

ПРОАКТИВНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ТА АКТИВНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ВІД ПОЖЕЖ

Костарєв Д.Б.

к.т.н. директор, ТОВ «Флексіс»
ORCID ID: 0009-0006-7528-031X

Тєвяшев А.Д.

д.т.н., професор
ORCID ID: 0000-0001-5261-9874

Сізова Н.Д.

докт. фіз.-мат. наук, професор, кафедра КН та ІТ,
Харківський національний університет міського господарства імені Бекетова
ORCID ID: 0000-0002-0103-1939

Ткаченко В.П.

к.т.н., професор, кафедра «Медіасистем та технологій»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0002-5076-0724

***Анотація.** Обґрунтовано науково-технічну концепцію проактивного захисту від пожеж об'єктів, що поєднує раннє виявлення ознак займання, прогнозування розвитку небезпечної події, автоматизовану підтримку прийняття рішень і кероване активне пригнічення осередків вогню. Об'єкт представляє собою кіберфізичну систему, що безперервно вимірює стан зовнішнього середовища, аналізує відео- та тепловізійні дані, оцінює ризик, прогнозує можливий розвиток подій і завчасно готує захисний контур.*

***Ключові слова:** пожежна безпека, штучний інтелект, комп'ютерний зір, тепловізійне спостереження.*

Вступ

Природні пожежі, пожежі у зонах забудови та техногенні займання на об'єктах критичної інфраструктури дедалі частіше виникають як наслідок поєднання кліматичних, урбанізаційних, технологічних і воєнних чинників. Для України така проблема має особливий зміст, оскільки пожежні ризики посилюються ракетними ударами, атаками безпілотних апаратів, руйнуванням енергетичних і промислових об'єктів, пошкодженням транспортної інфраструктури та небезпекою повторних вибухів. У таких умовах пожежна безпека перестає бути лише інженерною характеристикою будівлі і перетворюється на задачу динамічного управління ризиком у реальному часі.

Традиційна логіка пожежогасіння передбачає, що система реагує після досягнення певного порогу: з'явився дим у приміщенні, спрацював датчик температури, оператор підтвердив подію або пожежні підрозділи отримали

повідомлення від очевидців. Такий підхід є недостатнім для природних пожеж, пожеж у гірській місцевості, пожеж на межі лісу та забудови, а також для воєнних сценаріїв, де час від первинного ураження до масштабного займання може вимірюватися хвилинами.

Наукова проблема полягає у переході від реактивної пожежної безпеки до проактивного управління, де система не лише фіксує факт займання, а й визначає передумови пожежі, прогнозує її розвиток, розраховує ризик для конкретного об'єкта, формує рекомендації для оператора, переводить виконавчі засоби у стан готовності та, за визначених умов, ініціює локальне пригнічення небезпеки. Така модель потребує поєднання комп'ютерного зору, тепловізійного контролю, геоінформаційного аналізу, сенсорних мереж, автономного живлення, захищених каналів зв'язку, математичного прогнозування та гідравлічного керування засобами гасіння.

Запропонована у монографії концепція базується на інтеграції двох взаємодоповнювальних рівнів. Перший рівень – Panoptes – виконує роль інтелектуального спостереження, розпізнавання та геоприв'язки небезпечних подій. Другий рівень – FireHalo – формує активний захисний контур об'єкта, здатний створювати водяні завіси, зволожувати критичні поверхні, подавати воду або пінний розчин у цільові зони, контролювати тиск, витрату, стан клапанів і резервуари. Разом ці рівні утворюють замкнений контур: виявлення – перевірка – геолокація – оцінювання ризику – сповіщення – активація – контроль результату.

Мета та задачі дослідження

Мета роботи є розробка і обґрунтування концепції управління пожежною безпекою.

Задачами роботи є:

- аналіз стану досліджень наукових підходів до питань проактивного захисту від пожеж;
- моделювання процесу переходу від реактивної пожежної безпеки до проактивного управління на основі штучного інтелекту;
- проектування архітектури інтелектуальної інформаційної системи пожежної безпеки з використанням Panoptes + FireHalo;
- розробка військово-кризового сценарію інтеграції з траєкторним спостереженням за безпілотними апаратами;
- створення математичних моделей, алгоритмів розпізнавання, злиття даних і прийняття рішень;
- дослідження питань кіберстійкості, автономності і надійності інформаційної системи пожежної безпеки;
- розробка методики впровадження та перевірки ефективності інтелектуальної системи.

Основна частина

Стан проблеми та світовий досвід

1. Багаторівневі системи Китаю як приклад масштабування.

Китайський досвід демонструє можливість побудови багаторівневої системи спостереження, де супутникові дані, безпілотні апарати, стаціонарні пости спостереження, професійні пожежні підрозділи, локальні пункти реагування та мобільні засоби гасіння зведені в єдину інформаційну платформу. Науково важливим у такому підході є не лише кількість сенсорів, а й скорочення часу між первинною ознакою небезпеки та прибуттям сил реагування. Якщо система здатна зменшити цей інтервал з десятків хвилин до кількох хвилин, площа потенційного поширення пожежі зменшується нелінійно, оскільки рання стадія займання характеризується значно меншими тепловими потоками та нижчою швидкістю розповсюдження фронту вогню.

У китайських провінціях застосовуються супутники з частим оновленням даних, безпілотні апарати з тепловізорами, стаціонарні оптико-тепловізійні пости, мобільні платформи з дронами для скидання вогнегасних зарядів, високонапірні установки, роботизовані наземні комплекси та локальні водні резервуари. Такий підхід є корисним як референс для проєктування системи Panoptes + FireHalo, однак запропонована у цій роботі концепція відрізняється зміщенням акценту від загального регіонального моніторингу до активного захисту конкретного об'єкта, житлової групи, критичного вузла або промислової території (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристика підходів до проблеми пожеже гасіння

Регіональний підхід	Сильна сторона	Типове обмеження	Висновок для Panoptes + FireHalo
Китай	Багаторівнева мережа спостереження, безпілотні апарати, локальні пости, швидке реагування	Висока складність і залежність від державної інфраструктури	Доцільно адаптувати принцип багаторівневості для об'єкта
США	Супутники, камери, диспетчерські центри, громадські карти	Переважно інформаційне сповіщення без локального активного контуру	Потрібен міст між виявленням і фізичним захистом
Європа	Геоінформаційне планування, координація служб, моделі ризику	Менша орієнтація на автономний захист окремого будинку	Потрібна сумісність з картами, планами евакуації та службами
Австралія	Досвід роботи у важких кліматичних умовах і на великих територіях	Складність підтримання зв'язку та живлення	Необхідна автономність і резервування
Україна та Близький Схід	Поєднання природних, техногенних і воєнних пожежних ризиків	Високі вимоги до живучості, кіберстійкості та швидкого реагування	Потрібна інтеграція траєкторного спостереження за безпілотними апаратами з пожежним захистом

2. США: супутниковий, камерний та громадський рівні.

У Сполучених Штатах Америки об'єднуються результати супутникового виявлення теплових аномалій, широких мереж камер спостереження, диспетчерських центрів і громадських карт небезпеки. Перевагою цього підходу є високе територіальне охоплення та інтеграція з центрами надзвичайного управління. Обмеженням є те, що більшість таких систем орієнтована на інформаційне виявлення та сповіщення, але не виконує автоматизоване активне пригнічення небезпеки безпосередньо на рівні об'єкта.

Для наукової моделі Panoptes + FireHalo цей досвід важливий як доказ того, що інформаційний рівень має поєднуватися з виконавчим. Інакше виникає розрив між знанням про небезпеку та фізичною дією. Саме цей розрив є основною причиною, чому раннє виявлення саме по собі не гарантує збереження об'єкта [1].

3. Європейський підхід: геоінформаційна координація та цивільний захист.

Європейська модель робить акцент на геоінформаційних платформах, картографуванні пожежної небезпеки, моделюванні поширення вогню, координації ресурсів і транскордонній взаємодії служб цивільного захисту. Така модель є системною, оскільки поєднує метеорологічні дані, карти рослинності, історичні пожежні події, супутникові знімки та диспетчерські процедури. Для запропонованої архітектури це означає необхідність створення не лише локальної системи гасіння, а й інформаційного шару, сумісного з картами ризику, цифровими планами об'єктів, маршрутами евакуації та планами взаємодії з рятувальними службами.

4. Австралія, Ізраїль та країни високого пожежного ризику.

Австралійський досвід показує, що системи раннього виявлення мають працювати в умовах великих відстаней, нестійкого зв'язку, високої температури, сильного вітру та складного рельєфу. Для цього застосовуються автономні камери, супутникові джерела, локальні мережі та алгоритми розпізнавання диму. Ізраїльський та близькосхідний контекст додає ще один вимір: пожежі можуть бути наслідком не лише природних чинників, а й бойових дій, падіння уламків, ударів безпілотних апаратів або ракетних атак. Це формує потребу у системах, які поєднують цивільний пожежозахист із кризовою безпекою об'єктів.

Українські наукові підходи і воєнний контекст

Проаналізовані матеріали щодо українських і світових інформаційних систем пожежної безпеки свідчать, що у 2020-2026 роках основними напрямками досліджень стали раннє виявлення пожеж, геоінформаційний аналіз, супутниковий моніторинг, сенсорні мережі, системи підтримки прийняття рішень, захист критичної інфраструктури та кібербезпека. Для України ці напрями мають не лише академічне, а й прикладне значення, оскільки пожежі часто виникають унаслідок бойових дій, руйнування промислових підприємств, атак на енергетичні об'єкти та пошкодження систем життєзабезпечення. Сьогодні сучасні інформаційні системи пожежної безпеки інтегрують штучний інтелект, геоінформаційні системи, інтернет речей, супутниковий моніторинг,

системи підтримки прийняття рішень, безпілотні технології та засоби кіберзахисту. Важливо, що така інтеграція відповідає не лише світовим тенденціям, а й потребам воєнного часу: автономності, резервуванню, стійкості до пошкоджень і здатності працювати за відсутності стабільного зв'язку.

Українські дослідження охоплюють інформаційні підсистеми попередження пожежної небезпеки для ситуаційних центрів, супутникове виявлення потенційно небезпечних пожеж на території України, застосування машинного навчання для аналізу знімків, системи підтримки прийняття рішень для моніторингу лісових пожеж, протипожежний захист об'єктів критичної інфраструктури та захист диспетчерських систем керування. Вони формують наукове підґрунтя для переходу від фрагментарних рішень до єдиної платформи проактивного управління пожежним ризиком [2]. Окремим внеском цієї монографії є поєднання українських досліджень із концепцією об'єктового активного захисту. Якщо більшість наукових систем фокусується на моніторингу, класифікації або підтримці рішень, то Panoptes + FireHalo пропонує замкнений контур: система не лише визначає ризик, а й фізично готує або активує захисні засоби [3]. Для воєнного контексту це особливо важливо, оскільки кожна хвилина між ударом, виникненням пожежі та початком гасіння суттєво впливає на масштаб руйнувань (табл. 2).

Таблиця 2 – Характеристика напряму українських досліджень

Напрямок українських досліджень	Наукове значення	Інтеграція у запропоновану концепцію
Підсистеми попередження пожежної небезпеки	Ймовірнісне оцінювання, температурні моделі, нейромережевий аналіз	Формування рівня небезпеки та порогів активації
Супутниковий моніторинг	Виявлення теплових аномалій, оцінка масштабів пошкоджень	Далекий рівень спостереження і зовнішня валідація подій
Геоінформаційні системи	Карти ризику, маршрути евакуації, прогнозування поширення	Картографічний шар FireHalo та взаємодія зі службами
Сенсорні мережі	Безперервний моніторинг температури, диму, газів і вологості	Локальні вузли периметра, фасадів, дахів і резервуарів
Безпілотні технології	Тепловізійна розвідка, огляд важкодоступних зон	Додаткова перевірка джерела та уточнення координат
Кіберзахист	Захист критичних систем, автентифікація, контроль доступу	Безпечне керування насосами, клапанами, сповіщеннями та журналами подій

Концепція проактивного захисту від пожеж

Проактивний захист від пожеж визначається як сукупність методів, засобів і алгоритмів, спрямованих на виявлення передумов пожежі, прогнозування її розвитку та підготовку або запуск захисних дій до моменту, коли займання досягне критичної зони об'єкта. У цьому сенсі система виконує не тільки функцію спостереження, а й функцію керування фізичним середовищем.

Основними принципами проактивного захисту від пожеж є: безперервність спостереження; багатоканальність даних; локальна обробка на сенсорному вузлі; оцінювання довіри до події; геоприв'язка джерела; урахування вітру, рельєфу та поточного або можливого горіння; зонне керування виконавчими пристроями; логування дій; підтвердження на ранніх етапах людиною і автоматизація лише для перевірених сценаріїв (табл. 3).

Принципово важливо, що така система не повинна бути “чорною скринькою”. Для пожежної безпеки необхідні прозорі рівні ризику, зрозумілі рекомендації, можливість ручного втручання, документальна фіксація причин активації та технічний контроль готовності. Тому запропонована модель містить п'ять станів: спостереження, попередження, підтверджена небезпека, підготовка захисного контуру, активний захист.

Таблиця 3 – Стан запропонованої системи

Стан системи	Умова переходу	Основна дія
Спостереження	Нормальний фон, відсутність стійких ознак диму або теплової аномалії	Періодичний аналіз відео, тепловізійних даних і сенсорів
Попередження	Поява підозрілої ознаки або слабкої теплової аномалії	Фіксація події, підвищення частоти аналізу, підготовка сповіщення
Підтверджена небезпека	Стійке підтвердження диму, полум'я, жару або зовнішнього ударного чинника	Геоприв'язка, оцінювання ризику, повідомлення власника або оператора
Підготовка захисного контуру	Небезпека наближається або прогнозована зона ураження перетинає захисний периметр	Перевірка тиску, резервуару, клапанів, живлення, режиму водяної завіси
Активний захист	Перевищено поріг ризику, підтверджено загрозу для об'єкта або увімкнено аварійний режим	Зонне зволоження, водяна завіса, цільове пригнічення, контроль результату

Архітектура Panoptes + FireHalo

1. Рівень спостереження Panoptes.

Рівень Panoptes виконує функцію інтелектуального спостереження за територією навколо об'єкта [4]. До його складу входять денні камери для аналізу контексту та видимих ознак диму або полум'я, тепловізійні канали для нічного спостереження і виявлення теплових аномалій, орієнтаційні датчики для визначення напрямку на джерело події, локальний обчислювальний модуль для виконання моделей розпізнавання без постійної залежності від хмарних сервісів, а також модуль документальної фіксації зображень, коротких відеофрагментів, рівнів довіри і технічних параметрів [5].

На відміну від звичайних камер спостереження, Panoptes розглядається як сенсорний вузол із просторовою орієнтацією. Тобто кожна виявлена подія має не лише клас (“дим”, “полум'я”, “теплова пляма”, “іскри”, “безпілотний апарат”), а

й напрямок, приблизну відстань, сектор невизначеності, часову динаміку та ймовірність розвитку небезпеки.

2. Рівень активного захисту FireHalo.

FireHalo є виконавчим рівнем, що перетворює інформаційне виявлення на фізичну дію. Система може включати периметральні колони, дахові або фасадні вузли, високонапірні форсунки, водяні завіси, насосний модуль, резервуар або підключення до басейну, датчики тиску і витрати, клапани зонного керування, резервне живлення та локальний контролер [6]. Призначення FireHalo полягає не лише у гасінні вже сформованого полум'я, а й у попередньому зволоженні критичних поверхонь, перехопленні іскор, зниженні впливу променистого теплового потоку та створенні захисного бар'єра.

FireHalo – це зовнішній інтелектуальний контур захисту, який розміщується навколо будинку, поєднує архітектурне виконання, тепловізійне спостереження, камери, форсунки високого тиску, підключення до водного резервуару та автономне виявлення небезпеки. Ця ідея є важливою, оскільки дозволяє інтегрувати пожежну безпеку не як додатковий аварійний пристрій, а як елемент архітектури об'єкта.

3. Шестирівнева функціональна модель.

Узагальнена архітектура Panoptes + FireHalo може бути подана як шестирівнева функціональна модель: рівень оптико-тепловізійного спостереження; рівень локального аналізу та фільтрації хибних спрацювань; рівень геолокації та оцінювання ризику; рівень мобільного і диспетчерського сповіщення; рівень активного керування насосами, клапанами і форсунками; рівень конструктивної інтеграції у будівельні модулі, фасади, дахи або периметр (табл. 4).

Таблиця 4 – Характеристика шестирівневої функціональної моделі

Рівень	Функція	Основні дані	Результат
Спостереження	Відео- та тепловізійний контроль	Кадри, теплові карти, орієнтація камери	Первинні ознаки події
Локальний аналіз	Розпізнавання диму, полум'я, тепла, іскор, безпілотних апаратів	Ознаки зображення, часові послідовності	Клас події та рівень довіри
Геолокація	Оцінювання напрямку, координат і зони невизначеності	Азимут, кут місця, карта, рельєф, другий сенсор	Позначка на карті та сектор ризику
Оцінювання ризику	Урахування відстані, вітру, горючого навантаження, критичності об'єкта	Дані середовища та стан системи	Рівень небезпеки і рекомендація
Керування захистом	Підготовка або запуск зон FireHalo	Тиск, витрата, клапани, резервуар, живлення	Зволоження, водяна завіса, цільове пригнічення
Документування	Ведення журналу подій, звітність, післяподійний аналіз	Відео, події, дії оператора, телеметрія	Доказова база, технічний аудит, навчальні дані

Воєнно-кризовий сценарій інтеграції з траєкторним спостереженням за безпілотними апаратами

Найбільш інноваційним продовженням концепції є інтеграція цивільного захисту від пожеж з воєнно-кризовим рівнем Raportes, який здатний виявляти безпілотні літальні апарати, супроводжувати їхні траєкторії та прогнозувати зони потенційного падіння, влучання або руйнування. У країнах, де тривають бойові дії, частина таких апаратів може не бути знешкоджена. Вони можуть досягати цілі або падати після втрати управління, спричиняючи пожежі на енергетичних об'єктах, складах, промислових майданчиках, житлових кварталах, лісових масивах або транспортній інфраструктурі.

З погляду цивільного захисту ключовим є не питання впливу на апарат, а питання готовності пожежної системи до вторинного наслідку. Якщо система бачить траєкторію безпілотного апарата, вона може визначити ймовірний сектор ризику і заздалегідь підготувати пожежні ресурси: перевести насосні модулі у режим очікування, перевірити тиск, підготувати водяні завіси, попередити диспетчерів, надіслати сигнал мобільним групам, активувати відеоспостереження за критичними зонами та побудувати прогноз маршруту реагування [7-9].

Така модель створює новий клас систем: не просто раннє виявлення пожежі, а попереджувальне протипожежне управління до факту займання. Вона особливо актуальна для України, країн Близького Сходу, прикордонних територій, енергетичних об'єктів, нафтобаз, логістичних вузлів, портів, аеропортів, центрів управління, лікарень і житлових комплексів у зонах підвищеної воєнної загрози (табл. 5).

Таблиця 5 – Етапи функціонування системи

Режим	Передумова	Дія системи	Мета
Спокій	Загроз не виявлено	Планове спостереження і самодіагностика	Підтримання готовності
Повітряна тривога об'єктового рівня	Виявлено небезпечний апарат у віддаленому секторі	Підвищення частоти аналізу, підготовка карти ризику	Скорочення часу переходу до реагування
Прогнозована зона ураження	Траєкторія перетинає сектор поблизу об'єкта	Перевірка насосів, клапанів, води, зв'язку, резервного живлення	Технічна готовність до пожежі
Очікуване ураження	Висока ймовірність падіння або влучання в небезпечну зону	Сповіщення диспетчера, пожежних служб, власників, мобільних груп	Підготовка людей і ресурсів
Післяподійний контроль	Зафіксовано удар, теплову аномалію, дим або полум'я	Активація локальної зони, відеопідтвердження, контроль результату	Локалізація пожежі на ранній стадії

Сценарій функціонування складається з таких етапів: виявлення повітряної загрози; побудова та оновлення траєкторії; прогноз імовірної зони влучання або

падіння; перетин цієї зони з картою критичних об'єктів і пожежонебезпечних матеріалів; розрахунок очікуваного пожежного ризику; сповіщення пожежної служби та власників об'єктів; переведення FireHalo у режим попередньої готовності; після події – автоматичне виявлення диму, тепла або полум'я і запуск відповідних зон захисту (рис. 1).

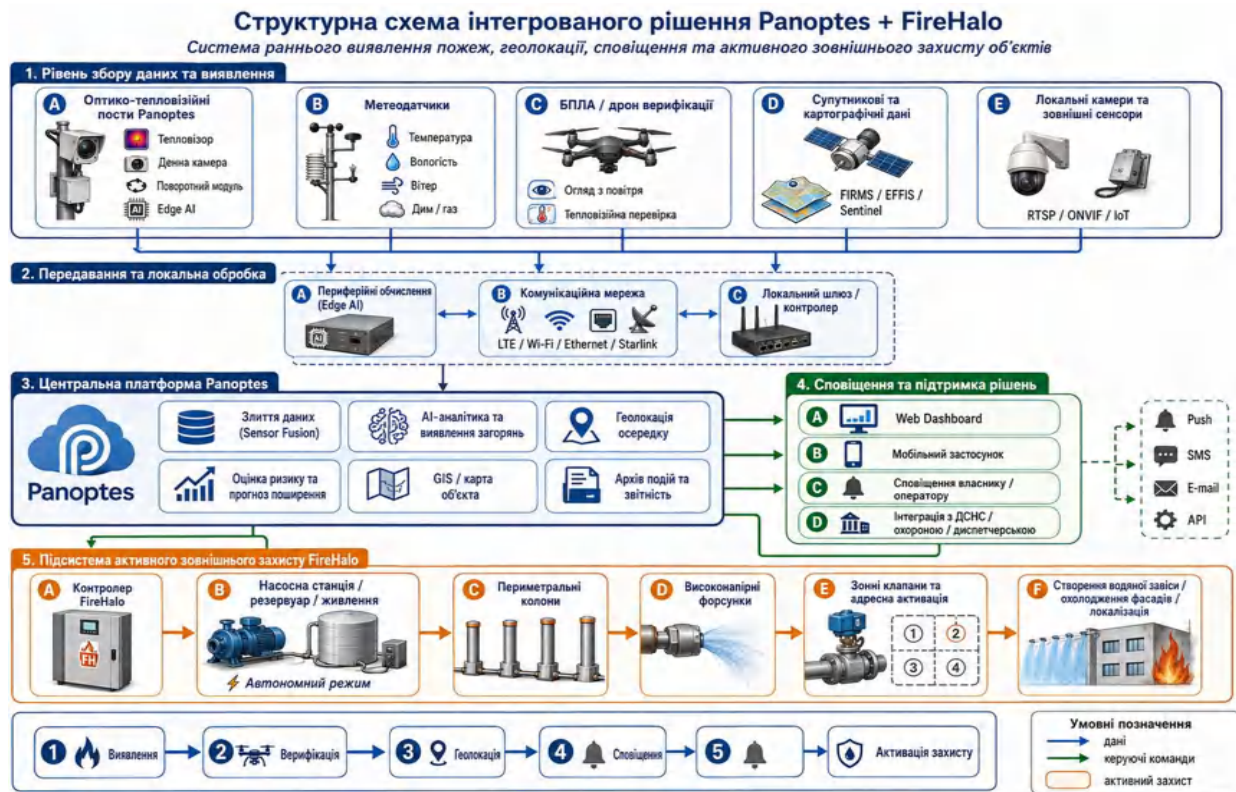


Рисунок 1– Структурна схема інтегрованого рішення

Математичні моделі

1. Узагальнена модель пожежного ризику.

Пожежний ризик для об'єкта доцільно розглядати як функцію ймовірності виникнення джерела займання, імовірності його поширення до об'єкта, потенційних збитків і готовності системи захисту [10, 11]. У спрощеному вигляді інтегральний ризик можна записати так:

$$R(t) = P_i(t) \cdot P_s(t) \cdot L(t) \cdot [1 - G(t)], \quad (1)$$

де $R(t)$ – поточний ризик;

$P_i(t)$ – імовірність виникнення займання;

$P_s(t)$ – імовірність поширення вогню до критичної зони;

$L(t)$ – очікуваний рівень збитку;

$G(t)$ – готовність системи захисту.

Зростання готовності системи, наприклад за рахунок попереднього запуску насосів або підготовки водної завіси, зменшує ефективний ризик навіть до факту прямого контакту вогню з об'єктом.

2. Байєсівське оновлення довіри до події.

Оскільки ознаки диму, полум'я та теплових аномалій можуть мати хибні джерела, система повинна постійно оновлювати довіру до події на основі нових спостережень. Для цього застосовується байєсівська схема:

$$P(F | z_1, \dots, z_n) = \frac{P(z_n | F) \cdot P(F | z_1, \dots, z_{n-1})}{P(z_n)}, \quad (2)$$

де F – подія пожежі або небезпечного теплового процесу;

z_n – нове спостереження: кадр, теплова карта, показник сенсора, напрямок вітру, підтвердження з безпілотного апарата або зовнішнє повідомлення.

Така формалізація дозволяє не запускати систему гасіння за одиничним шумовим сигналом, але швидко підвищувати рівень небезпеки за стійких і взаємно узгоджених ознак.

3. Геолокація джерела займання.

Для одного стаціонарного сенсорного вузла координати джерела можуть бути оцінені як промінь або сектор невизначеності. Якщо координати вузла дорівнюють (x_0, y_0) , а азимут на подію – α , то множина можливих положень має вигляд:

$$x = x_0 + \rho \cos \alpha, \quad y = y_0 + \rho \sin \alpha, \quad \rho \in [\rho_{\min}, \rho_{\max}]. \quad (3)$$

За наявності двох вузлів або вузла і безпілотного апарата виконується перетин двох напрямків. З урахуванням похибок формується не точка, а еліпс довіри, площа якого зменшується зі зростанням кількості незалежних спостережень.

$$\Sigma_p = (H^T \cdot R_z^{-1} \cdot H)^{-1}, \quad (4)$$

де Σ_p – коваріаційна матриця похибки координат;

H – матриця геометрії спостереження;

R_z – матриця шумів вимірювання.

Менше значення визначника Σ_p означає точнішу локалізацію і, відповідно, більш економну активацію зон FireHalo.

4. Прогноз траєкторії безпілотного апарата для пожежної готовності.

У воєнно-кризовому сценарії стан повітряного об'єкта можна подати вектором:

$$x_k = [p_x, p_y, p_z, v_x, v_y, v_z]^T, \quad (5)$$

де p_x, p_y, p_z – просторові координати;

v_x, v_y, v_z – складові швидкості.

Прогноз на короткому горизонті виконується за дискретною моделлю руху:

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k, \quad (6)$$

де A – матриця переходу стану;

w_k – випадкове збурення, що враховує маневр, вітер, втрату керування або похибки спостереження.

Для цивільного захисту від пожеж результатом є не траєкторія ураження, а імовірна зона подальшого падіння або влучання:

$$Z_{impact} = \{p : (p - \hat{p})^T \Sigma_p^{-1} (p - \hat{p}) \leq \chi_\beta^2\}, \quad (7)$$

де $\hat{p}$ – прогнозований центр зони;

Σ_p – невизначеність прогнозу;

χ_β^2 – поріг довіри.

Якщо ця зона перетинає пожежонебезпечний об'єкт, система підвищує рівень готовності пожежного контуру.

5. Модель поширення фронту вогню.

Для прикладного прогнозування поширення вогню можна використовувати спрощену модель швидкості фронту, що залежить від типу горючого матеріалу, вологості, нахилу місцевості та вітру:

$$v_f = v_0 \cdot K_w(W, \theta_w) \cdot K_s(\varphi) \cdot K_m(M), \quad (8)$$

де v_f – швидкість фронту;

v_0 – базова швидкість для конкретного горючого матеріалу;

K_w – коефіцієнт впливу вітру;

K_s – коефіцієнт нахилу;

K_m – коефіцієнт вологості. Час досягнення критичної межі об'єкта можна оцінити як:

$$T_{arr} = \frac{d}{v_f}, \quad (9)$$

де d – відстань від осередку до захисної межі.

Якщо T_{arr} менший за суму часу підготовки системи і часу створення ефективної водяної завіси, система повинна переходити у режим попередньої активації.

6. Гідравлічна модель FireHalo.

Для зонного пожежогасіння необхідно забезпечити достатню витрату води або розчину в кожній активній зоні. Сумарна витрата дорівнює:

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n q_i u_i, \quad (10)$$

де q_i – витрата i -ї форсунки або зони;
 $u_i \in \{0,1\}$ – стан активації зони. Мінімальний об'єм резервуару для часу роботи τ визначається як:

$$V_{\min} = Q_{total} \cdot \tau \cdot k_r, \quad (11)$$

де k_r – коефіцієнт резерву, що враховує втрати, нерівномірність тиску, повторну активацію і технічний запас.

Тиск у вузлі повинен задовольняти умову:

$$P_i \geq P_{req} + \Delta P_{pipe} + \Delta P_{height}, \quad (12)$$

де P_{req} – мінімальний робочий тиск форсунки;

ΔP_{pipe} – втрати у трубопроводах;

ΔP_{height} – втрати на підйом води.

Ці співвідношення є основою для розрахунку насосної групи, діаметра труб, кількості зон і часу автономної роботи.

7. Оптимізація розміщення сенсорів і форсунок.

Оптимізація розміщення вузлів Panoptes і FireHalo може бути сформульована як задача максимізації покриття за обмежень бюджету, видимості, гідравліки та надійності:

$$\max \sum_{a \in A} w_a C_a(S), \text{ за умов } \sum_{s \in S} c_s \leq B, \quad (13)$$

де A – множина ділянок території;

w_a – вага небезпеки ділянки;

$C_a(S)$ – функція покриття ділянки набором сенсорів і виконавчих вузлів S ;

c_s – вартість вузла;

B – бюджет.

У воєнному сценарії ваги w_a повинні враховувати не лише природну пожежну небезпеку, а й імовірність ударів, критичність об'єкта, наявність легкозаймистих матеріалів і складність доступу пожежних підрозділів.

Алгоритми розпізнавання, злиття даних і прийняття рішень

Алгоритмічне ядро системи складається з кількох взаємопов'язаних задач: виявлення ознак небезпеки у видимому та тепловому діапазонах; відокремлення реальних подій від хибних спрацювань; оцінювання просторового положення джерела; прогнозування розвитку; визначення рівня ризику; вибір режиму реагування; контроль результату після активації.

Для аналізу зображень доцільно застосовувати згорткові нейронні мережі та моделі часової стабільності ознак. Дим відрізняється від хмар або туману не лише формою, а й динамікою: він має локальне джерело, спрямований рух під

впливом вітру, поступове розширення та специфічну текстуру. Полум'я має виражену просторово-часову мінливість, а теплова аномалія – підвищену температуру відносно локального фону. Тому класифікація повинна враховувати не один кадр, а коротку послідовність спостережень.

Злиття даних повинно об'єднувати відео, тепловізійні кадри, метеорологічні параметри, стан водного резервуару, тиск, витрату, карту місцевості, інформацію про горючі матеріали, траєкторії повітряних загроз і повідомлення зовнішніх служб. Результатом є не просто “тривога”, а структурований об'єкт події: тип, координати, сектор невизначеності, рівень довіри, рівень ризику, рекомендована дія, потрібний ресурс і очікуваний час до критичної межі (табл. 6).

Таблиця 6 – Злиття даних

Джерело даних	Тип ознак	Наукове використання	Рішення системи
Денна камера	Дим, полум'я, контекст місцевості	Виявлення та класифікація зображень	Підозра або підтвердження події
Тепловізор	Теплові плями, жар, нічні ознаки	Оцінювання температурного контрасту	Підтвердження небезпеки у темний час
Сенсори середовища	Вітер, вологість, температура, тиск	Прогноз поширення і готовності системи	Корекція рівня ризику
Карта та рельєф	Схили, будівлі, рослинність, шляхи доступу	Моделювання напрямку поширення	Пріоритет зон FireHalo
Траєкторії повітряних загроз	Напрямок, швидкість, зона невизначеності	Прогноз імовірної зони падіння	Попередня готовність пожежного контуру
Телеметрія FireHalo	Тиск, витрата, клапани, вода, живлення	Контроль виконання дії	Підтвердження ефективної активації

Система підтримки прийняття рішень має працювати за принципом поступового нарощування реакції. Низькі рівні ризику призводять до фіксації події і сповіщення; середні – до рекомендації оператору та підготовки виконавчих вузлів; високі – до активації попередньо визначених сценаріїв, якщо це дозволено правилами експлуатації. Такий підхід мінімізує ризик хибного запуску і водночас зберігає можливість швидкого реагування.

Кіберстійкість, автономність і надійність

Оскільки Panoptes + FireHalo керує не лише інформаційними повідомленнями, а й фізичними виконавчими пристроями, питання кіберстійкості є критичним. Несанкціоноване ввімкнення або вимкнення насосів, підроблення телеметричних даних, блокування сповіщень або втручання в диспетчерські системи можуть створити загрозу для людей і об'єктів. Тому система має проектуватися за принципами мінімальних прав доступу, багатофакторної автентифікації, криптографічного захисту каналів,

документування команд, розмежування ручного та автоматичного керування, а також локальної працездатності за втрати зовнішнього зв'язку [12].

Важливість захисту критичної інфраструктури, диспетчерських систем керування, систем виявлення вторгнень, архітектури нульової довіри та стійкості до кібератак є критично важливою для функціонування всієї системи. Для Panoptes + FireHalo це означає, що пожежний контур не повинен залежати від одного каналу зв'язку, одного джерела живлення або одного обчислювального вузла. Важливо забезпечити острівний режим роботи: локальне виявлення, локальне ухвалення аварійного рішення, резервне живлення, автономний резервуар і механічно безпечні стани клапанів.

Надійність системи оцінюється не тільки точністю розпізнавання, а й готовністю до виконання фізичної дії. Можна ввести показник функціональної готовності:

$$G(t) = g_w(t) \cdot g_p(t) \cdot g_e(t) \cdot g_c(t) \cdot g_v(t), \quad (14)$$

де g_w – готовність водного ресурсу;

g_p – готовність насоса;

g_e – готовність живлення;

g_c – готовність зв'язку або локального керування;

g_v – готовність клапанів і форсунок.

Якщо хоча б один множник наближається до нуля, загальна готовність системи різко зменшується, що має бути відображено в мобільному застосунку та диспетчерському інтерфейсі.

Методика впровадження та перевірки ефективності

Впровадження системи доцільно виконувати поетапно. Перший етап – інженерне обстеження об'єкта: рельєф, рослинність, напрямки переважаючих вітрів, джерела води, точки живлення, місця встановлення сенсорних вузлів, критичні фасади, дахові зони, евакуаційні маршрути і можливі зовнішні загрози. Другий етап – моделювання покриття та ризиків. Третій – встановлення мінімальної конфігурації: один або кілька вузлів Panoptes, базова карта об'єкта, мобільне сповіщення, насосний модуль, декілька зон FireHalo. Четвертий – польове випробування з контрольованими джерелами диму, тепловими макетами, перевіркою тиску, витрати і часу реакції [13-15].

Для воєнно-кризових об'єктів потрібно додати окремий етап інтеграції з інформацією про повітряні загрози, але виключно в межах цивільного захисту. Перевіряється здатність системи отримувати або формувати прогноз зони ризику, підвищувати готовність пожежного контуру, повідомляти відповідальні служби та документувати подію (табл. 7).

Експериментальна перевірка повинна включати не лише показники розпізнавання, а й повний цикл: виявлення, повідомлення, підтвердження,

активація, контроль тиску, контроль фактичного зволоження, збереження журналу, відновлення системи після спрацювання. Саме повний цикл є головним доказом практичної цінності концепції [16, 17].

Таблиця 7 – Етапи інтеграції

Показник	Позначення	Метод оцінювання	Цільове значення для пілота
Час первинного виявлення	T_det	Інтервал від появи ознаки до події в системі	Мінімальний, бажано до хвилинного масштабу
Час підтвердження	T_conf	Інтервал до стійкої класифікації події	Залежить від рівня хибних спрацювань
Час готовності FireHalo	T_ready	Інтервал від команди до робочого тиску	Менший за прогнозований час підходу небезпеки
Точність геолокації	E_geo	Відстань між оцінкою і фактичним джерелом	Достатня для вибору правильної зони
Частка хибних тривог	FPR	Кількість хибних подій на одиницю часу	Допустима для експлуатації без втоми оператора
Готовність системи	G	Комбінований показник води, живлення, зв'язку, насосів і клапанів	Висока у пожежонебезпечний період
Ефективність пригнічення	η_{sup}	Зменшення теплового потоку або площі займання	Підтверджується польовими тестами

Результати досліджень

Наукова новизна, практична цінність і обмеження

Наукова новизна запропонованої концепції полягає у формуванні інтегрованої кіберфізичної моделі об'єктового захисту від пожеж, де раннє виявлення, геолокація, прогнозування ризику, траєкторне спостереження за зовнішніми військовими загрозами, підготовка виконавчих засобів і активне пригнічення об'єднані в єдину систему проактивного управління. У більшості наявних рішень ці функції розділені: одні системи лише виявляють, інші лише сповіщають, треті лише зволожують об'єкт вручну або за зовнішнім сигналом. Panoptes + FireHalo поєднує інформаційну та фізичну реакцію.

Практична цінність полягає у можливості застосування для приватних будинків у пожежонебезпечних регіонах, житлових комплексів, ранчо, виноробних господарств, складів, енергетичних об'єктів, промислових майданчиків, об'єктів критичної інфраструктури і територій, що зазнають воєнних атак. Для України система може бути особливо корисною у захисті об'єктів, де пожежа після удару або падіння уламків здатна спричинити вторинні катастрофічні наслідки.

Обмеження концепції пов'язані з необхідністю польової перевірки моделей виявлення у різних погодних умовах, сертифікації гідравлічних і електричних вузлів, дотримання вимог пожежних норм, захисту персональних даних при відеоспостереженні, мінімізації хибних спрацювань, гарантування кіберстійкості та розроблення чітких правил автоматичної активації.

Автоматичний режим має впроваджуватися лише після достатньої статистичної валідації та погодження з відповідними нормативними вимогами.

Висновки

У монографії показано, що сучасний розвиток пожежної безпеки переходить від пасивного захисту і реактивного реагування до проактивних інтелектуальних систем, здатних виявляти ознаки небезпеки, оцінювати ризик, прогнозувати розвиток подій і керувати фізичними засобами захисту. Світовий досвід Китаю, Сполучених Штатів Америки, Європи, Австралії та країн із високими воєнними ризиками підтверджує важливість багаторівневих систем спостереження, але також демонструє потребу в локальному активному контурі захисту конкретного об'єкта.

Українські наукові матеріали засвідчують високий рівень актуальності інформаційних систем пожежної безпеки в умовах воєнних загроз. Найважливішими напрямками є штучний інтелект, геоінформаційні системи, сенсорні мережі, супутниковий моніторинг, безпілотні технології, системи підтримки прийняття рішень, кіберзахист і захист критичної інфраструктури. Запропонована концепція Panoptes + FireHalo розвиває ці напрями, додаючи до них активне керування пожежозахисним контуром.

Ключовим новим елементом є воєнно-кризовий сценарій, у якому система Panoptes, що виявляє та супроводжує повітряні загрози, використовується для пожежної готовності: прогнозування імовірної зони падіння або влучання безпілотного апарата, попередження пожежних служб, підготовка FireHalo, підвищення готовності води, насосів, клапанів і локальних команд реагування. Такий підхід формує нову категорію цивільних систем: попереджувальне протипожежне управління до виникнення пожежі.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на польову перевірку моделей розпізнавання диму, полум'я, теплових аномалій та іскор; оцінювання ефективності водяних завіс; розроблення цифрового двійника об'єкта; оптимізацію розміщення вузлів; створення наборів даних для умов воєнних пожеж; сертифікацію гідравлічних модулів; побудову захищеної архітектури керування і розроблення методики взаємодії з підрозділами цивільного захисту.

Список літератури.

1. Barmproutis, P., Papaioannou, P., Dimitropoulos, K., & Grammalidis, N. (2020). A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing. *Sensors*, 20(22), 6442. <https://doi.org/10.3390/s20226442>.
2. Орещенко, А.В., Осадчий, В.І., Савенець, М.В., & Балабух, В.О. (2020). Виявлення і моніторинг потенційно небезпечних пожеж на території України за даними супутникового сканування, (11), 33-44. *Вісник Національної академії наук України*. <https://doi.org/10.15407/visn2020.11.033>.
3. Писарчук, О.О., & Кошара, А.В. (2024). Аналіз індикаторів загроз інформаційній безпеці в інформаційно-телекомунікаційних системах за результатами застосування SIEM-

систем. Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології, 1(07), 79-84. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-11>.

4. Головіна, Н.В. (2024). Розроблення системи підтримки прийняття рішень для моніторингу та попередження лісових пожеж в Україні. Вісник Херсонського національного технічного університету, 2(89), 150-156. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.21>.

5. Пожарко, А.Р. (2024) Інформаційна система пожежної безпеки зон відпочинку на базі технології IoT. <http://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/15812>.

6. Сіденко, Д.І. (2025) Інтелектуальна комп'ютерна система підтримки прийняття рішень при пожежній небезпеці. <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/b65e5eca-09b5-4e68-b61b-8f225ff59722>.

7. Tevyashev, A., Shostko, I., Neofitnyi, M., & Koliadin, A. (2019) Laser Opto-Electronic Airspace Monitoring System in the Visible and Infrared Ranges. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). (p. 170-173). <https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943887>.

8. Tevyashev, A., Zemlyaniy, O., Shostko, I., Kostaryev, D., & Paramonov, A. (2024) Devising an analytical method for estimating aircraft positioning accuracy by an infocommunication network of optoelectronic stations. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(9(131), 36-48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.312762>.

9. Tevyashev, A., Haluza, O., Kostaryev, D., Paramonov, A., & Sizova, N. (2025) Devising a numerical method for estimating the positioning accuracy of aircraft by an information-communication network of optoelectronic stations. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(9(135), 101-120. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.330922>.

10. Shostko, I., Tevyashev, A., Kulia, Y., & Koliadin, A. (2020). Optical-Electronic System of Automatic Detection and High-Precise Tracking of Aerial Objects in Real-Time. The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems, CMIS. (p. 784-803). <https://doi.org/10.32782/cmisis/2608-59>.

11. Shostko, I., Tevyashev, A., Zemlyaniy, O., & Tsibulnikov, D. (2023) Designing and testing a prototype of optical-electronic station for detecting and tracking moving objects in the air. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5(126), 36-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.295101>.

12. Гнатушенко, В.В., Удовик, І.М., Хайпке, К., & Гнатушенко, М.В. (2026) Застосування методів машинного навчання для аналізу впливу лісових пожеж на знімки Sentinel-2 по Україні. Системні технології, 1(162), 27-35. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-162-2026-03>.

13. Carta, F., Zidda, C., Putzu, M., Loru, D., Anedda, M., & Giusto, D. (2023) Advancements in Forest Fire Prevention: A Comprehensive Survey. Sensors, 23(14), 6635. <https://doi.org/10.3390/s23146635>.

14. Granda, B., León, J., Vitoriano, B., & Hearne, J. (2023). Decision Support Models and Methodologies for Fire Suppression. Fire, 6(2), 37. <https://doi.org/10.3390/fire6020037>.

15. Huot, F., Hu, R.L., Goyal, N., Sankar, T., Ihme, M., & Chen, Y.-F. (2023). Next Day Wildfire Spread: A Machine Learning Dataset to Predict Wildfire Spreading from Remote-Sensing Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 60. (p. 1-13). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3192974>.

16. Lelis, C.A.S., Roncal, J.J., Silveira, L., et al. (2026) Drone-Based AI System for Wildfire Monitoring and Risk Prediction. IEEE Access. Vol. 12. (p. 139865-139882). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3462436>.

17. Maranghides, A., Link, E., Nazare, S., Hawks, S., McDougald, J., Quarles, S., & Gorham, D. (2025). WUI Structure/Parcel/Community Fire Hazard Mitigation Methodology. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2205>.