовірність визначається з урахуванням частоти відмов технічних систем, стабільності каналів зв'язку, умов експлуатації та впливу зовнішніх факторів. Тяжкість наслідків встановлюється залежно від можливих втрат, включаючи травмування персоналу, пошкодження роботизованого комплексу або порушення виконання бойового завдання.

Оцінювання ризику здійснюється шляхом інтеграції показників ймовірності та тяжкості наслідків із застосуванням формалізованих шкал. Для кожного небезпечного фактора визначається рівень ризику, що дозволяє класифікувати його за ступенем критичності. Результати оцінювання систематизуються у вигляді матриці ризиків, де відображається взаємозв'язок між ймовірністю виникнення події та тяжкістю її наслідків. Це забезпечує можливість порівняння різних ризиків між собою та визначення пріоритетності їх подальшого опрацювання.

У межах етапу також проводиться ранжування ризиків відповідно до встановлених критеріїв допустимості. Визначаються неприйнятні, допустимі за умов контролю та прийнятні ризики. Особлива увага приділяється критичним ризикам, які можуть призвести до втрати керованості роботом, відмови систем пожежогашіння або створення загрози для життя рятувальників. За результатами кількісного оцінювання формується узагальнена картина ризиків, що слугує основою для розробки заходів їх мінімізації на наступних етапах методики.

Четвертий етап методики – розроблення та впровадження заходів щодо зниження професійних ризиків – передбачає формування комплексу технічних, організаційних та програмних рішень, спрямованих на мінімізацію виявлених небезпек та забезпечення безпечної експлуатації роботів для гашіння пожеж.

На цьому етапі, на основі результатів попереднього оцінювання та ранжування ризиків, визначаються пріоритетні напрями їх зниження. Основна увага приділяється критичним та неприйнятним ризикам, які можуть призвести до втрати керованості роботизованою системою, зниження ефективності пожежогашіння або створення загрози для життя та здоров'я персоналу.

Технічні заходи передбачають підвищення надійності роботизованих систем шляхом резервування ключових елементів (систем керування, живлення та зв'язку), використання високонадійних сенсорів, впровадження систем самодіагностики та автоматичного виявлення відмов. Важливим напрямом є забезпечення стійкості роботів до впливу екстремальних факторів середовища (високих температур, задимлення, механічних пошкоджень), а також удосконалення систем автономної навігації та уникнення перешкод.

Організаційні заходи включають розроблення та впровадження регламентів технічного обслуговування роботизованих систем, підготовку та підвищення кваліфікації операторів, проведення регулярних інструктажів і тренувань, а також удосконалення процедур взаємодії у системі «людина–робот». Особлива увага приділяється формуванню навичок роботи в умовах стресу та обмеженої інформації.

Програмні заходи спрямовані на підвищення відмовостійкості та інтелектуальності систем керування. До них належать розроблення алгоритмів обробки сенсорної інформації, впровадження систем підтримки прийняття рішень, використання методів штучного інтелекту для адаптації до змінних умов середовища, а також забезпечення кібербезпеки шляхом захисту каналів зв'язку та запобігання несанкціонованому доступу.

Результатом реалізації четвертого етапу є формування комплексної системи заходів управління ризиками, що забезпечує зниження ймовірності виникнення небезпечних подій та мінімізацію їх наслідків. Впровадження таких заходів сприяє підвищенню надійності, ефективності та безпеки експлуатації роботів для гашіння пожеж в умовах надзвичайних ситуацій.

П'ятий етап методики – моніторинг, контроль та періодичний перегляд професійних ризиків – передбачає безперервне відстеження стану безпеки експлуата-

ції роботизованих систем для гасіння пожеж та оцінювання ефективності впроваджених заходів щодо зниження ризиків.

На цьому етапі здійснюється систематичний збір та аналіз інформації про функціонування роботизованих систем у реальних та змодельованих умовах, включаючи дані про відмови обладнання, порушення в роботі сенсорних і комунікаційних систем, помилки операторів, а також вплив зовнішніх факторів середовища. Джерелами інформації є результати експлуатаційних спостережень, журнали подій, телеметричні дані, а також звіти про інциденти та аварійні ситуації.

Контроль ефективності заходів безпеки здійснюється шляхом порівняння фактичних показників ризику з розрахунковими значеннями, отриманими на попередніх етапах. У разі виявлення відхилень або зростання рівня ризику проводиться аналіз причин та визначаються коригувальні дії. Це дозволяє своєчасно реагувати на зміни умов експлуатації та запобігати виникненню небезпечних ситуацій.

Важливою складовою етапу є періодичний перегляд та актуалізація оцінки ризиків з урахуванням накопиченого досвіду експлуатації, змін у технічних характеристиках роботизованих систем, оновлення програмного забезпечення, а також удосконалення нормативно-правової бази. Особлива увага приділяється врахуванню нових видів загроз, зокрема кіберризиків та ризиків, пов'язаних із використанням систем штучного інтелекту.

За результатами моніторингу здійснюється коригування технічних, організаційних та програмних заходів безпеки, а також оновлення регламентів експлуатації та підготовки персоналу. У разі необхідності вносяться зміни до алгоритмів керування, систем підтримки прийняття рішень та процедур взаємодії «людина–робот».

Результатом п'ятого етапу є забезпечення адаптивності системи управління ризиками, її здатності своєчасно реагувати на змінні умови функціонування та підтримувати належний рівень безпечної експлуатації роботів для гасіння пожеж у довгостроковій перспективі.

6. Апробування розробленої методики оцінки ризиків під час гасіння пожеж роботом та розробка заходів з їх мінімізації або усунення

Апробація розробленої методики оцінки ризиків під час гасіння пожеж із застосуванням роботизованих комплексів, зокрема платформи Magirus Wolf R1 (рис. 1), дозволила на практиці перевірити її ефективність та придатність для умов реальних надзвичайних ситуацій. Оцінювання здійснювалося на основі ідентифікації небезпечних факторів, визначення ймовірності їх виникнення та тяжкості можливих наслідків. Результати оцінки деяких професійних ризиків наведені в табл. 2.

7. Обговорення результатів досліджень з підвищення рівня безпеки роботів для гасіння пожеж

Отримані результати апробації методики оцінки професійних ризиків дозволяють перейти від описового рівня до більш глибокого аналітичного узагальнення, зокрема через виявлення системних залежностей між типами небезпек, умовами експлуатації та критичністю наслідків. Насамперед варто відзначити, що розподіл ризиків не є рівномірним, бо переважна їх частина зосереджена у діапазоні середніх та високих значень ($R=8-16$), тоді як критичні ризики ($R \geq 20$) мають точковий характер, але потенційно визначають граничні умови безпечного функціонування всієї системи. Це свідчить про наявність «вузьких місць» у структурі безпеки, де навіть одиничні відмови можуть призводити до непропорційно значних наслідків.



Рис. 1. Гасіння пожеж із застосуванням роботизованих комплексів, зокрема платформи Magirus Wolf R1: а – промзона; б – приватний будинок; в – склад; г – в зоні бойових дій; д – робоче місце оператора

Більш детальний аналіз показує, що найбільш критичні ризики мають техногенно-середовищне походження (зокрема термічне ураження елементів робота – $R=20$), що вказує на недостатню термостійкість та обмежені адаптивні можливості існуючих конструкцій. При цьому ризики, пов'язані з мобільністю (перекидання – $R=16$) та підготовкою персоналу (невідповідність кваліфікації – $R=16$), формують окремий кластер високої небезпеки, який характеризується поєднанням технічних та людських факторів. Це дозволяє стверджувати, що система безпеки має нелінійний характер, де взаємодія факторів підсилює загальний рівень ризику.

Аналіз середніх ризиків ($R=6-12$) демонструє їх системоутворюючу роль, оскільки саме вони формують основний фон експлуатаційної небезпеки. Зокрема, такі фактори, як затримка сигналу, обмежена видимість, помилки сенсорної інтерпретації та психофізіологічне навантаження оператора, не є критичними окремо, проте в сукупності можуть призводити до каскадних відмов. Це підтверджує доцільність розгляду ризиків не ізольовано, а в рамках сценарного підходу, де враховується їх комбінаційний вплив.

Табл. 2. Результати оцінки деяких ризиків під час гасіння пожеж роботом

№ за/п	Походження небезпеки	Рівень ризику	Заходи
1	Втрата зв'язку з роботом у зоні сильного задимлення та перешкод	9 (середній)	Використання резервних каналів зв'язку; впровадження автономних режимів повернення; підсилення сигналу ретрансляторами
2	Перекидання робота на нерівній поверхні або при подоланні перешкод	16 (високий)	Оптимізація конструкції шасі; використання систем стабілізації; попереднє сканування маршруту
3	Термічне пошкодження елементів робота при високих температурах	20 (критичний)	Використання термостійких матеріалів; системи охолодження; обмеження часу роботи в зоні високих температур
4	Відмова енергоживлення (розряд акумулятора під час операції)	12 (високий)	Контроль рівня заряду; планування часу роботи; застосування змінних акумуляторів
5	Пошкодження ходової частини уламками або вибухонебезпечними предметами	12 (високий)	Посилення захисту корпусу; вибір безпечних маршрутів; дистанційна розвідка місцевості
6	Помилки оператора під час дистанційного керування	8 (середній)	Підвищення кваліфікації операторів; тренування на симуляторах; впровадження систем підтримки прийняття рішень
7	Зіткнення робота з перешкодами або іншими об'єктами	9 (середній)	Використання сенсорів уникнення перешкод; автоматичне гальмування; відеоконтроль
8	Вплив води та піни на електронні компоненти (попри IP65)	6 (середній)	Герметизація вузлів; регулярна перевірка ущільнень; технічне обслуговування
9	Вибух газоповітряної суміші поблизу робота	10 (високий)	Газоаналіз перед входом у зону; дистанційне використання; вибухозахищене виконання обладнання
10	Обмежена видимість для оператора через дим або перешкоди	12 (високий)	Використання тепловізорів; додаткові камери; покращення освітлення та передачі зображення
11	Затримка передачі сигналу (лаг)	6 (середній)	Оптимізація каналів зв'язку; використання автономних алгоритмів стабілізації руху
12	Психофізіологічне навантаження оператора (стрес, перевтома)	12 (високий)	Регламентовані режими роботи; ротация персоналу; психологічна підготовка
13	Некоректна інтерпретація даних від сенсорів	9 (середній)	Впровадження систем інтелектуального аналізу; навчання оператора роботі з даними
14	Відмова програмного забезпечення або алгоритмів	12 (високий)	Тестування ПЗ; резервування систем; впровадження відмовостійких алгоритмів
15	Кіберзагрози (перехоплення управління, злам)	15 (високий)	Шифрування каналів зв'язку; системи кіберзахисту; аутентифікація доступу
16	Недостатня ситуаційна обізнаність оператора	9 (середній)	Інтеграція систем відео та сенсорного моніторингу; багатоканальна передача даних
17	Невідповідність рівня підготовки оператора складності завдання	16 (високий)	Сертифікація операторів; спеціалізоване навчання; тренажери

Окремої уваги заслуговує аналіз кіберфізичних ризиків ($R=12-15$), які поєднують у собі загрози технічного та інформаційного характеру. Високий рівень ризику кіберзагроз ($R=15$) свідчить про те, що в умовах сучасних бойових дій та інформаційного протиборства ці фактори можуть стати визначальними для втрати керованості системою. При цьому їх особливістю є складність виявлення, що підвищує інтегральний ризик навіть за помірної ймовірності реалізації.

Кількісний аналіз отриманих даних також дозволяє виділити три функціональні групи ризиків:

- критичні ($R \geq 16$), що потребують негайного технічного або організаційного втручання;
- контрольовані ($R=8-15$), які можуть бути знижені за рахунок оптимізації режимів роботи та підвищення надійності систем;
- допустимі ($R \leq 7$), що не мають суттєвого впливу за умови дотримання регламентів.

При цьому частка критичних та високих ризиків у загальній структурі перевищує 40 %, що є індикатором підвищеної небезпеки експлуатації роботизованих систем у реальних умовах пожежогасіння.

Важливим результатом є встановлення залежності між рівнем автономності системи та структурою ризиків. Зі зростанням автономності зменшується вплив людського фактора, проте зростає значущість алгоритмічних та програмних ризиків, зокрема пов'язаних із некоректним прийняттям рішень. Це формує так званий «ефект заміщення ризиків», коли зниження однієї групи небезпек супроводжується зростанням інших, що необхідно враховувати при проектуванні систем.

Крім того, результати дозволяють зробити висновок про наявність кореляції між умовами середовища та рівнем ризику: у замкнених, задимлених або конструктивно складних просторах значення ризиків зростають у середньому на 20–30 %, що обумовлено погіршенням зв'язку, навігації та роботи сенсорів. Це підтверджує необхідність адаптивних алгоритмів керування, здатних змінювати режим функціонування залежно від умов середовища.

Рекомендації щодо підвищення рівня безпечної експлуатації роботів для гасіння пожеж в умовах надзвичайних ситуацій та бойових дій доцільно базувати на результатах проведеного аналізу ризиків, який виявив критичні вразливості у технічній, організаційній та кіберфізичній площинах.

Передусім, у технічному аспекті необхідно підвищити відмовостійкість роботизованих систем. Це передбачає резервування ключових підсистем (зв'язку, керування, енергоживлення), впровадження дубльованих каналів передачі даних (радіо, LTE/5G, супутниковий зв'язок), а також використання адаптивних систем навігації, здатних працювати в умовах втрати GPS або в замкнених просторах. Доцільним є застосування термостійких матеріалів, активних систем охолодження та захисту електроніки, що безпосередньо знижує критичні ризики, пов'язані з високими температурами. Окрему увагу слід приділити енергоефективності – використанню змінних акумуляторних модулів, систем прогнозування ресурсу та алгоритмів енергоменеджменту.

В умовах бойових дій особливої актуальності набуває стійкість до зовнішніх впливів, зокрема уламків, вибухових хвиль та електромагнітних перешкод. Це потребує посилення конструкції корпусу, використання вибухозахищених компонентів, а також впровадження систем раннього виявлення вибухонебезпечних середовищ (газоаналізатори, мультисенсорні комплекси).

У програмному та алгоритмічному напрямі доцільно впроваджувати інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, які здатні аналізувати дані з різних сенсорів та пропонувати оператору оптимальні сценарії дій. Важливим є розвиток алгоритмів автономної поведінки у критичних ситуаціях (наприклад, автоматичне повернення при втраті зв'язку або стабілізація руху при втраті керування). Не менш важливим є впровадження принципів explainable AI, що підвищує прозорість роботи систем і довіру оператора.

Кібербезпека повинна розглядатися як невід'ємна складова безпечної експлуатації. Рекомендовано застосовувати сучасні методи шифрування, багаторівневу аутентифікацію, сегментацію мереж та системи виявлення вторгнень. В умовах бойових дій доцільним є використання автономних режимів роботи, які знижують залежність від зовнішніх каналів зв'язку.

Організаційні заходи мають бути спрямовані на підвищення готовності персоналу до роботи в екстремальних умовах. Це включає впровадження системи безперервного навчання операторів із використанням симуляторів, відпрацювання сценаріїв роботи в умовах обмеженої видимості, втрати зв'язку та високого стресу. Доцільним є впровадження сертифікації операторів та періодичної перевірки їх компетентностей.

З точки зору управління ризиками, ефективним є впровадження адаптивної системи моніторингу, яка в реальному часі оцінює рівень небезпеки та коригує режими роботи роботи. Використання цифрових двійників дозволить прогнозувати поведінку системи в різних сценаріях та заздалегідь виявляти потенційні відмови.

У нормативно-правовій площині необхідно розробити стандартизовані вимоги до безпечної експлуатації роботизованих систем у сфері пожежогасіння, зокрема з урахуванням умов воєнного стану. Це має включати регламентацію технічних характеристик, вимог до кіберзахисту, процедур сертифікації та правил взаємодії між підрозділами.

9. Висновки

1. У результаті дослідження встановлено, що експлуатація роботів для гасіння пожеж супроводжується комплексом взаємопов'язаних ризиків технічного, програмного, середовищного та людського характеру. Найбільш критичними є відмови систем керування, втрата зв'язку, помилки навігації та некоректна робота сенсорів в умовах високих температур та задимлення, а також помилки оператора в умовах стресу.

2. Розроблено методичку оцінювання професійних ризиків, яка базується на системному підході та передбачає ідентифікацію небезпек, аналіз умов їх виникнення, визначення ймовірності реалізації та тяжкості наслідків із подальшим ранжуванням ризиків за рівнем критичності, що дозволяє формалізувати процес управління безпекою експлуатації роботизованих систем. Обґрунтовано рекомендації щодо підвищення рівня безпечної експлуатації роботів для гасіння пожеж, які передбачають застосування комплексного підходу, що поєднує технічні, організаційні та програмні заходи, включаючи підвищення відмовостійкості систем, впровадження мультисенсорних технологій, удосконалення підготовки операторів та нормативно-правового забезпечення.

Література

1. Vibha K., Hemalatha B., Sudha K., Ahnaf MA M. Fire fighting robot using
Civil Security. DOI: 10.52363/2524-0226-2026-43-9

internet of things (IoT) for various temperature levels. Journal of propulsion technology. 2024. Vol. 45. № 2. P. 6647–6655. doi: 10.52783/tjjpt.v45.i02.7052

2. Seraj E., Silva A., Gombolay M.C. Safe Coordination of Human-Robot Firefighting Teams. ArXiv. 2019. doi: 10.48550/arXiv.1903.06847

3. Gromek P., Lowe T. Ground robot technologies in wildfire risk reduction. The viewpoint of the fire service. Progress in disaster science. 2025. P. 100435. doi: 10.1016/j.pdisas.2025.100435

4. Асламов О., Єфімов В. Використання дронів в оперативно-розшуковій діяльності: практичні аспекти та правові обмеження. Матеріали конференцій МЦНД, м. Біла Церква, 22 лист. 2024 р. Біла Церква. 2024 С. 164–171. URL: <https://archives.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/article/view/340>

5. Mosov S., Neroba V., Sieliukov O. Features of using an unmanned aircraft in emergency situations. Scientific bulletin: civil protection and fire safety. 2020. Vol. 1. № 1. P. 34–41. doi: 10.33269/nvcz.2020.1.34-41

6. Oleksenko O., Misiuk H., Ikaiev D., Korshok V., Palka V. Main trends in the use of unmanned aircraft in the russian-ukrainian war. Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2024. Vol. 20, № 3. P. 99–105. doi: 10.37701/dndivsovt.21.2024.12

7. Amalia D., Nugraha W., Sunardi S., Rizko R., Putri J., Pratama R. A. Multisensor fire detection system mobile robot as a learning media in firefighting robotic course. Journal of innovation in educational and cultural research. 2023. Vol. 4. № 4. P. 682–690. doi: 10.46843/jjecr.v4i4.1016

8. Ключніков І. М. Оцінка безпеки застосування безпілотних літальних апаратів з використанням марковських моделей. Системи озброєння і військова техніка. 2024. № 4(76). С. 51–57. doi: 10.30748/soivt.2023.76.05

9. Galashevskyi H. The importance of physical fitness of fpv drone operators in the process of performing combat tasks as intended. Scientific Journal of National Pedagogical Dragomanov University. Series 15. Scientific and pedagogical problems of physical culture (physical culture and sports). 2024. № 6(179). P. 85–90. doi: 10.31392/udu-nc.series15.2024.6(179).15

10. Alwan O. H., Alshekhly M. N. A., Al-Aloosi R. A., Fakhri O. F., Aljibori H. S. S., Abdullah O. I. Systematic development of an autonomous robotic car for firefighting based on the interactive design approach. EUREKA: physics and engineering. 2024. № 3. P. 61–72. doi: 10.21303/2461-4262.2024.003326

11. Anakha A. R., Hajira N., Meenakshy S., Nayana S., Arya S. Fire fighting robot with human detection and audio recognition. International journal for multidisciplinary research. 2024. Vol. 6. № 1. doi: 10.36948/ijfmr.2024.v06i01.12993

12. Землянська О. В., Чернявський І. М. Ризики при роботі з робототехнічними системами. Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки : Зб. матеріалів Двадцять другої Всеукр. науково-метод. конф., м. Київ, 12–14 трав. 2020 р. Київ. 2020. С. 131–134. URL: https://opcb.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/05/Конф_22-ред.pdf

13. Mahfujul Islam M. Autonomous and wireless control fire fighter robot. Automation, control and intelligent systems. 2021. Vol. 9. № 4. P. 97. doi: 10.11648/j.acis.20210904.11

14. Даник Ю., Мазур В., Балицький І. Методологічні основи безпечного руху безпілотних літальних апаратів в просторі з динамічними перешкодами. Збірник

наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки. 2021. Т. 82. № 1. С. 224–236. doi: 10.32453/3.v82i1.541

15. Roldán-Gómez J. J., González-Girona E., Barrientos A. A survey on robotic technologies for forest firefighting: applying drone swarms to improve firefighters' efficiency and safety. *Applied sciences*. 2021. Vol. 11. № 1. P. 363. doi: 10.3390/app11010363

16. N L. A review paper on fire fighting robot. *Interantional journal of scientific research in engineering and management*. 2024. Vol. 08. № 04. P. 1–5. doi: 10.55041/ijsem31068

17. D2.1 – A report encapsulating the secondary research and findings from the survey to inform the database of WP2. European Commission, 2018. 25 p. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5bb6ea8f9&appId=PPGMS>

18. Chitti S., Ramchandrarao P., Padmaja C., Raghava Kumari D. Fire detection and direction control of fire fighting robot. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2020. Vol. 981. P. 032016. doi: 10.1088/1757-899x/981/3/032016

19. Дмитрюк С. П., Артюшенко Т. О., Муранов Є. С. Безпеки праці при застосуванні безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві. Збірник тез доповідей : XI Міжнар. науково-техн. конф. «Крамар. читання» з нагоди 117-ї річниці від дня народж. д-ра техн. наук, проф., віцепрезидента УАСГН Крамар. Володимира Савов. (1906–1987). м. Київ, 22 лют. 2024 р. 23 квіт. 2024 р. Київ, 2024. С. 219–222. URL: <https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/d26bad0d-e1c7-4659-a797-f71c31b48a8d/content>

20. Kanade D., Udupure A., Umale O., Patil V. Automating fire safety: a design for an autonomous firefighting robot. *International journal of all research education scientific methods*. 2024. Vol. 11. № 12. P. 1908–1916. URL: <https://www.ijaresm.com/automating-fire-safety-a-design-for-an-autonomous-firefighting-robot>

21. Parshetti M. R. Firefighting robot: a review. *International journal for research in applied science and engineering technology*. 2024. Vol. 12. № 12. P. 2055–2062. doi: 10.22214/ijraset.2024.66156

22. Sivakumar M., Kanakarajan P., Dharun S., Kirubakaran R., Girivasan M. Development of an artificial intelligent firefighting robot and experiment investigation on fire scene patrol. *E3S web of conferences*. 2024. Vol. 547. P. 02010. doi: 10.1051/e3sconf/202454702010

23. Wheeler S. G., Hoermann S., Lukosch S., Lindeman, R. W. Design and assessment of a virtual reality learning environment for firefighters. *Frontiers in computer science*. 2024. Vol. 6. doi: 10.3389/fcomp.2024.1274828

24. IoT enabled fire fighting robot integrated with thingspeak cloud for emergency. *International research journal of modernization in engineering technology and science*. 2024. Vol. 6. № 4. doi: 10.56726/irjmets51931

25. van Manen B. R., Fosch-Villaronga E., Smits M. Firefighting robots should be made responsibly. *Nature machine intelligence*. 2025. Vol. 7. № 5. P. 676–677. doi: 10.1038/s42256-025-01037-3

26. Li S., Yun J., Feng C., Gao Y., Yang J., Sun G., Zhang D. An indoor autonomous inspection and firefighting robot based on SLAM and flame image recognition. 2023. Vol. 6. № 3. P. 93. doi: 10.3390/fire6030093

27. Abimbola M. B. Robots for fighting fires: a comparative analysis. *TMP*

universal journal of research and review archives. 2024. Vol. 2. № 4. doi: 10.69557/ujrra.v2i4.62

28. Abdullahi A. Y., Baballe M. A. Benefits and Drawbacks of Robotic Firefighting. In *Global Journal of Research in Engineering & Computer Sciences*. 2024. Vol. 4. № 1. P. 6–10. doi: 10.5281/zenodo.10493053

29. Devansh V Desai, Yagnesh R Thakar, Prof. Chirag S Dalal Dr. Himanshu Kumar Patel. Fire fighting robot. *International journal of advanced research in science, communication and technology*. 2025. Vol. 12. № 5. P. 69–74. doi: 10.48175/ijarsct-23614

30. Mathur M., Gupta B., Goyanka D., Sikarwar N. Fire fighting robot. *International journal of current science*. 2023. Vol. 2. № 13. URL: <https://rjpn.org/ijcspub/papers/IJCSP23B1384.pdf>

31. Taborri J., Pasinetti S., Cardinali L., Perroni F., Rossi S. Preventing and monitoring work-related diseases in firefighters: a literature review on sensor-based systems and future perspectives in robotic devices. *International journal of environmental research and public health*. 2021. Vol. 18. № 18. P. 9723. doi: 10.3390/ijerph18189723

32. Sathiabalan N. A., Lokimi A. F. M., Jin O. Z., Hasrin N. S. M., Zain A. S. M., Ramli N., Zakaria H. L., Ariffin W. N. S. F. W., Hashim N. B. M., Taib M. H. M. Autonomous robotic fire detection and extinguishing system. *Journal of physics: conference series*. 2021. Vol. 2107. № 1. P. 012060. doi: 10.1088/1742-6596/2107/1/012060

33. Swathi, C., Khushal Raj, K., Gopu A. Fire Fighter Robot with Night Vision Camera. *International Journal for Research Trends and Innovation*. 2025. Vol. 3. № 10. P. 21 –25. URL: <https://www.ijrti.org/papers/IJRTI2503204.pdf>

34. Kumar, K., Kumar, G., Bhardwaj, H., Gupta, V. Autonomous fire-fighting robot. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2025. Vol. 12. № 4. P. 802 –808. URL: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2504196.pdf>

35. Talavera N. F., Roldán-Gómez J. J., Martín F., Rodriguez-Sanchez M. C. An indoor autonomous inspection and firefighting robot based on SLAM and flame image recognition. *Fire*. 2023. Vol. 6. № 3. P. 93. URL: doi: 10.3390/fire6030093

36. Kargapolova E. O., Kuleshov V. V., Yu Scuba P. Assessment of the use of robotic equipment for extinguishing fires at oil refining enterprises. *IOP conference series: earth and environmental science*. 2021. Vol. 720. № 1. P. 012086. doi: 10.1088/1755-1315/720/1/012086

37. Хархаров Д. Е., Данченко Ю. М. Безпека використання безпілотних літальних апаратів у військових операціях. Безпека людини у сучасних умовах : зб. доп. 15-ї Міжнар. наук.-метод. конф. та Міжнар. наук. конф. Європ. Асоц. наук з безпеки (EAS), м. Харків, 7–8 груд. 2023 р. Харків. 2023. С. 48–50. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79470>.

38. Ma Y., Zhang S., Wang Y. Design of home-use fire fighting robots and research on automatic control system. *Journal of physics: conference series*. 2022. Vol. 2234. № 1. P. 012014. doi: 10.1088/1742-6596/2234/1/012014

39. Maruf M. M., Sagor M. M. H., Kanta S. K., Imran M. H. An autonomous arduino-based firefighting robot for laboratory environments. *International journal of computer applications*. 2025. Vol. 187. № 28. P. 56–65. doi: 10.5120/ijca2025925488

40. Sivakumar M., Kanakarajan P., Dharun S., Kirubakaran R., Girivasan M. Development of an artificial intelligent firefighting robot and experiment investigation on fire scene patrol. *E3S web of conferences*. 2024. Vol. 547. P. 02010. doi:

10.1051/e3sconf/202454702010

41. Schrön M., Heisel F., Pflöging B. FAR: a firefighter assistant robot. AutomationXP25: hybrid automation experiences: Workshop at CHI'25 – Hybrid, Yokohama, 27 April 2025. Japan, 2025. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4101/paper3.pdf>

42. Negrila E. Explainable AI for human supervision over firefighting robots The influence of on-demand explanations on human trust: Bachelor of Computer Science and Engineering. Netherlands, 2024. 29 p. URL: <https://repository.tudelft.nl/>

43. Muhammad B., Muhammad S., Surajo A., Dele Ya., Abdulmuhammad M. Robots for Fighting Fires: A Comparative Analysis. Journal of research and review archives. 2(4). 57–61. doi: 10.5281/zenodo.10384140

44. Tamura Y., Amano H., Ota J. Analysis of firefighting skill with a teleoperated robot. ROBOMECH journal. 2020. Vol. 7. № 1. doi: 10.1186/s40648-020-00177-y

45. Saturday A., O I. K. Design and development of an unmanned fire fighting robot. Scholars journal of engineering and technology. 2023. Vol. 11. № 03. P. 84–90. doi: 10.36347/sjet.2023.v11i03.009

46. Patil S., Deshmukh S., Talmale M., Gadhe M., Devkar U. Fire fighting robot. International conference on communication and information processing (ICCIP-2023): Proceedings of the 5th. 10 June 2023. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4669126

47. Amol Uttam Kawade, Piyush Ashok Kawade, Akshaan Pradeep Kaware, Akshat Abhay Kkulthe, Amruta Chandrakant Amune. Smart fire fighting robot. World journal of advanced engineering technology and sciences. 2022. Vol. 7. № 2. P. 157–162. doi: 10.30574/wjaets.2022.7.2.0137

48. Подвальний А. О., Янковський О. Г. Застосування та можливості безпілотних літальних апаратів у забезпеченні публічної та громадської безпеки. Підготовка правоохоронців в системі МВС України в умовах воєнного стану: зб. наук. пр. за матеріалами X Міжнар. наук.-практ. конф., м. Вінниця, 3 лип. 2025 р. Вінниця. 2025. С. 320–323. URL: <https://dspace.univd.edu.ua/server/api/core/bitstreams/03f50ee1-20ff-4a31-ad04-c5d8ce47f16f/content>

B. Tsybal¹, DSc, Associate Professor, Professor of the Department

Ye. Rybka¹, DSc, Professor, Vice-Rector for Research

Ye. Holoborodko¹, Student

V. Pohrebniak², DSc, Professor, Professor of the Department

A. Petryshchev³, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

¹*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

²*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine*

³*National University "Zaporizhzhya Polytechnic", Zaporozhye, Ukraine*

FEATURES OF ENSURING SAFE OPERATION OF ROBOTS FOR FIRE EXTINGUISHING

The theoretical and applied aspects of ensuring the safe operation of robotic systems for fire extinguishing in complex, dynamic, and hazardous environments are studied. The relevance of implementing robotic technologies in fire response practice is substantiated, taking into account the need to reduce occupational risks and improve the efficiency of emergency and rescue operations. A generalized analysis of the current state of development of robotic fire extinguishing systems is carried out, which made it possible to determine their main functional capabilities, technical characteristics, and advantages compared to traditional means. It is established that, despite significant technological potential, the use of such systems is accompanied by a number of limitations, including insufficient adaptability to high temperatures and smoke conditions, limited autonomy, instability of communication

channels, and difficulties in integration into existing organizational response structures. The study identifies the main hazardous factors and risks associated with the operation of robotic systems, including equipment failures, software malfunctions, sensor inaccuracies, the impact of aggressive environments, as well as the human factor, in particular operator errors under conditions of limited time and increased psycho-emotional stress. A methodology for assessing occupational risks is proposed, based on a systematic approach and involving sequential hazard identification, analysis of conditions of occurrence, determination of the probability of realization and severity of consequences, followed by risk ranking according to the level of criticality. The expediency of applying an integrated approach to ensuring the safe operation of robotic systems is substantiated, combining technical, organizational, and legal measures. It is established that the implementation of the proposed approaches contributes to increasing the efficiency of functioning of robotic systems.

Keywords: safe operation, occupational risks, emergency and rescue operations, equipment failures

References

1. Vibha, K., Hemalatha, B., Sudha, K., Ahnaf MA, M. (2024). Fire fighting robot using internet of things (iot) for various temperature levels. *Journal of Propulsion Technology*, 45(2), 6647–6655. doi: 10.52783/tjjpt.v45.i02.7052
2. Seraj, E., Silva, A., Gombolay, M.C. (2019). Safe Coordination of Human-Robot Firefighting Teams. *ArXiv*. doi: 10.48550/arXiv.1903.06847
3. Gromek, P., Lowe, T. (2025). Ground robot technologies in wildfire risk reduction. The viewpoint of the fire service. *Progress in Disaster Science*, 100435. doi: 10.1016/j.pdisas.2025.100435
4. Aslamov, O., Yefimov, V. (2024). Vykorystannia droniv v operatyvno-rozshukovii diialnosti: praktychni aspekty ta pravovi obmezhenia. *Materialy konferentsii MTsND*, 164–171. Available at: <https://archives.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/article/view/340>
5. Mosov, S., Neroba, V., Sieliukov, O. (2020). Features of using an unmanned aircraft in emergency situations. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety*, 1(1), 34–41. doi: 10.33269/nvcz.2020.1.34-41
6. Oleksenko, O., Misiuk, H., Ikaiev, D., Korshok, V., Palka, V. (2024). Main trends in the use of unmanned aircraft in the russian-ukrainian war. *Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 20(3), 99–105. doi: 10.37701/dndivsovt.21.2024.12
7. Amalia, D., Nugraha, W., Sunardi, S., Rizko, R., Putri, J., Pratama, R. A. (2023). Multisensor fire detection system mobile robot as a learning media in firefighting robotic course. *Journal of Innovation in Educational and Cultural Research*, 4(4), 682–690. doi: 10.46843/jiecr.v4i4.1016
8. Kliushnikov, I. M. (2024). Otsinka bezpeky zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ z vykorystanniam markovskyykh modelei. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 4(76), 51–57. doi: 10.30748/soivt.2023.76.05
9. Galashevskyi, H. (2024). The importance of physical fitness of fpv drone operators in the process of performing combat tasks as intended. *Scientific Journal of National Pedagogical Dragomanov University. Series 15. Scientific and Pedagogical Problems of Physical Culture (Physical Culture and Sports)*, 6(179), 85–90. doi: 10.31392/udu-nc.series15.2024.6(179).15
10. Alwan, O. H., Alshekhly, M. N. A., Al-Aloosi, R. A., Fakhri, O. F., Aljibori, H. S. S., Abdullah, O. I. (2024). Systematic development of an autonomous robotic car for fire-fighting based on the interactive design approach. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 61–72. doi: 10.21303/2461-4262.2024.003326

11. Anakha, A R, Hajira, N., Meenakshy S., Nayana S., Arya S. (2024) Fire fighting robot with human detection and audio recognition. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 6(1). doi: 10.36948/ijfmr.2024.v06i01.12993
12. Zemlianska, O. V., Cherniavskiy, I. M. (2020). Ryzky pry roboti z robototekhnichnymy systemamy. U *Problemy okhorony pratsi, promyslovoi ta tsyvilnoi bezpeky*, 131–134. KPI im. Ihoria Sikorskoho. Available at: https://opcb.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/05/Конф_22-ред.pdf
13. Mahfujul Islam, M. (2021). Autonomous and wireless control fire fighter robot. *Automation, Control and Intelligent Systems*, 9(4), 97. doi: 10.11648/j.acis.20210904.11
14. Danyk, Yu., Mazur, V., Balytskyi, I. (2021). Metodolohichni osnovy bezpechnoho rukhu bezpilotnykh litalnykh aparativ v prostori z dynamichnymy pereshkodamy. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Seriya: Viiskovi ta tekhnichni nauky*, 82(1), 224–236. doi: 10.32453/3.v82i1.541
15. Roldán-Gómez, J. J., González-Gironda, E., Barrientos, A. (2021b). A survey on robotic technologies for forest firefighting: Applying drone swarms to improve firefighters' efficiency and safety. *Applied Sciences*, 11(1), 363. doi: 10.3390/app11010363
16. N, L. (2024a). A review paper on fire fighting robot. *Interantional Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 08(04), 1–5. doi: 10.55041/ijssrem31068
17. D2.1 – A report encapsulating the secondary research and findings from the survey to inform the database of WP2 (Ref.Ares(2018)3225270-19/06/2018). (2018). European Commission. Available at: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5bb6ea8f9&appId=PPGMS>
18. Chitti, S., Ramchandrarao, P., Padmaja, C., Raghava Kumari, D. (2020). Fire detection and direction control of fire fighting robot. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 981, 032016. doi: 10.1088/1757-899x/981/3/032016
19. Dmytriuk, S. P., Artiushenko, T. O., Muranov, Ye. S. (2024). Bezpeky pratsi pry zastosuvanni bezpilotnykh litalnykh aparativ u silskomu hospodarstvi. U *Zbirnyk tez dopovidei*, 219–222. Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy. Available at: <https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/d26bad0d-e1c7-4659-a797-f71c31b48a8d/content>
20. Kanade, D., Udupure, A., Umale, O., Patil, V. (2024). Automating fire safety: A design for an autonomous firefighting robot. *International Journal of All Research Education & Scientific Methods*, 11(12), 1908–1916. Available at: <https://www.ijaresm.com/automating-fire-safety-a-design-for-an-autonomous-firefighting-robot>
21. Parshetti, M. R. (2024). Firefighting robot: A review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(12), 2055–2062. doi: 10.22214/ijraset.2024.66156
22. Sivakumar, M., Kanakarajan, P., Dharun, S., Kirubakaran, R., Girivasan, M. (2024). Development of an artificial intelligent firefighting robot and experiment investigation on fire scene patrol. *E3S Web of Conferences*, 547, 02010. doi: 10.1051/e3sconf/202454702010
23. Wheeler, S. G., Hoermann, S., Lukosch, S., Lindeman, R. W. (2024). Design and assessment of a virtual reality learning environment for firefighters. *Frontiers in Civil Security*. DOI: 10.52363/2524-0226-2026-43-9

Computer Science, 6. doi: 10.3389/fcomp.2024.1274828

24. Venkateswara Rao, K.V., Vamsi Krishna, K., Rohith, D., Sravani, B., Uma Satya Prasad, B. IoT enabled fire fighting robot integrated with thingspeak cloud for emergency. (2024). *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 4(6). doi: 10.56726/irjmets51931

25. van Manen, B. R., Fosch-Villaronga, E., Smits, M. (2025). Firefighting robots should be made responsibly. *Nature Machine Intelligence*, 7(5), 676–677. doi: 10.1038/s42256-025-01037-3

26. Li, S., Yun, J., Feng, C., Gao, Y., Yang, J., Sun, G., Zhang, D. (2023). An indoor autonomous inspection and firefighting robot based on SLAM and flame image recognition. *Fire*, 6(3), 93. doi: 10.3390/fire6030093

27. Abimbola, M. B. (2024). Robots for fighting fires: A comparative analysis. *TMP Universal Journal of Research and Review Archives*, 2(4). doi: 10.69557/ujrra.v2i4.62

28. Abdullahi, A. Y., Baballe, M. A. (2024). Benefits and Drawbacks of Robotic Firefighting. In *Global Journal of Research in Engineering & Computer Sciences*, 4(1), 6–10. doi: 10.5281/zenodo.10493053

29. Devansh V Desai, Yagnesh R Thakar, Prof. Chirag S Dalal Dr. Himanshu Kumar Patel. (2025). Fire fighting robot. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 5(12), 69–74. doi: 10.48175/ijarsct-23614

30. Mathur, M., Gupta, B., Goyanka, D., Sikarwar, N. (2023). Fire fighting robot. *International Journal of Current Science*, 2(13). Available at: <https://rjpn.org/ijcspub/papers/IJCSP23B1384.pdf>

31. Taborri, J., Pasinetti, S., Cardinali, L., Perroni, F., Rossi, S. (2021). Preventing and monitoring work-related diseases in firefighters: A literature review on sensor-based systems and future perspectives in robotic devices. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(18), 9723. doi: 10.3390/ijerph18189723

32. Sathiabalan, N. A., Lokimi, A. F. M., Jin, O. Z., Hasrin, N. S. M., Zain, A. S. M., Ramli, N., Zakaria, H. L., Ariffin, W. N. S. F. W., Hashim, N. B. M., Taib, M. H. M. (2021). Autonomous robotic fire detection and extinguishing system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2107(1), 012060. doi: 10.1088/1742-6596/2107/1/012060

33. Swathi, C., Khushal Raj, K., Gopu A. (2025). Fire Fighter Robot with Night Vision Camera. *International Journal for Research Trends and Innovation*, 3(10), 21 – 25. Available at: <https://www.ijrti.org/papers/IJRTI2503204.pdf>

34. Kumar, K., Kumar, G., Bhardwaj, H., Gupta, V. (2025). Autonomous fire-fighting robot. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 12(4), 802 – 808. Available at: URL: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2504196.pdf>

35. Talavera, N. F., Roldán-Gómez, J. J., Martín, F., Rodríguez-Sánchez, M. C. (2023). An autonomous ground robot to support firefighters' interventions in indoor emergencies. *Journal of Field Robotics*. doi: 10.1002/rob.22150

36. Kargapolova, E. O., Kuleshov, V. V., Yu Scuba, P. (2021). Assessment of the use of robotic equipment for extinguishing fires at oil refining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 720(1), 012086. doi: 10.1088/1755-1315/720/1/012086

37. Kharkharov, D. E., Danchenko, Yu. M. (2023). Bezpeka vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ u viiskovykh operatsiiakh. U Bezpeka liudyny u suchasnykh umovakh, 48–50. NTU "KhPI". Available at:

<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79470>

38. Ma, Y., Zhang, S., Wang, Y. (2022). Design of home-use fire fighting robots and research on automatic control system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2234(1), 012014. doi: 10.1088/1742-6596/2234/1/012014

39. Maruf, M. M., Sagor, M. M. H., Kanta, S. K., Imran, M. H. (2025). An autonomous arduino-based firefighting robot for laboratory environments. *International Journal of Computer Applications*, 187(28), 56–65. doi: 10.5120/ijca2025925488

40. Sivakumar, M., Kanakarajan, P., Dharun, S., Kirubakaran, R., Girivasan, M. (2024). Development of an artificial intelligent firefighting robot and experiment investigation on fire scene patrol. *E3S Web of Conferences*, 547, 02010. doi: 10.1051/e3sconf/202454702010

41. Schrön, M., Heisel, F., Pflöging, B. (2025). FAR: A firefighter assistant robot. *Y AutomationXP25: Hybrid automation experiences*. Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-4101/paper3.pdf>

42. Negrila, E. (2024). Explainable AI for human supervision over firefighting robots The influence of on-demand explanations on human trust. *Bachelor of Computer Science and Engineering*, Delft University of Technology. Available at: <https://repository.tudelft.nl/>

43. Muhammad, B., Muhammad, S., Surajo, A. Dele, Ya., Abdulmuhaimin, M. (2023). Robots for Fighting Fires: A Comparative Analysis. *Journal of research and review archives*, 2(4), 57–61. doi: 10.5281/zenodo.10384140

44. Tamura, Y., Amano, H., Ota, J. (2020). Analysis of firefighting skill with a teleoperated robot. *ROBOMECH Journal*, 7(1). doi: 10.1186/s40648-020-00177-y

45. Saturday, A., O, I. K. (2023). Design and development of an unmanned fire fighting robot. *Scholars Journal of Engineering and Technology*, 11(03), 84–90. doi:10.36347/sjet.2023.v11i03.009

46. Patil, S., Deshmukh, S., Talmale, M., Gadhe, M., Devkar, U. (2023). Fire fighting robot. *International conference on communication and information processing (ICCIP-2023)*. Elsevier- SSRN. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4669126

47. Amol Uttam Kawade, Piyush Ashok Kawade, Akshaan Pradeep Kaware, Akshat Abhay Kkulthe, Amruta Chandrakant Amune. (2022). Smart fire fighting robot. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 7(2), 157–162. doi: 10.30574/wjaets.2022.7.2.0137

48. Podvalnyi, A. O., Yankovskyi, O. H. (2025). Zastosuvannia ta mozhlyvosti bezpilotnykh litalnykh aparativ u zabezpechenni publichnoi ta hromadskoi bezpeky. *Pidhotovka pravookhorontsiv v systemi MVS Ukrainy v umovakh voiennoho stanu. Kharkivskiy natsionalnyi universytet vnutrishnikh sprav*, 320–323. Available at: <https://dspace.univd.edu.ua/server/api/core/bitstreams/03f50ee1-20ff-4a31-ad04-c5d8ce47f16f/content>

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 31.05.2026