

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

НЕСПОР Олег Валерійович

УДК 621.03.9

ДИСЕРТАЦІЯ
**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ
ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗА РАХУНОК
ЕКСПЕРТИЗИ ДЖЕРЕЛ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ**

261 – пожежна безпека

26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ О.В. Нешпор

Науковий керівник:

Шевченко Роман Іванович, доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2025

АНОТАЦІЯ

Нешпор О.В. Підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок експертизи джерел виникнення пожеж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – Пожежна безпека. – Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання у сфері пожежної безпеки – розробці інформаційної, математичної моделей та формування на їх основі методики, застосування якої дозволить підвищити ефективність протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок експертизи джерел виникнення пожеж.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Проаналізувати шляхи підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури.
2. Розробити інформаційну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі.
3. Розробити математичну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі.
4. Розробити методику виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури.
5. Перевірити достовірність розробленої моделі та методики на її основі.
6. Розробити варіанти впровадження розроблених моделей та методики

на об'єктах критичної інфраструктури.

Об'єкт дослідження – процес підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури.

Предмет дослідження – наслідки термічного впливу пожежі, які можливо дослідити за рахунок експертизи джерел виникнення пожеж.

Для розв'язання поставлених наукових задач в дисертаційному дослідженні використовувалися методи функціонального та факторного аналізу, теорії ймовірності та математичної статистики, теорії алгоритмів, математичного моделювання, теорії управління і проведення наукових досліджень, теорії електропровідності.

У процесі виконання роботи вперше отримані наступні наукові результати.

1. Вперше розроблена інформаційна модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі, складається з двох контурів управління загального контуру який відповідає позитивному рішенням щодо ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури та оперативного контуру, який задіється у разі негативної оцінки ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури, рішення щодо контуру управління приймається спираючись на сучасні технічні досягнення в області експертизи пожеж та їх наслідків;

2. Вперше розроблена математична модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі складається з шести аналітичних залежностей. Перша та друга залежності визначають вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви. Третя описує вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви у разі наявності огорожувальної поверхні. Четверта та п'ята залежність дозволяють врахувати

вплив на процеси формування кіптяви градієнтів температури та швидкості повітря у висхідному потоці над осередком пожежі. Шоста залежність враховує вплив величини коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння на формування шару кіптяви;

3. Вперше розроблена методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, реалізую розроблену математичну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі, спирається на алгоритм її застосування реалізація якого передбачає послідовне застосування наступних процедур: процедури проведення вимірювань, процедури статистичної обробки результатів вимірів, процедури реконструкції пожежі.

У вступі обґрунтована актуальність напрямку досліджень за обраною темою; зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульована мета і завдання наукового дослідження; розкрита наукова новизна отриманих результатів і практична цінність роботи; наведені дані про особистий внесок здобувача і апробацію результатів дисертації.

У першому розділі визначено, що об'єкти критичної інфраструктури характеризуються високою вразливістю до пожеж, які можуть мати значні наслідки для населення. Техногенні ризики включають зношеність інженерних систем, застаріле обладнання та недостатню ефективність засобів протипожежного захисту. Природні ризики, такі як екстремальні погодні умови, лісові пожежі та повені, створюють загрозу особливо для об'єктів енергетики та транспорту. Антропогенні ризики включають людські помилки, недоліки в організації пожежної безпеки, низький рівень підготовки персоналу та порушення експлуатаційних правил.

Дослідження вчених доводять, що впровадження сучасних інструментів сприяють значному підвищенню ефективності протипожежного захисту

об'єктів критичної інфраструктури. Ефективна експертиза джерел виникнення пожеж на об'єктах критичної інфраструктури вимагає поєднання кількох підходів. Вибір оптимального методу залежить від специфіки об'єкта, масштабу пожежі та цілей дослідження. Такий підхід дозволяє не лише виявити причини займання, а й запобігти аналогічним ситуаціям у майбутньому, підвищуючи загальний рівень безпеки..

У другому розділі вирішено друге завдання наукового дослідження щодо розробки інформаційної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі. Спочатку розглянуто механізми утворення і властивості кіптяви. Після чого розроблено інформаційну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі. Остання складається з двох контурів управління - загального контуру який відповідає позитивному рішення щодо ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури та оперативного контуру, який задіється у разі негативної оцінки ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури, рішення щодо контуру управління приймається спираючись на сучасні технічні досягнення в області експертизи пожеж та їх наслідків.

У третьому розділі вирішено третє завдання наукового дослідження щодо розробки математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі. Спочатку розглянуто рішення окремої задачі щодо визначення впливу термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви. Після чого розглянуто рішення окремої задачі щодо визначення характеристик випромінюючої поверхні полум'я над осередком пожежі у разі наявності огорожувальної поверхні. Наступними кроками з формування

шуканої математичної моделі є розгляд рішення окремої задачі щодо визначення характеристик висхідного потоку над осередком пожежі та рішення окремої задачі щодо визначення коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння. На завершення розділу наведемо опис математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі, яка складається з шести аналітичних залежностей. Перша та друга залежності визначають вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви. Третя описує вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви у разі наявності огорожувальної поверхні. Четверта та п'ята залежність дозволяють врахувати вплив на процеси формування кіптяви градієнтів температури та швидкості повітря у висхідному потоці над осередком пожежі. Шоста залежність враховує вплив величини коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння на формування шару кіптяви..

У четвертому розділі вирішено четверте завдання наукового дослідження з розробки методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури. Насамперед розроблено алгоритм застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури. Останній складається із шести блоків виконання яких забезпечує проведення ефективної процедури дослідження пожежі на об'єкті критичної інфраструктури з використанням сучасних апаратних засобів. Потім розглянуто процедури застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури. Остання реалізую розроблену математичну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі,

спирається на алгоритм її застосування реалізація якого передбачає послідовне застосування наступних процедур: процедури проведення вимірювань, процедури статистичної обробки результатів вимірів, процедури реконструкції пожежі.

У п'ятому розділі вирішено п'яте завдання наукового дослідження з перевірки достовірності розробленої моделі та методики. Спочатку проведено заходи з планування експерименту щодо перевірки достовірності. Далі надано опис лабораторної установки для проведення вимірювань електричного опору кіптяви. Розглянуто алгоритм проведення вимірювань за використання лабораторної установки, алгоритм статистичної обробки результатів вимірів отриманих з використанням лабораторної установки та алгоритм використання отриманої інформації під час реконструкції пожежі. Після чого проаналізовано результати експериментів отримані за допомоги розробленої математичної моделі та відповідної методики та зробимо висновок про їх достовірність. А саме: результати натурного дослідження процесу ліквідації надзвичайної ситуації на енергоблоці № 3 котельно-турбінного цеху ВП «Бурштинська ТЕС» АТ «ДТЕК Західенерго» входять в довірчий інтервал, отриманий під час комп'ютерного моделювання за допомоги розробленого математичного апарату, розрахований з надійністю 0,95, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі та методики, яка була створена на її основі.

У шостому розділі запропоновано варіанти впровадження розроблених моделей в підрозділи ДСНС та об'єкти критичної інфраструктури.

Практичне значення отриманих результатів полягає у подальшому розвитку сучасних підходів до розв'язання задач ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі.

Отриманні інструментальні засоби з розв'язання задач попередження

надзвичайних ситуацій та пожеж техногенного та терористичного характеру на об'єктах критичної інфраструктури, як в умовах воєнного стану, так і повоєнний час є підґрунтям для подальшого переходу та впровадженню в діяльність підрозділів із запобігання надзвичайних ситуацій та пожеж ДСНС сучасних апаратних засобів дослідження пожеж та інформаційних технологій єдиного європейського інформаційного простору.

Результати роботи можуть використовуватися як в системі інформаційної підтримки процесу дослідження причин виникнення надзвичайних ситуацій в наслідок пожежі, так і для забезпечення навчального процесу в ЗВО з викладання блоку дисциплін «Дослідження пожеж».

Ключові слова пожежна безпека, дослідження кіптяви, ідентифікація небезпеки, об'єкти критичної інфраструктури, моделювання.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. **Neshpor Oleh** Optimization of the technology for designing sensitive gas sensors based on zinc oxide using a sol-gel method / Neshpor Oleh; Deyneko Natalya; Ponomarenko Roman; Maiboroda Artem; Kropyva Mykhaylo; Blyashenko Oleg; Yeremenko Serhii; Sydorenko Volodymyr; Servatyuk Vasyl; Pruskyi Andrii // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* Т. 4, В. 5-118, С. 30 – 36 . 2022 (Scopus).

(Здобувачу особисто належать аналіз літературних та інформаційних джерел та формування логічних зав'язків інформаційної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту)

2. **Нешпор О.В.** Алгоритм застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Щербак О.С., Нешпор О.В., Дерев'янка О.А., Єременко С.А.,

Шевченко Р.І. // Комунальне господарство міст, 2023, том 4, випуск 178. С.179-187 ISSN 2522-1809(Print); ISSN2522-1817 (Online)

(Здобувачу особисто належать розробка алгоритму застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури та отримання практичних рекомендацій)

3. **Нешпор О.В.** Методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Щербак О.С., Дерев'янка О.А., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // Комунальне господарство міст, 2023, том 1, випуск 175. С.105- 111 ISSN 2522-1809(Print); ISSN2522-1817 (Online)

(Здобувачу особисто належать розробка Методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури)

4. **Нешпор О.В.** Розробка засобу автоматизації проектування шлейфів пожежної сигналізації з оптимізованим складом / Антошкін О.А., Нешпор О.В. // Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗУ, 2023. Вип. 37 (1). С. 203-218.

(Здобувачу особисто належать розробка рівнянь математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури)

5. **Нешпор О.В.** Формування алгоритму інформаційно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій на територіях, що зазнали ракетно-артилерійських уражень / Рашкевич Н.В., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // Комунальне господарство міст, 2024, том 1, випуск 175. С.105 - 111 ISSN 2522-1809(Print); ISSN2522-1817 (Online)

(Здобувачу особисто належать практичні рекомендації з впровадження інформаційно-технічних підходів з підвищення безпеки об'єктів критичної інфраструктури та територій під час воєнного стану)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. **Нешпор О.В.** Аналіз небезпек та постановка завдання з дослідження ефективності інноваційних засобів гасіння пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Гадир В.О., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // Матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2024» («Fire Safety Issues 2024»). – Х.: НУЦЗ України, 2024. С. 25-26.

(Здобувачу особисто належать аналіз інноваційних засобів з дослідження ефективності протипожежного захисту та гасіння пожеж на об'єктах критичної інфраструктури)

7. **Нешпор О.В.** До питання організації процедури виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Щербак О.С., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням. Матеріали круглого столу. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2023. С. 82-83.

(Здобувачу особисто належать розробка блоку процедур методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури)

8. **Нешпор О.В.** Інформаційні технології у питаннях попередження надзвичайних ситуацій внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури /Вовчук Т.С., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2023. С. 229.

(Здобувачу особисто належать аналіз можливостей сучасних інформаційних технологій у питаннях попередження надзвичайних ситуацій внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури)

9. **Нешпор О.В.** До питання підвищення ефективності протипожежного захисту розподільних пристроїв електричних мереж/ Нешпор О.В., Єременко

С.А., Христич В.В // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022»). – Х.: НУЦЗ України, 2022. – 40-41 с.

(Здобувачу особисто належать розробка практичних рекомендацій з підвищення протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури на прикладі розподільних пристроїв електричних мереж)

10. **Нешпор О.В.** До питання актуалізації досліджень з попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з вибухом вибухонебезпечних предметів в місцях масового перебування людей / П. Корчагін, О. Нешпор, І. Ячна, Р.Шевченко // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. – С. 43

(Здобувачу особисто належать розробка практичних рекомендацій з підвищення протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури з масовим перебуванням людей)

ANNOTATION

Neshpor O.V. Increasing the effectiveness of fire protection of critical infrastructure facilities through examination of fire sources. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for doctor of philosophy degree in specialty 261 - Fire safety. - National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, 2025.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem in the field of fire safety - the development of information, mathematical models and the formation of a methodology based on them, the application of which will allow to increase the effectiveness of fire protection of critical infrastructure facilities through the examination of fire sources.

To achieve the set goal, it is necessary to solve the following scientific tasks.

To achieve the set goal in the dissertation, it is necessary to solve the following tasks:

1. Analyze ways to increase the effectiveness of fire protection of critical infrastructure facilities.
2. Develop an information model for increasing the effectiveness of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of the surfaces of premises that have been affected by negative fire factors.
3. Develop a mathematical model for increasing the effectiveness of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of soot on the surfaces of premises in the fire center.
4. Develop a methodology for detecting focal signs of an emergency situation due to a fire at critical infrastructure facilities.
5. Verify the reliability of the developed model and methodology based on it.
6. Develop options for implementing the developed models and methodologies at critical infrastructure facilities.

The object of the study is the process of increasing the effectiveness of fire protection at critical infrastructure facilities.

The subject of the study is the consequences of the thermal impact of a fire, which can be investigated through an examination of the sources of fire origin.

To solve the scientific problems set in the dissertation research, the methods of functional and factor analysis, probability theory and mathematical statistics, algorithm theory, mathematical modeling, management theory and scientific research, and electrical conductivity theory were used.

In the process of carrying out the work, the following scientific results were obtained for the first time.

1. The information model for increasing the efficiency of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of the surfaces of premises that have been exposed to negative fire factors has been developed for the first time, consisting of two control loops: a general loop that corresponds to a positive decision on the efficiency of the fire protection system of a critical

infrastructure facility and an operational loop that is activated in the event of a negative assessment of the efficiency of the fire protection system of a critical infrastructure facility; the decision on the control loop is made based on modern technical achievements in the field of fire examination and their consequences;

2. The mathematical model for increasing the efficiency of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of soot on the surfaces of premises in the fire center consists of six analytical dependencies. The first and second dependencies determine the influence of thermodynamic processes of the radiating flame surface on the formation of a soot layer. The third describes the influence of thermodynamic processes of the radiating surface of the flame on the formation of a soot layer in the presence of a protective surface. The fourth and fifth dependencies allow us to take into account the influence of temperature and air velocity gradients in the ascending flow above the fire center on the processes of soot formation. The sixth dependence takes into account the influence of the coefficient of convection heat exchange of the protective surface with ascending flows above the combustion center on the formation of a soot layer;

3. For the first time, a method has been developed for detecting focal signs of an emergency situation due to a fire at critical infrastructure facilities, a developed mathematical model for increasing the effectiveness of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of soot on the surfaces of premises in the fire center is implemented, and its implementation is based on an algorithm for its application, the implementation of which involves the sequential application of the following procedures: measurement procedures, procedures for statistical processing of measurement results, and fire reconstruction procedures.

The introduction substantiates the relevance of the research direction on the selected topic; indicates the connection of the work with scientific programs, plans, topics; formulates the goal and objectives of the scientific research; reveals the scientific novelty of the results obtained and the practical value of the work; provides data on the personal contribution of the applicant and the approval of the results of the dissertation.

The first section determines that critical infrastructure facilities are characterized by high vulnerability to fires, which can have significant consequences for the population. Technogenic risks include wear and tear of engineering systems, outdated equipment and insufficient effectiveness of fire protection measures. Natural risks, such as extreme weather conditions, forest fires and floods, pose a threat especially to energy and transport facilities. Anthropogenic risks include human errors, shortcomings in the organization of fire safety, low level of personnel training and violation of operational rules.

Scientists' research proves that the introduction of modern tools contributes to a significant increase in the efficiency of fire protection of critical infrastructure facilities. Effective examination of the sources of fire at critical infrastructure facilities requires a combination of several approaches. The choice of the optimal method depends on the specifics of the facility, the scale of the fire and the objectives of the study. This approach allows not only to identify the causes of the fire, but also to prevent similar situations in the future, increasing the overall level of safety..

The second section solves the second task of the scientific research on the development of an information model for increasing the efficiency of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of the surface of premises that have been exposed to negative fire factors. First, the mechanisms of formation and properties of soot are considered. Then, an information model for increasing the efficiency of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of the surface of premises that have been exposed to negative fire factors is developed. The latter consists of two control circuits - a general circuit that corresponds to a positive decision on the effectiveness of the fire protection system of a critical infrastructure facility and an operational circuit that is activated in the event of a negative assessment of the effectiveness of the fire protection system of a critical infrastructure facility. The decision on the control circuit is made based on modern technical achievements in the field of fire examination and their consequences.

In the third section, the third task of the scientific research is solved on the development of a mathematical model for increasing the effectiveness of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of soot on the surfaces of premises in the fire center. First, the solution of a separate problem is considered to determine the influence of thermodynamic processes of the radiating surface of the flame on the formation of a soot layer. Then, the solution of a separate problem is considered to determine the characteristics of the radiating surface of the flame above the fire center in the presence of an enclosing surface. The next steps in forming the desired mathematical model are to consider the solution of a separate problem for determining the characteristics of the upward flow above the fire center and the solution of a separate problem for determining the coefficient of convection heat exchange of the enclosing surface with upward flows above the combustion center. At the end of the section, we will describe the mathematical model for increasing the effectiveness of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of soot on the surfaces of premises in the fire center, which consists of six analytical dependencies. The first and second dependencies determine the influence of thermodynamic processes of the radiating flame surface on the formation of a soot layer. The third describes the influence of thermodynamic processes of the radiating flame surface on the formation of a soot layer in the presence of a protective surface. The fourth and fifth dependencies allow us to take into account the influence of temperature and air velocity gradients in the upward flow above the fire center on the processes of soot formation. The sixth dependency takes into account the influence of the value of the coefficient of convection heat exchange of the protective surface with upward flows above the combustion center on the formation of a soot layer..

The fourth section solves the fourth task of the scientific research on the development of a methodology for detecting focal signs of an emergency situation due to a fire at critical infrastructure facilities. First of all, an algorithm for applying the methodology for detecting focal signs of an emergency situation due to a fire at critical infrastructure facilities is developed. The latter consists of six blocks of

execution which provide for the effective procedure of fire investigation at a critical infrastructure facility using modern hardware. Then, the procedures for applying the method of detecting focal signs of an emergency situation due to a fire at critical infrastructure facilities are considered. The latter implements the developed mathematical model of increasing the efficiency of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of soot on the surfaces of premises in the fire center, based on the algorithm of its application, the implementation of which involves the sequential application of the following procedures: measurement procedures, procedures for statistical processing of measurement results, procedures for fire reconstruction.

In the fifth section, the fifth task of the scientific research on checking the reliability of the developed model and methodology is solved. First, measures were taken to plan an experiment to check the reliability. Then, a description of the laboratory setup for measuring the electrical resistance of soot is provided. The algorithm for conducting measurements using the laboratory setup, the algorithm for statistical processing of measurement results obtained using the laboratory setup, and the algorithm for using the information obtained during fire reconstruction are considered. After that, the results of the experiments obtained using the developed mathematical model and the corresponding methodology are analyzed and a conclusion is drawn about their reliability. Namely: the results of a field study of the process of liquidating an emergency situation at power unit No. 3 of the boiler-turbine shop of the Burshtynskaya TPP of JSC DTEK Zakhidenergo are included in the confidence interval obtained during computer modeling using the developed mathematical apparatus, calculated with a reliability of 0.95, which confirms the reliability of the developed mathematical model of increasing the efficiency of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of soot on the surfaces of premises in the fire center and the methodology that was created on its basis.

The sixth section proposes options for implementing the developed models in the SES units and critical infrastructure facilities.

The practical significance of the results obtained lies in the further development of modern approaches to solving the problems of the efficiency of fire protection of critical infrastructure facilities through technical examination of soot on the surfaces of premises in the fire center.

The obtained tools for solving the problems of preventing emergencies and fires of a technogenic and terrorist nature at critical infrastructure facilities, both in martial law and post-war times, are the basis for the further transition and implementation of modern hardware for fire research and information technologies of the single European information space in the activities of the emergency and fire prevention units of the State Emergency Service.

The results of the work can be used both in the information support system for the process of researching the causes of emergencies as a result of a fire, and to ensure the educational process in higher education institutions for teaching the block of disciplines "Fire Research".

Key words: fire safety, soot research, hazard identification, critical infrastructure facilities, modeling.

ЗМІСТ

Анотація	2
Зміст	18
Перелік умовних скорочень	22
Вступ	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	30
1.1. Ризики виникнення пожеж на об'єктах критичної інфраструктури та основні фактори їх поширення	30
1.2. Оцінка ризиків об'єктів критичної інфраструктури.....	33
1.3. Основні виклики забезпечення протипожежного захисту в умовах воєнного стану	34
1.4 Напрями вдосконалення протипожежного захисту в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення.....	36
1.5 Інструментальні методи визначення джерела виникнення пожежі.....	39
Висновки за першим розділом	43
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗА РАХУНОК ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЕРТИЗИ ПОВЕРХНІ ПРИМІЩЕНЬ ЯКІ ЗАЗНАЛИ ВПЛИВУ НЕГАТИВНИХ ФАКТОРІВ ПОЖЕЖІ	45
2.1. Механізм утворення і властивості кіптяви при пожежі ..	45
2.1.1 Аналіз процесу горіння.....	45
2.1.2 Осередкові ознаки горіння.....	47
2.1.3 Осадження кіптяви на конструкціях та утворення закопчень в умовах пожежі.....	48

2.1.4 Механізм утворення компонентів кіптяви.....	49
2.2. Інформаційна модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі	51
Висновки за другим розділом	59
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗА РАХУНОК ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЕРТИЗИ КІПТЯВИ ПОВЕРХОНЬ ПРИМІЩЕНЬ В ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ	60
3.1. Рішення окремої задачі щодо визначення впливу термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви	61
3.2. Рішення окремої задачі щодо визначення характеристик випромінюючої поверхні полум'я над осередком пожежі у разі наявності огорожувальної поверхні	67
3.3. Рішення окремої задачі щодо визначення характеристик висхідного потоку над осередком пожежі.....	74
3.4. Рішення окремої задачі щодо визначення коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння.....	80
3.5 Опис математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі	82
Висновки за третім розділом	84
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА ВИЯВЛЕННЯ ОСЕРЕДКОВИХ ОЗНАК НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	86

4.1. Розробка алгоритму методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури	86
4.2. Розробка процедур застосування алгоритму методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктур.....	91
4.2.1. Опис за використання апаратного блоку.....	91
4.2.2. Опис процедури статистичної обробки результатів вимірів отриманих з використанням апаратного блоку.....	93
4.2.3. Опис процедури з використання отриманої інформації під час реконструкції пожежі за рахунок використання апаратного блоку.....	97
Висновки за четвертим розділом	99
РОЗДІЛ 5. ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ	101
5.1. Планування проведення експерименту щодо перевірки достовірності	101
5.2. Опис лабораторної установки для проведення вимірювань електричного опору кіптяви	106
5.3. Результати експериментів з перевірки достовірності розробленої математичної моделі та методики на її основі.....	118
5.3.1 Хроніка розвитку надзвичайної ситуації в наслідок пожежі.....	118
5.3.2 Проведення натурних досліджень на об'єкті критичної інфраструктури.....	119
.....Висновки за п'ятим розділом	128
РОЗДІЛ 6. ВАРІАНТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДИКИ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	129
Висновки	131

Список використаних джерел	134
Додаток А	150
Додаток Б	155

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРР – аварійно-рятувальні роботи;

АРФ – аварійно-рятувальні формування;

АРП – аварійно-рятувальні підрозділи;

ГДК – гранично допустимі концентрації;

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій;

МВС - Міністерство внутрішніх справ України;

МО - Міністерство оборони України;

НС – надзвичайна ситуація;

НХР – небезпечна хімічна речовина;

ОРС – оперативно-рятувальні сили;

ОПН – об’єкт підвищеної небезпеки;

СіЗ – сили і засоби;

ТО – технічне обслуговування;

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Аналіз стану техногенної та природної безпеки в Україні за останні роки свідчить про зростання кількості пожеж як в Україні в цілому, так і на об'єктах критичної інфраструктури. Це зростання має як техногенне та соціальне підґрунтя – старіння обладнання, помилки та навмисні дії персоналу об'єктів, так і підґрунтя пов'язане з воєнними та терористичними загрозами – обстріли та цілеспрямована підривна діяльність ворожої агентури тощо.

Відомо, що у результаті горіння, яке відбувається під час пожежі, матеріали, конструкції, устаткування й окремі предмети, що опинились в зоні дії високої температури, зазнають різного рівня руйнацій: деформуються або знищуються цілком - згорають.

Як правило, руйнування відбувається нерівномірно і цією обставиною часто користуються при установленні осередку пожежі. З місцем найбільшого вигорання, руйнування нерідко зв'язують розташування осередку. У такому випадку виходять із припущення про те, що найбільше руйнування обумовлене більш тривалим горінням, більш тривалою дією високої температури тобто фактором часу і, як наслідок, приходять до висновку, що пожежа могла виникнути саме на цій ділянці. Найчастіше так і буває.

Очевидно, що велика тривалість горіння призводить до великих руйнацій, що у свою чергу, може викликати і розвиток більш високої температури у осередку пожежі, що також неминуче позначиться на інтенсивності і ступені руйнувань. Однак така обставина, як тривалість горіння, не є єдиною, а в ряді випадків вона взагалі не може бути причиною найбільшого ушкодження конструкцій і матеріалів на певній ділянці пожежі, у тому числі й у осередку.

Руйнація, яка відбувається під час пожежі, залежать не тільки від тривалості горіння, але і від цілого ряду інших факторів і умов, з якими зв'язаний розвиток пожежі, і, насамперед, від температурного режиму в зоні

горіння. Градієнт температури пов'язаний, звичайно, не тільки з фактором часу. Температура на окремих ділянках пожежі залежить також і від кількості і характеру горючих матеріалів, розташованих на цій ділянці, умов їхнього горіння, зокрема від умов газового обміну (доступу повітря), визначається розвитком конвекції, особливостями гасіння пожежі. Усе це буде визначати умови і причини кількарязового вигорання, утворення місцевих осередків горіння або окремих, краще збережених ділянок у зоні пожежі. Також слід врахувати і той факт, що навіть у осередку пожежі найменші ушкодження можуть відбуватися також завдяки архітектурно-будівельним особливостям спорудження.

Тому головним завданням дисертаційного дослідження є розробка інформаційної, математичної моделей та формування на їх основі методики, застосування якої дозволить підвищити ефективність протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок експертизи джерел виникнення пожеж.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано відповідно до Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 квітня 2011 року № 368-р «Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової соціальної програми захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру на 2012-2016 роки», «Стратегії реформування системи Державної служби з надзвичайних ситуацій», схваленої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 25 січня 2017 р. № 61-р та Плану заходів з реалізації Стратегії розвитку органів системи Міністерства внутрішніх справ на період до 2020 року, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 серпня 2019 року № 693, а також в рамках виконання науково-дослідної роботи «Особливості використання пожежної та рятувальної техніки та забезпечення безпеки особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС за умов воєнного стану» (№ ДР 0223U001642).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розробка інформаційної, математичної моделей та формування на їх основі

методики, застосування якої дозволить підвищити ефективність протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок експертизи джерел виникнення пожеж.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

7. Проаналізувати шляхи підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури.

8. Розробити інформаційну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі.

9. Розробити математичну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі.

10. Розробити методику виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури.

11. Перевірити достовірність розробленої моделі та методики на її основі.

12. Розробити варіанти впровадження розроблених моделей та методики на об'єктах критичної інфраструктури.

Об'єкт дослідження – процес підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури.

Предмет дослідження – наслідки термічного впливу пожежі, які можливо дослідити за рахунок експертизи джерел виникнення пожеж.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених наукових задач в дисертаційному дослідженні використовувалися методи функціонального та факторного аналізу, теорії ймовірності та математичної статистики, теорії алгоритмів, математичного моделювання, теорії управління і проведення наукових досліджень, теорії електропровідності.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача у сфері пожежної безпеки, а саме

задача підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок експертизи джерел виникнення пожеж.

При виконанні дисертації отримано наступні нові наукові результати:

- *вперше* розроблена інформаційна модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі, складається з двох контурів управління загального контуру який відповідає позитивному рішенням щодо ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури та оперативного контуру, який задіється у разі негативної оцінки ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури, рішення щодо контуру управління приймається спираючись на сучасні технічні досягнення в області експертизи пожеж та їх наслідків;

- *вперше* розроблена математична модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі складається з шести аналітичних залежностей. Перша та друга залежності визначають вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви. Третя описує вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви у разі наявності огорожувальної поверхні. Четверта та п'ята залежність дозволяють врахувати вплив на процеси формування кіптяви градієнтів температури та швидкості повітря у висхідному потоці над осередком пожежі. Шоста залежність враховує вплив величини коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння на формування шару кіптяви;

- *вперше* розроблена методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, реалізую розроблену математичну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок

технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі, спирається на алгоритм її застосування реалізація якого передбачає послідовне застосування наступних процедур: процедури проведення вимірювань, процедури статистичної обробки результатів вимірів, процедури реконструкції пожежі;

Практичне значення отриманих результатів. Наукові результати дисертаційної роботи є подальшим розвитком сучасних підходів до розв’язання задач ефективності протипожежного захисту об’єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі.

Отриманні інструментальні засоби з розв’язання задач попередження надзвичайних ситуацій та пожеж техногенного та терористичного характеру на об’єктах критичної інфраструктури, як в умовах воєнного стану, так і повоєнний час є підґрунтям для подальшого переходу та впровадженню в діяльність підрозділів із запобігання надзвичайних ситуацій та пожеж ДСНС сучасних апаратних засобів дослідження пожеж та інформаційних технологій єдиного європейського інформаційного простору.

Результати роботи можуть використовуватися як в системі інформаційної підтримки процесу дослідження причин виникнення надзвичайних ситуацій в наслідок пожежі, так і для забезпечення навчального процесу в ЗВО з викладання блоку дисциплін «Дослідження пожеж».

Основні результати дослідження були впроваджені в практичну діяльність 6 Державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Харківській області (акт впровадження від 18.01.2025р.) та 1 Державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Харківській області (акт впровадження від 24.01.2025р.).

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто і наведені в роботах, які представлені у додатку А.

При проведенні дисертаційних досліджень здобувачем в роботі [A1] особисто виконано аналіз літературних та інформаційних джерел та сформовані функціональні та логічні зав'язки інформаційної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту. В роботі [A2] здобувачу особисто належать розробка алгоритму застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури та отримання практичних рекомендацій. В роботі [A3] здобувачу особисто належить розробка методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури. В роботі [A4] здобувачу особисто належать розробка рівнянь математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури. В роботі [A5] здобувачу особисто належать практичні рекомендації з впровадження інформаційно-технічних підходів з підвищення безпеки об'єктів критичної інфраструктури та територій під час воєнного стану.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: 3-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми пожежної безпеки 2024» («Fire Safety Issues 2024») (Харків, 2024); круглого столу «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням» (Харків, 2023); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (Харків, 2023); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022») (Харків, 2022); XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (Черкаси, 2024).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць: 1 стаття у науковому виданні, яке входить до наукометричної бази Scopus, 4 статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз, та 5 тез доповідей на Міжнародних та

Всеукраїнських наукових конференціях.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота загальним обсягом 157 сторінок складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 144 найменувань і 2-х додатків, містить 24 рисунки та 7 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

1.1 Ризики виникнення пожеж на об'єктах критичної інфраструктури та основні фактори їх поширення

Ризики визначаються як імовірність виникнення небезпечних ситуацій [1], які можуть призвести до матеріальних, екологічних або соціальних збитків, зокрема, до втрат життя, пошкодження інфраструктури, погіршення стану навколишнього середовища чи порушення стабільного функціонування об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) [2, 3].

Наявність в Україні великої кількості гірничодобувних, хімічних та енергетичних об'єктів підвищує ймовірність техногенних надзвичайних ситуацій [4].

Ключовими загрозами для критичної інфраструктури є стихійні лиха та техногенні аварії, терористичні акти, диверсії та кіберзагрози [5]. Складність та частота цих загроз постійно зростає, що підкреслює необхідність комплексного підходу для їхнього запобігання та мінімізації. Небезпека також часто спричинена людськими помилками [6], такими як недбале поводження з обладнанням, порушення вимог пожежної безпеки, неправильне зберігання горючих матеріалів або несвоєчасне обслуговування устаткування.

На об'єктах критичної інфраструктури пожежі є однією з найбільш поширених небезпек [7], оскільки загоряння може швидко поширитися по горючим матеріалам [8, 9], через недосконалі системи вентиляції [10] та незадовільну організацію протипожежного захисту [11].

Архітектурне планування, включаючи розташування приміщень, коридорів та евакуаційних виходів, впливає на швидкість поширення пожежі та можливості проведення евакуації [12].

Персонал ОКІ часто недостатньо підготовлений до дій у разі виникнення пожежі [13]. Недостатня інформованість, відсутність навчальних тренувань та обмеженість ресурсів для постійного удосконалення знань створюють значний бар'єр для ефективного протидії пожежам [14].

У багатьох країнах, включно з Україною, протипожежні заходи на ОКІ часто не відповідають сучасним викликам. Застаріле обладнання та недостатня увага до моніторингу джерел загрози створюють ризики [15, 16].

Несправності в інженерних системах, зокрема електричних мережах, можуть стати причиною пожеж. Відповідно до [17], необхідно забезпечувати належний технічний стан інженерних систем для мінімізації ризиків виникнення пожеж.

У дослідженні [18] проаналізовано частоту коротких замикань і запропоновано використання автоматичних систем моніторингу електромереж для зниження ризиків. Наголошено на регулярному технічному обслуговуванні електричних систем для зменшення ризиків перегріву обладнання [19].

Природні джерела небезпеки – це потенційні загрози, пов'язані з природними явищами, які можуть призводити до значних руйнувань ОКІ, спричиняти збої в їхній роботі та створювати небезпеку для життя людей [20].

Лісові пожежі можуть загрожувати енергетичним об'єктам, транспортним вузлам, комунікаційним системам та іншим елементам критичної інфраструктури [21]. Поширення вогню підсилюється посухами, високими температурами та сильними вітрами.

Підвищення температури та тривалі періоди посухи сприяють збільшенню ризиків займання, особливо на об'єктах із наявністю легкозаймистих речовин [22].

У статті [23] аналізується взаємозв'язок між кліматичними змінами, посухами та підвищенням пожежної небезпеки в енергетичній інфраструктурі.

Високі температури підвищують ризик перегріву обладнання та його займання, тоді як екстремально низькі температури можуть спричиняти руйнування систем опалення, водопостачання та охолодження.

Вітер значно прискорює поширення полум'я та ускладнює роботу пожежних підрозділів, особливо на великих відкритих об'єктах [24, 25]. Високі температури здатні пошкоджувати лінії електропередач, дахові конструкції, комунікаційні системи та викликати короткі замикання, що стає причиною загорянь.

У роботі [26] розглянуто загрози, пов'язані з розташуванням ОКІ поблизу зон зберігання нафтопродуктів чи хімічних речовин.

Зсуви, лавини або виверження вулканів становлять загрозу для об'єктів, розташованих у зоні підвищеного геологічного ризику [27].

Повені, викликані тривалими опадами, таненням снігу або проривами дамб можуть затоплювати транспортні маршрути, енергетичні підстанції та водоочисні споруди, спричиняючи збої в роботі та пошкодження обладнання [28, 29].

Коливання земної поверхні можуть пошкодити конструктивні елементи будівель, спричинити руйнування трубопроводів, резервуарів із небезпечними речовинами та іншої інфраструктури, що збільшує ризик пожеж [30, 31].

Таким чином, визначено, що об'єкти критичної інфраструктури характеризуються високою вразливістю до пожеж, які можуть мати значні наслідки для населення. Аналіз показав, що ризики виникнення пожеж пов'язані з комплексом техногенних, природних, антропогенних ризиків. Техногенні ризики включають зношеність інженерних систем, застаріле обладнання та недостатню ефективність засобів протипожежного захисту. Природні ризики, такі як екстремальні погодні умови, лісові пожежі та повені, створюють загрозу особливо для об'єктів енергетики та транспорту. Антропогенні ризики включають людські помилки, недоліки в організації пожежної безпеки, низький рівень підготовки персоналу та порушення експлуатаційних правил.

1.2. Оцінка ризиків об'єктів критичної інфраструктури

Закон України «Про критичну інфраструктуру» [32] визначає необхідність проведення оцінки ризиків на ОКІ та обміну інформацією про ризики та загрози з іншими суб'єктами. Це підкреслює важливість нормативно-правового забезпечення процесів виявлення небезпеки, включаючи пожежні.

В документі [33] визначено порядок оцінки ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру та пожеж, що є складовою частиною системи управління ризиками.

Дослідники аналізують та порівнюють різні методики оцінки загроз і ризиків для потенційно небезпечних ОКІ, особливо в зонах бойових дій [34]. Це сприяє вибору оптимальних підходів для конкретних умов та об'єктів.

Ризик кількісно визначався як добуток ймовірності виникнення загрози артилерійських і ракетних обстрілів, експозиції та відповідного впливу на неї у вигляді економічних втрат [35].

Науковці пропонують методики, що враховують специфіку різних типів загроз [36]. Такі методики передбачають інтеграцію кількісного та якісного аналізу ризиків для точнішої оцінки рівня небезпеки.

Пропонується методика, яка враховує сценарії розвитку надзвичайних ситуацій для запобігання втрат серед населення та особового складу сил оборони. Вона базується на аналітичних методах та оптимізаційних підходах [37].

В роботі [38] проведений аналіз сучасних методологічних підходів до оцінки критичності об'єктів інфраструктури, враховуючи невизначеність та динамічність загроз.

Підкреслюється важливість впровадження ризик-орієнтованого підходу в системах протипожежного захисту [39].

Метод деструктивно-кумулятивного потенціалу [40] базується на використанні теорії графів, імовірнісного аналізу та імітаційного моделювання для оцінки ризиків в умовах бойових дій. Він дозволяє враховувати

накопичувальний ефект пошкоджень та їхній вплив на функціонування інфраструктури.

Метод Дельфі базується на залученні групи експертів, які незалежно один від одного аналізують потенційні загрози та наслідки, і пропонують можливі шляхи їх мінімізації [41, 42].

Дослідження [43, 44] визначають напрями та механізми управління ризиками в умовах сучасних викликів і загроз, пропонуючи системний підхід до забезпечення їхньої безпеки.

Підходи до управління ризиками включають застосування моделей управління безпекою, що враховують як короткострокові, так і довгострокові наслідки реалізації загроз [45].

Особлива увага приділяється оцінці слабких місць в інфраструктурі, які можуть сприяти поширенню пожеж, техногенних аварій чи порушенням роботи через природні катаклізми [46].

Таким чином, сучасні наукові дослідження пропонують різноманітні методологічні підходи до оцінки ризиків для об'єктів критичної інфраструктури, які враховують специфіку воєнних умов та сучасних загроз. Використання цих методик сприяє підвищенню стійкості та безпеки критичної інфраструктури, забезпечуючи ефективне управління ризиками та мінімізацію потенційних втрат.

1.3 Основні виклики забезпечення протипожежного захисту в умовах воєнного стану

Збройні конфлікти значно збільшують ризики виникнення пожеж через обстріли та диверсії. Пошкодження об'єктів не лише ускладнює їхню роботу, а й створює додаткові загрози для населення [47, 48]. Гостро постало питання забезпечення безпеки на шляхах евакуації [49] та збереження функціонування стратегічно важливих установ [50]. Руйнування шляхів евакуації, обмежений

доступ до транспортних засобів та укриттів суттєво підвищують ризики для життя та здоров'я людей у разі виникнення пожежі.

Дослідження [51] демонструють, що сучасні ОКІ стають мішенями не лише для традиційних загроз (пожежі від технічних несправностей), а й для кібератак, які можуть вивести з ладу автоматизовані системи протипожежного захисту.

У роботі [52] розглянуто питання зниження рівня підготовки персоналу через мобілізацію. Мобілізація частини персоналу, руйнування матеріально-технічної бази та обмеження у постачанні спеціалізованого обладнання стають одними з ключових викликів.

Порушення ланцюгів постачання через воєнні дії створюють проблеми із забезпеченням об'єктів пожежним обладнанням, паливом та іншими ресурсами. Дослідники [53] акцентують на проблемах неможливості своєчасного реагування на пожежі через блокування шляхів доступу, небезпеку мінування або триваючі бойові дії в зоні розташування об'єктів.

Як зазначено в [54, 55], в умовах воєнного стану профілактичні заходи, такі як перевірки, навчання персоналу та модернізація обладнання, стають менш доступними. Це підвищує ризик виникнення пожеж на стратегічно важливих об'єктах.

Бойові дії супроводжуються підвищеною загрозою умисних пожеж через диверсійні дії чи обстріли ОКІ, що створює додаткове навантаження на системи пожежного захисту [56].

В умовах воєнного стану бюджетні кошти часто спрямовуються на оборонні потреби, що зменшує можливості для інвестицій у модернізацію протипожежного обладнання та проведення профілактичних заходів [57].

Військові дії часто призводять до екологічних катастроф що збільшує ризик виникнення природних пожеж, які можуть загрожувати ОКІ [58].

Традиційні системи пожежного захисту не завжди враховують специфіку ризиків, які виникають унаслідок воєнних дій, зокрема, можливість одночасного виникнення кількох пожеж через обстріли [59].

Збройні конфлікти призводять до порушення організації та координації дій усіх залучених служб та персоналу до локалізації та ліквідації небезпеки. Важливим є швидкість реагування, наявність необхідних ресурсів та засобів зв'язку, а також здатність до прийняття оперативних рішень [60].

Таким чином, воєнний стан істотно ускладнює процес забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури, оскільки бойові дії призводять до руйнування інфраструктури, блокування логістичних шляхів та дефіциту ресурсів. Це створює додаткові ризики виникнення пожеж, адже пошкодження комунікацій, складні умови доступу до об'єктів, а також відсутність оперативного забезпечення засобами пожежогасіння значно підвищують ймовірність загорянь. Крім того, нестача кваліфікованого персоналу через мобілізацію, моральне та фізичне зношення обладнання роблять боротьбу з пожежами менш ефективною.

1.4 Напрями вдосконалення протипожежного захисту в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення

У сучасних реаліях, коли ОКІ стають мішенню для диверсій, руйнувань і перебувають у постійній небезпеці через бойові дії, важливо вчасно виявляти потенційні джерела пожежі та розробляти ефективні заходи для їх запобігання. [61].

Дослідження [62] акцентують увагу на використанні алгоритмів машинного навчання для аналізу показників датчиків (теплових, димових, газових) із метою зменшення помилкових сигналів тривоги.

Практика [63] показує, що застосування таких систем на базі IoT підвищує швидкість реагування на пожежі та мінімізує ризики втрат.

Дослідники [64] описують автоматизовані системи управління ризиками на основі IoT для промислових і енергетичних підприємств.

Штучний інтелект активно впроваджується для аналізу даних з метою оцінки ризиків пожеж та їх попередження [65, 66]. Завдяки аналізу великих масивів даних, таких як кліматичні умови, стан обладнання та людський фактор, моделі штучного інтелекту дозволяють створювати точні прогнози.

Технологія «цифрового близнюка» дозволяє створювати віртуальні копії об'єктів для симуляції сценаріїв виникнення пожеж і розробки ефективних стратегій їхнього попередження [67, 68]. Дослідження демонструють, як цифрові близнюки допомагають оцінити потенційні наслідки впливу пожежі на функціональність об'єкта.

Біометричні технології забезпечують доступ лише авторизованим особам до зон із підвищеним ризиком займання [69]. Дослідження наголошують на важливості інтеграції таких систем для обмеження впливу людського фактору на можливість виникнення пожеж. Такі системи активно використовуються на атомних електростанціях і хімічних заводах для мінімізації ризику саботажу чи несанкціонованого доступу [70].

Унікальним методом оцінки прихованих ризиків є нейтронне сканування, яке дозволяє виявляти приховані осередки перегріву або займання всередині конструкцій [71]. Нейтронні сканери використовуються для діагностики конструкцій мостів та тунелів, забезпечуючи раннє виявлення пожежонебезпечних дефектів.

Дослідження [72, 73] підтверджують, що інфрачервоні датчики допомагають оцінювати стан матеріалів і попереджати аварії.

Дрони стали інструментом, що активно використовується для моніторингу пожежної ситуації у важкодоступних або небезпечних районах [74, 75]. Дослідження продемонстрували, що дрони з тепловізорами ефективно виявляють точки перегріву на енергооб'єктах та промислових зонах.

Прогнозування розвитку пожеж і оцінка їхнього впливу на об'єкти критичної інфраструктури є важливою складовою технічної експертизи. Дослідження [76] пропонують алгоритми симуляції поширення вогню з урахуванням конструкційних характеристик будівель. Підхід [77]

зосереджується на моделях прогнозування в лісових зонах для захисту електромереж.

Дослідження характеристик матеріалів, зокрема їхньої вогнестійкості, займають важливе місце у профілактиці пожеж. Автори [78, 79] провели дослідження щодо поведінки конструкційних матеріалів під впливом високих температур, виявивши слабкі місця конструкцій.

Системний підхід дозволяє враховувати багатовимірність проблематики протипожежного захисту на ОКІ. Він забезпечує інтеграцію всіх процесів – від ідентифікації ризиків до реалізації заходів безпеки, сприяючи зниженню вірогідності пожеж та мінімізації їх наслідків [80].

Досвід [81] свідчить про ефективність міждисциплінарного підходу до експертизи джерел пожеж. Включення експертів з різних сфер (інженерів, екологів, аналітиків) дозволяє врахувати всі аспекти безпеки об'єкта.

Дослідження [82, 83] зосереджені на розробці процедур регулярного аудиту пожежної безпеки. Включення спеціалізованих інспекцій з вивченням умов на об'єктах та оцінкою відповідності нормам дозволяє своєчасно ідентифікувати ризики.

Впровадження навчальних програм із симуляцією надзвичайних ситуацій дозволяє ефективніше реагувати на потенційні загрози [84].

Важливе місце займає міжнародна співпраця в управлінні пожежними ризиками. Це включає спільні навчання, обмін досвідом і створення уніфікованих стандартів [85].

GIS дозволяє виявити найбільш ризиковані об'єкти [86, 87]. Інтеграція даних про кліматичні умови, інфраструктуру та історичні випадки пожеж на основі геоінформаційної системи (GIS) дозволяє прогнозувати найуразливіші точки [88].

Для виявлення джерел небезпеки використовується математичне моделювання. Наприклад, методи FDS (Fire Dynamics Simulator) використовуються для симуляції динаміки пожеж на ОКІ [89].

Дослідження показують ефективність аналізу великих масивів даних для виявлення небезпеки [90], визначення закономірностей і тенденцій [91].

Байєсівський підхід до аналізу ризиків дозволяє враховувати невизначеності та оновлювати оцінки ризиків у реальному часі залежно від нових даних [92, 93].

Досвід [94, 95] з використанням багатфакторного аналізу ризиків демонструє переваги одночасного врахування декількох чинників небезпеки.

Експертиза дозволяє не лише встановлювати причини та обставини пожежі, а й сприяє розробці превентивних заходів, вдосконаленню нормативної бази та підвищенню рівня безпеки. Аналіз закордонних досліджень демонструє, що технічні методи експертизи джерел пожеж включають інноваційні підходи, такі як інтеграція IoT, використання БПЛА, тепловізорів та моделювання сценаріїв надзвичайних ситуацій. Організаційні методи експертизи включають багаторівневий підхід до управління ризиками, що базується на міжнародних стандартах, координації дій між різними структурами, систематичному моніторингу та навчанні персоналу. Використання математичних моделей, статистичного аналізу забезпечує точне визначення джерел виникнення пожеж і ефективну оцінку ризиків.

Таким чином, перспективи вдосконалення протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури полягають у впровадженні сучасних методів та технологій виявлення загроз, створення баз даних для аналізу ризиків, а також інтеграцію воєнних факторів у систему пожежної безпеки. Результати експертизи джерел виникнення пожежі є основою ефективної системи протипожежного захисту, яка здатна протистояти викликам сучасності.

1.5 Інструментальні методи визначення джерела виникнення пожежі

Початковим і найпростішим інструментом визначення джерела виникнення пожежі є органи зору. Візуальний огляд дозволяє отримати

первинну інформацію про характер та масштаби пошкоджень, а також ідентифікувати джерела та шляхи поширення вогню [96].

Сучасні системи відеоспостереження [97], мобільні пристрої [98] та записи з дронів [99] дозволяють детально аналізувати розвиток подій і встановлювати причини пожежі. У відеозаписах можна знайти підозрілі обставини, такі як несправності електрообладнання, людський фактор чи зовнішнє втручання.

В галузі пожежної безпеки та для розслідування причин пожеж набули популярності програмні продукти Fire Dynamics Simulator (FDS) з метою моделювання та симуляції поширення вогню в обмежених просторах [89], Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (CFAST) – допомагає виявити місця концентрації тепла та диму, що дозволяє оцінити рівень небезпеки для евакуації та встановити ймовірні джерела займання [100], PyroSim – дозволяє точніше прогнозувати розвиток пожежі, її вплив на конструкції, а також визначати можливі джерела займання [101], FIRE – дозволяє встановити місце ймовірного джерела займання на основі аналізу змін температури, наявності і концентрації горючих матеріалів [102], BRANZFIRE – дозволяє фахівцям аналізувати, як пожежа буде поширюватись залежно від будівельних матеріалів, вентиляції, конфігурації будівлі, а також визначати можливі джерела загоряння та її вплив на безпеку людей і структури будівлі [103], Ventsim – дозволяє точно визначити, як системи вентиляції можуть впливати на розвиток вогню та диму, а також допомагає виявити місця, де може виникнути займання в залежності від параметрів вентиляції [104]

Технічне обстеження та діагностика дозволяють підвищити безпеку та знизити ймовірність виникнення пожеж на ОКІ [95]. Дослідницька група повинна ретельно проаналізувати всі термічні, механічні, електричні, радіаційні, хімічні елементи тощо, які могли бути присутніми або статися під час початкового спалаху [105]. Використання пошкоджень як індикаторів у визначенні джерел пожежі є ефективним інструментом для розслідувань [106].

Для ідентифікації матеріалів із уламків пожеж використовуються методи вібраційної спектроскопії [107]. Ці методи дозволяють аналізувати хімічний склад обгорілих залишків і виявляти наявність горючих речовин, що могли спричинити займання.

Для дослідження властивостей матеріалів та речовин, виявлення вибухових речовин чи прискорювачів горіння (бензину, дизпалива, ацетону тощо) використовуються рамановська спектроскопія [108, 109], інфрачервона та комбінаційна спектроскопія [110], лазерно-індукована спектроскопія [111], твердофазна мікроекстракція [112].

Високу точність для визначення елементного складу, особливо для твердої фази має рентгенівська спектроскопія [113], скануюча електронна мікроскопія [114], оптична мікроскопія [115], атомно-силова мікроскопія [116].

Наведено результати визначення легкозаймистих рідин із уламків пожежі за допомогою просторової газової хроматографії-спектрометрії іонної рухливості [117, 118], термодесорбційної газової хроматографії [119].

Аналіз летких речовин у залишках горіння проводиться за допомогою комбінації смужок активованого вугілля (ACS) і автоматизованої термодесорбції, газової хроматографії, мас-спектрометрії (ATD/GC-MS) [120].

В роботі [121] проведений огляд застосування тепловізійної діагностики для виявлення «гарячих точок» у електричних мережах.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) із використанням супутникових платформ MODIS (TERRA) і AVHRR (NOAA) дозволяє ідентифікувати температурні аномалії для виявлення пожеж, «гарячих точок» [122].

Дослідження [123] демонструє використання термографічного аналізу для моніторингу стану електричних компонентів і запобігання пожежам. Термографія дозволяє визначати аномально високі температури в електричних контактах, з'єднаннях, розподільних щитах та інших компонентах, що є ранніми ознаками можливого займання.

Дослідники [124] висвітлюють діагностичні методи для аналізу причин електричних пожеж, зокрема використання осцилографів і аналізу електричних дуг.

Хеометричний метод дозволив ідентифікувати хімічні маркери горіння та встановлювати можливі джерела займання з високою точністю [118].

В роботі [125] проводиться оцінка можливого використання ультрафіолетового світла на місці пожежі та надаються подальші рекомендації щодо процедур.

Розглядаються практичні аспекти використання ультразвукових хвиль для виявлення ушкоджень в будівельних матеріалах після пожежі, а також способи точного визначення місця загоряння [126, 127].

Дослідниками удосконалена технологія виявлення пожежі: система на основі ультрафіолетового випромінювання, яка використовує спектральний аналіз Фур'є [128].

Акустичні хвилі можуть бути ефективним засобом для виявлення прихованих джерел пожежі завдяки їх здатності проникати через матеріали, які заважають візуальному або термічному спостереженню [129].

У дослідженні [130] пропонується поєднання ультразвукових технологій із ультрафіолетовими датчиками для більш точного визначення джерел займання.

У дослідженні [131] представлено методику ідентифікації осередку пожежі на основі аналізу обвуглених залишків деревини, зокрема виявляє важливі маркери, які дозволяють відрізнити місце початкового загоряння.

Таким чином, дослідження закордонних вчених доводять, що впровадження сучасних інструментів сприяють значному підвищенню ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури. Ефективна експертиза джерел виникнення пожеж на об'єктах критичної інфраструктури вимагає поєднання кількох підходів. Вибір оптимального методу залежить від специфіки об'єкта, масштабу пожежі та цілей дослідження.

Такий підхід дозволяє не лише виявити причини займання, а й запобігти аналогічним ситуаціям у майбутньому, підвищуючи загальний рівень безпеки.

Висновки по першому розділу

1. Визначено, що об'єкти критичної інфраструктури характеризуються високою вразливістю до пожеж, які можуть мати значні наслідки для населення. Техногенні ризики включають зношеність інженерних систем, застаріле обладнання та недостатню ефективність засобів протипожежного захисту. Природні ризики, такі як екстремальні погодні умови, лісові пожежі та повені, створюють загрозу особливо для об'єктів енергетики та транспорту. Антропогенні ризики включають людські помилки, недоліки в організації пожежної безпеки, низький рівень підготовки персоналу та порушення експлуатаційних правил.

2. Сучасні наукові дослідження пропонують різноманітні методологічні підходи до оцінки ризиків для об'єктів критичної інфраструктури, які враховують специфіку воєнних умов та сучасних загроз. Використання цих методик сприяє підвищенню стійкості та безпеки критичної інфраструктури, забезпечуючи ефективне управління ризиками та мінімізацію потенційних втрат.

3. Воєнний стан істотно ускладнює процес забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури, оскільки бойові дії призводять до руйнування інфраструктури, блокування логістичних шляхів та дефіциту ресурсів. Це створює додаткові ризики виникнення пожеж, адже пошкодження комунікацій, складні умови доступу до об'єктів, а також відсутність оперативного забезпечення засобами пожежогасіння значно підвищують ймовірність загорянь. Крім того, нестача кваліфікованого персоналу через мобілізацію, моральне та фізичне зношення обладнання роблять боротьбу з пожежами менш ефективною.

4. Перспективи вдосконалення протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури полягають у впровадженні сучасних методів та технологій виявлення загроз, створення баз даних для аналізу ризиків, а також інтеграцію воєнних факторів у систему пожежної безпеки. Результати експертизи джерел виникнення пожежі є основою ефективної системи протипожежного захисту, яка здатна протистояти будь-яким викликам сучасності.

5. Дослідження закордонних вчених доводять, що впровадження сучасних інструментів сприяють значному підвищенню ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури. Ефективна експертиза джерел виникнення пожеж на об'єктах критичної інфраструктури вимагає поєднання кількох підходів. Вибір оптимального методу залежить від специфіки об'єкта, масштабу пожежі та цілей дослідження. Такий підхід дозволяє не лише виявити причини займання, а й запобігти аналогічним ситуаціям у майбутньому, підвищуючи загальний рівень безпеки.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗА РАХУНОК ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЕРТИЗИ ПОВЕРХНІ ПРИМІЩЕНЬ ЯКІ ЗАЗНАЛИ ВПЛИВУ НЕГАТИВНИХ ФАКТОРІВ ПОЖЕЖІ

Вирішувати друге завдання наукового дослідження щодо розробки інформаційної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі, будемо наступним чином. Спочатку розглянемо механізм утворення і властивості кіптяви. Після чого розробимо інформаційну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі.

2.1. Механізм утворення і властивості кіптяви при пожежі

2.1.1 Аналіз процесу горіння. Кіптява на пожежі вигоряє при нагріванні поверхні конструкцій вище 600-650° С. Тому ближче до вогнища пожежі іноді може бути кіптяви менше, ніж далеко від нього. Над осередком пожежі та вторинними осередками (осередками горіння) кіптява часто вигоряє локальними плямами. Ці плями часто зберігаються в ході подальшого розвитку горіння - конструкція (стеля, стіна) в осередковій зоні прогріта добре, а кіптява, як зазначалося вище, осідає не на «гарячих» ділянках, а на більш холодних. Локальне вигорання кіптяви - гарний орієнтир під час пошуку вогнища пожежі. Однак, якщо кіптява не вигоріла і відносно рівномірно покриває

конструкції, зорієнтуватися у пошуках вогнища пожежі та шляхів поширення горіння без спеціальних інструментальних методів стає практично неможливо.

При впливі високих температур на поверхню полімеру він розкладається до складної суміші летких вуглеводнів. При наближенні до фронту полум'я температура газової суміші підвищується. Кисень з навколишнього повітря дифундує в цю газову суміш, і при досягненні відповідної концентрації та температурних умов суміш спалахне. Полум'я знову постачає енергію, необхідну для термічної деградації поверхні полімеру. Частина вуглеводнів піддається піролізу в просторі між поверхнею полімеру і фронтом полум'я, якщо їх температура досить висока - до 1000 °C, а концентрація кисню ще досить низька. Описаний механізм справедливий для всіх полімерів тільки на початковій стадії горіння. Термопласти при тривалому тепловому впливі полум'я плавляться, розтікаються, полімер нагрівається до температури піролізу, а горючі газоподібні продукти інтенсивно виділяються з розплаву. В результаті полімер або повністю вигорає, або залишається негорючий рідкий або твердий залишок. При горінні на поверхні термореактивних пластмас утворюється вуглекислий шар, який ізолює полімерну масу від радіаційного впливу полум'я і запобігає виділенню продуктів термічного руйнування. Якщо утворений вуглецевий шар має товщину більшу за критичну, і немає умов, що сприяють його нагріванню, розтріскуванню або вигорання (зовнішній тепловий потік, накопичення тепла, приплив окислювача), то горіння може припинитися. Виділення летких речовин часто супроводжується розсіюванням поверхні твердої фази, а видаленням останньої в газову фазу у вигляді частинок з поверхнею горіння, на якій, у свою чергу, відбувається виділення газу, займання і горіння є інтенсивними. При згорянні утворюється негорючий мінеральний залишок або кокс [23].

Тільки пористі матеріали, які утворюють твердий залишок при нагріванні, можуть самотійно підтримувати горіння, що тліє. Сюди відноситься широкий спектр матеріалів рослинного походження, таких як папір, целюлозні тканини, тирса, шаруваті плити і латексна гума, а також деякі термореактивні пластики в

розтягнутій відстані. Матеріали які можуть плавитися і зазнавати усадки під впливом джерела тепла, не виявлятимуть вид горіння, що розглядається. Причину цього можна зрозуміти з розгляду механізму тління.

Можна встановити три області горіння, а саме:

Зона 1. Зона піролізу, що характеризується різким підйомом температури, де відбувається закінчення видимих летких продуктів вихідного матеріалу;

Зона 2. Зона углистого залишку, де температура досягає максимуму, і припиняється еволюція видимих продуктів піролізу, і починається розжарювання:

Зона 3. Зона сильно пористого кутистого залишку, де залишок більше не нагрівається і температура падає повільно.

2.1.2 Осередкові ознаки горіння. При установленні осередку пожежі дуже часто вирішальне значення має стан конструкцій, матеріалів і устаткування після пожежі. За характером руйнувань, слідами горіння або теплового впливу можна установити місце або ділянку, де спочатку виникла пожежа. Як правило, чим більш обмежена зона горіння, чим менше руйнування, викликані пожежею, тим легше установити місце виникнення пожежі. Тому нерідко положення осередку пожежі сумнівів не викликає. У таких випадках іноді може бути одночасно встановлена і причина пожежі.

Але частіше висновки про положення осередку вимагають доказів. Тоді пожежі встановлюють шляхом дослідження. У цьому випадку при огляді місця пожежі варто звертати увагу на ознаки, за якими можна судити про місце виникнення й особливості розвитку пожежі.

Незалежно від конкретних умов такі ознаки по особливостях їхнього утворення і положенню в зоні пожежі можна розбити на дві великі групи:

- ознаки осередку пожежі, що утвориться на ділянці його виникнення;
- ознаки спрямованості поширення вогню.

До основних ознак першої групи варто віднести:

- руйнування і сліди горіння у осередку пожежі (у місці виникнення пожежі);
- ознаки осередку, що утворюються над місцем виникнення пожежі;
- "осередковий конус".

Ознаки (сліди) спрямованості поширення горіння доцільно розділити на:

- послідовно загасаючі (зростаючі) поразки;
- довільно розташовані ознаки спрямованості поширення вогню.

Необхідно відзначити, що на пожежі не завжди виникають і зберігаються ознаки всіх типів. Тому в кожному конкретному випадку важливо виявити і врахувати наявні ознаки. Навіть невелика кількість установлених таких ознак у сполученні з іншими даними допоможе правильному рішенню задач.

2.1.3 Осадження кіптяви на конструкціях та утворення закопчень в умовах пожежі. Розглядаючи явище утворення закопчень на пожежі, слід враховувати матеріал та температуру конструкцій, їх конфігурацію, інтенсивність та розміри зони горіння, конвективний режим (швидкість масообміну та температуру димових газів). На пожежі частинки кіптяви рухаються вздовж лінії температурного поля у бік зниження температури. Тому, якщо частинки знаходяться між холодною та теплою поверхнями, вони рухаються до холодної і осаджуються на ній. Подібним чином інтенсивний пучок світла, односторонньо нагріваючи поверхню частинки, змушує рухатися їх у напрямку випромінювання, або проти нього, тобто. викликати явище фотофорезу. При позитивному фотофорезі частинки рухаються вздовж світлових пучків від джерела світла; протилежний ефект називається негативним фотофорезом. Для деяких речовин спостерігається лише позитивний фотофорез; частинки інших речовин можуть рухатися в різних напрямках.

Фотофорез відсутній або проявляється дуже слабо у речовин, що добре відображають світло, наприклад фториду кальцію і оксиду магнію, і дуже помітно у сильних поглиначів світла: сажі, залізної тирси, алюмінієвих галунів і

барвників. У деяких зонах світлового пучка частинки можуть здійснювати дуже швидкі коливання, рухатися спіральними і зигзагоподібними траєкторіями і т.д. Якщо сильніше нагрівається сторона частинки, звернена до джерела світла, то завдяки бомбардування цієї сторони, що посилюється, молекулами навколишнього газу частка зміщується від джерела світла і, отже, має місце позитивний фотофорез, якщо ж сильніше нагрівається протилежна сторона частинки, то виходить зворотний ефект. Чи матиме місце позитивний або негативний фотофорез залежить від ряду факторів, а саме від розміру та форми частинки, прозорості речовини частинок для світла різної довжини хвилі та різниці фаз у падаючих, прохідних та відбитих променях. Утворення відкладень сажі безпосередньо пов'язано з напрямком і швидкістю димових потоків. Більш смолисті і важчі частинки осідають на поверхні димового каналу ближче до зони горіння. При високій швидкості конвективного потоку, інерційні, аеродинамічні механізми осадження активуються. В цьому випадку, найбільшу кількість сажі утворюється в місцях виступів, звужень і інших перешкод на шляху до виходу диму.

У випадку, коли інтенсивні конвективні потоки відсутні, поряд з явищами термо- та фотофорезу має місце гравітаційне осадження кіптяви на звернені догори поверхні. Поряд з потовщенням шару кіптяви згідно з описаними механізмами, на пожежі має місце вигорання та газифікація кіптяви при впливі високих температур, а також випаровування легких конденсованих органічних речовин і перетворення їх на поліароматичні дегідровані сполуки.

2.1.4 Механізм утворення компонентів кіптяви. Уявлення про механізми перетворень органічних сполук у низько- та високотемпературній зонах піролізу твердих полімерів розвинені недостатньо. У низькотемпературній зоні піролізу частина пального буде перетворюватися за схемою конденсації у високомолекулярні рідкі продукти з утворенням дисперсного вуглецю у вигляді сферичних частинок коксу або осідати на поверхню сажових частинок і окиснити їх. Частина крапель вуглеводневого

туману при швидкому охолодженні саже-газової суміші може залишитися у вигляді високомолекулярних вуглеводнів на поверхні сажевих частинок і може бути екстрагована з них органічними розчинниками (хлороформом, етанолом тощо). Чим вище температура процесу, тим більша частина палива перетворюється на сажеві частинки, і тим менша - через проміжні високомолекулярні смолоподібні продукти зі значним коксуванням їх на поверхні сажевих частинок. До складу нерозчинної в органічних розчинниках частини кіптяви входять вуглецеві частинки, зольні елементи, а також дегідровані поліароматичні сполуки з високим ступенем ароматизації. Наявність у кіптяви зольної частини пояснюється відривом конвективними потоками зольних частинок палаючого матеріалу. Отже, чим інтенсивнішим буде горіння, тим більша частина зольного залишку палаючого матеріалу може перейти в дисперсну фазу диму і осісти на конструкціях у складі кіптяви. До цього часу механізм утворення сажових частинок при горінні повною мірою не описаний, що пояснюється надзвичайною складністю цього фізико-хімічного процесу.

Так як кіптява є метастабільний продукт процесу горіння, то не виключається можливість існування кількох шляхів переходу (механізмів) у цей стан залежно від конкретних умов реалізації процесу.

При горінні полімеру можна припустити дві граничні умови для утворення частин:

- карбонізації зони піролізу;
- карбонізацію у фронті полум'я.

поверхню полімеру нагрівають до випромінювальної передачі тепла від полум'я. У турбулентних умовах можливо також конвективний теплообмін. При цій температурі полімер розкладається до складної суміші летких речовин. Температура газової суміші зростає в міру наближення до фронту полум'я. Кисень з навколишнього повітря дифундує в суміші газів і при досягненні відповідних умов концентрації і температури, суміш запалюється. Полум'я знову подає енергію, необхідну для термічної деструкції

полімерної поверхні. Частина піддається піролізу вуглеводнів в просторі між поверхнею полімеру і фронту полум'я в разі, коли температура досить висока - до 1000 ° С, а концентрація кисню залишається досить низькою. Вважається, що в зоні формування піроліз частинок відбувається через перенасичення і продукти конденсації піролізуються між вуглеводнями. Якщо сформоване ядро, умова насиченості виконується, то подальше зростання часток відбувається шляхом осадження газоподібних вуглеводнів на поверхні сердечників. Частинки, утворені таким чином, піддаються подальшій деградації, вони переміщуються через область з більш високою температурою і входом полум'я. Також можливо, що деякі з конденсованих частинок більші за молекули вуглеводнів. Вони також можуть згоріти, якщо вони переміщуються через область полум'я.

Таким чином, різноманіття умов виникнення і розвитку пожеж у кожному окремому випадку може давати приклади ознак спрямованості горіння не тільки на однорідних конструкціях та елементах споруджень, але також і в умовах змішаного середовища в межах більш-менш великої зони горіння, що є основою для подальшого формування інформаційної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі.

2.2 Інформаційна модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі

Більшість складових процесу технічної експертизи здійснюється під час огляду місця пожежі. Своєчасність і якість цієї експертизи має першорядне значення для швидкого, повного і об'єктивного встановлення обставин пожежі

та її фактичної причини. Рішення про перелік та послідовність проведення досліджень на місці пожежі значною мірою залежить від особливостей пожежі, що розслідується.

Фактично, в Україні близько 97% усіх пожеж розслідуються інспекторами ДСНС, так би мовити, первинними інспекторами. Зрозуміло, що більшість пожеж у побуті та на виробництві не потребують найвищого рівня кваліфікації дізнавачів, оскільки вони не такі масштабні, а причину спалаху визначити не так складно, як може здатися. Однак, враховуючи сучасний стан професійної підготовки та обізнаності з цього питання, встановлені причини пожеж не завжди є достовірними. Зазвичай це пов'язано з низкою поведінкових порушень під час первинного незалежного розслідування пожежі молодими фахівцями. За рідкісним винятком, це робиться не під керівництвом досвідченого наставника, і не всі здатні критично оцінити свої результати. Молоді люди, які щойно закінчили пожежно-технічний або технічний навчальний заклад, через страх бути визнаними некомпетентними, зроблять надто однозначні висновки про причину пожежі в неоднозначній ситуації, ґрунтуючись виключно на результатах візуального огляду, не беручи до уваги неоднозначність ситуації. Не усвідомлення правильності своїх дій у підрозділі призводить до формування та закріплення неправильних навичок у майбутньому. Найбільшою помилкою, що призводить до хибних висновків про справжні причини пожеж, є ігнорування загальноприйнятих базових правил, які напрацьовувалися пожежними протягом багатьох поколінь і алгоритми яких описані в джерелах (рис.2.1).

Аналіз низки методичних підходів та досвіду вирішення цих проблем вітчизняними фахівцями, які досліджують найскладніші пожежі в Україні, дозволив запропонувати уточнену схему дій під час огляду місця надзвичайної ситуації в наслідок пожежі.

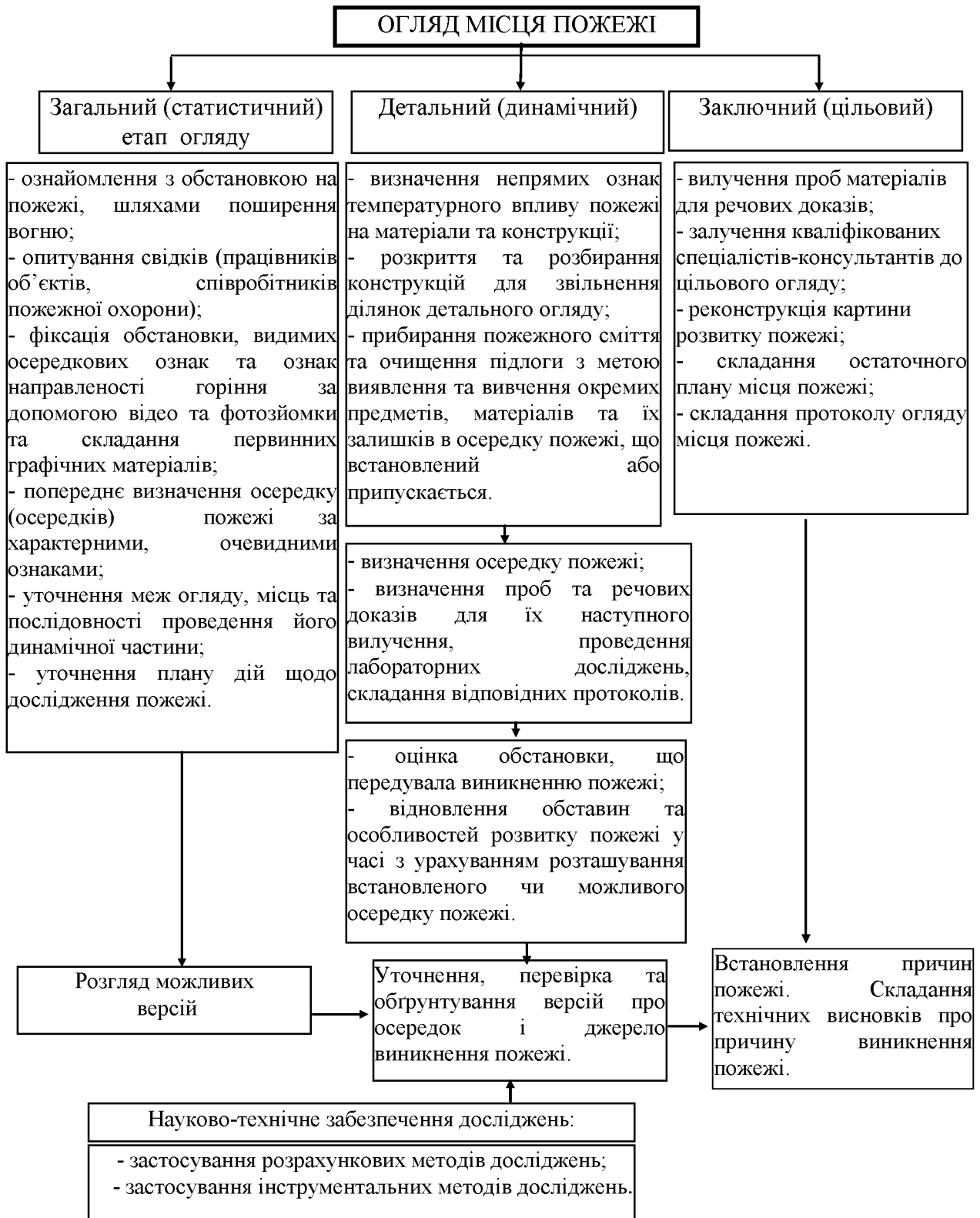


Рис. 2.1. Алгоритм дій при огляді місця надзвичайної ситуації в наслідок пожежі та послідовність встановлення причин її виникнення.

Особливе місце в процесі планування займає розгляд можливих причин пожежі. Від цього переліку залежить склад слідства. Жодна версія не може

бути висунута без підставно. Водночас важливо знайти відповіді на такі питання, як: чи мав місце підпал, злочинна недбалість або порушення правил пожежної безпеки, удар блискавки або самозаймання. Замість того, щоб надавати перевагу одній теорії, необхідно розглянути всі можливості одночасно.

Попереднє планування зазвичай базується на загальних даних про об'єкт пожежі. Крім того, пожежа ідентифікується на основі загального огляду місця пожежі.

Від повноти виконання зазначеного плану дій на всіх етапах огляду залежить об'єктивність сприйняття загальної картини пожежі, сформованої під впливом пожежонебезпечних факторів, що, в свою чергу, визначає якість висновків і достовірність встановленої причини пожежі.

Зазначимо, що елементи, що характеризують стан об'єкта критичної інфраструктури до виникнення пожежі:

- Пожежно-технічна характеристика об'єкта: об'ємно-планувальні рішення, пожежна небезпека технологічних процесів, водопостачання, наявність первинних засобів пожежогасіння, автоматичних систем виявлення та гасіння пожежі;
- Вид і розподіл пожежних навантажень: склад, стан, вологість, дисперсність, показники пожежної небезпеки, відстань до джерел займання;
- Вид і розподіл речовин, виробів та обладнання підвищеної небезпеки; показники пожежної небезпеки;
- Незвичайні пожежні навантаги;
- Тип і розташування потенційних джерел запалювання.
- Умови газообміну: наявність і розташування вікон, дверей та інших отворів; характеристики вентиляційних систем;
- Потенціал поширення вогню: технічні отвори, системи вентиляції, конструктивні особливості;
- Стан і розташування конструктивних елементів, що перешкоджають виникненню і поширенню пожежі;

- Пожежна небезпека робіт, що проводилися до пожежі;
- Потенціал несанкціонованих джерел займання;
- Фактична поведінка людей перед пожежею.
- Відхилення в роботі обладнання, електромереж, систем опалення, приладів тощо;
- Присутність та поведінка сторонніх осіб на об'єкті (якщо такі були);
- Порушення протипожежного режиму;
- Ідентифікація родинних зв'язків (якщо це дозволено);
- Можливість того, що хтось може бути зацікавлений у приховуванні злочину (допустимо);
- Стан пожежної безпеки приміщення до пожежі відповідно до документації наглядової справи.

Визначаються умови на момент виникнення пожежі:

- Непрямими ознаками впливу зони горіння, тепла та диму на матеріали та конструкції;
- Місцем найбільш інтенсивного горіння та димовиділення;
- Ознаками напрямку горіння та його траєкторії;
- Фіксований час руйнування конструкції;
- Місце знаходження осередкових ознак і характер їх появи;
- Особи, які виявили пожежу; особи, які повідомили про пожежу; особи, які гасили пожежу до прибуття пожежної команди; пожежні, які брали участь у гасінні пожежі; особа, відповідальна за пожежну безпеку приміщення; особа, відповідальна за матеріальні збитки; потерпілий; свідки, які спостерігали пожежу під час її розвитку або гасіння;
- стан та ефективність роботи первинних засобів пожежогасіння, автоматичних систем виявлення та гасіння пожежі та систем димовидалення;
- час розблокування дверних замків; розбиття вікон (у тому числі під впливом надлишкового тиску продуктів горіння або їх високої температури);
- місце першої появи горіння, диму, колір полум'я або диму;

- відключення електричної та газової мережі; демонтаж та очищення пожежних навантаж; елементів конструкцій;

- поведінка людей у приміщенні;

- кліматичні умови;

- тип вогнегасної речовини, порядок застосування, місце застосування.

Стан об'єкта після пожежі можна проаналізувати на основі таких елементів:

- виявлені та вилучені речові докази;

- заходи, вжиті для збереження предметів і документів, вилучених під час огляду;

- характер виявлення непрямих ознак температурного та димового впливу на матеріали, конструкції та обладнання;

- факт пошкодження, знищення або втрати будівель, споруд, матеріалів, сировини, готової продукції, майна, обладнання, транспортних засобів, загибелі людей і тварин;

- креслення, що відображають обстановку до, під час та після пожежі, включаючи геометричні розміри площі горіння, теплове опромінення, задимлення, пожежні навантаження, конструктивні елементи, стан обладнання, ознаки осередку пожежі (детально), напрямок горіння, ознаки, що є підставою для розгляду версії про причину пожежі – на планах, розрізах та детальних кресленнях;

- креслення технологічних процесів та інженерних комунікацій;

- підготовка протоколів відбору зразків та вилучення речових доказів за відповідними схемами відбору зразків;

- відеозйомка та фотографування.

Залежно від конкретної справи, кількість, обсяг і послідовність вищезазначених компонентів можуть бути змінені. Оскільки збір такої інформації є трудомістким процесом, необхідне завчасне планування. В іншому випадку не будуть зібрані вичерпні дані про пожежу, а час буде витрачено на додаткові перевірки, що ускладнить подальшу розробку версії причини пожежі. Відповідно запорукою успіху є глибоке та швидке розслідування пожежі,

спрямоване на пошук її складових, без припущення неминучого та швидкого знищення під час ліквідації інциденту або знищення внаслідок природних причин.

Враховуючи наведене інформаційна модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі наведена на рис. 2.2.

Інформаційна модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативного впливу факторів пожежі, складається з 8 блоків, які вміщуються у два контури управління. Вибір між контурами управління здійснюється блоком визначення ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури за результатами її спрацювання в разі виникнення надзвичайної ситуації внаслідок пожежі. У разі отримання позитивного результату система здійснює заходи з попередження загорянь у майбутньому.

У разі негативної оцінки система повинна здійснити два блоки заходів направлених по-перше, на підвищення ефективності автоматичної системи сповіщення у разі пожежі, по-друге, на підвищення системи автоматичного пожежогасіння.

Перший контур управління через блок прийняття рішення замикається на прогнозованому джерелі запалення, другий контур безпосередньо на систему протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури.

Вихідною інформацією для реалізації першого або другого контуру управління є інформація отримана в результаті технічної експертизи приміщень об'єкту критичної інфраструктури, які зазнали впливу пожежі. Остання надходить в результаті послідовного відпрацювання трьох блоків технічної експертизи, а саме: процедури вимірювань на об'єкті критичної інфраструктури, процедури статистичної обробки результатів вимірювань, процедури реконструкції пожежі.

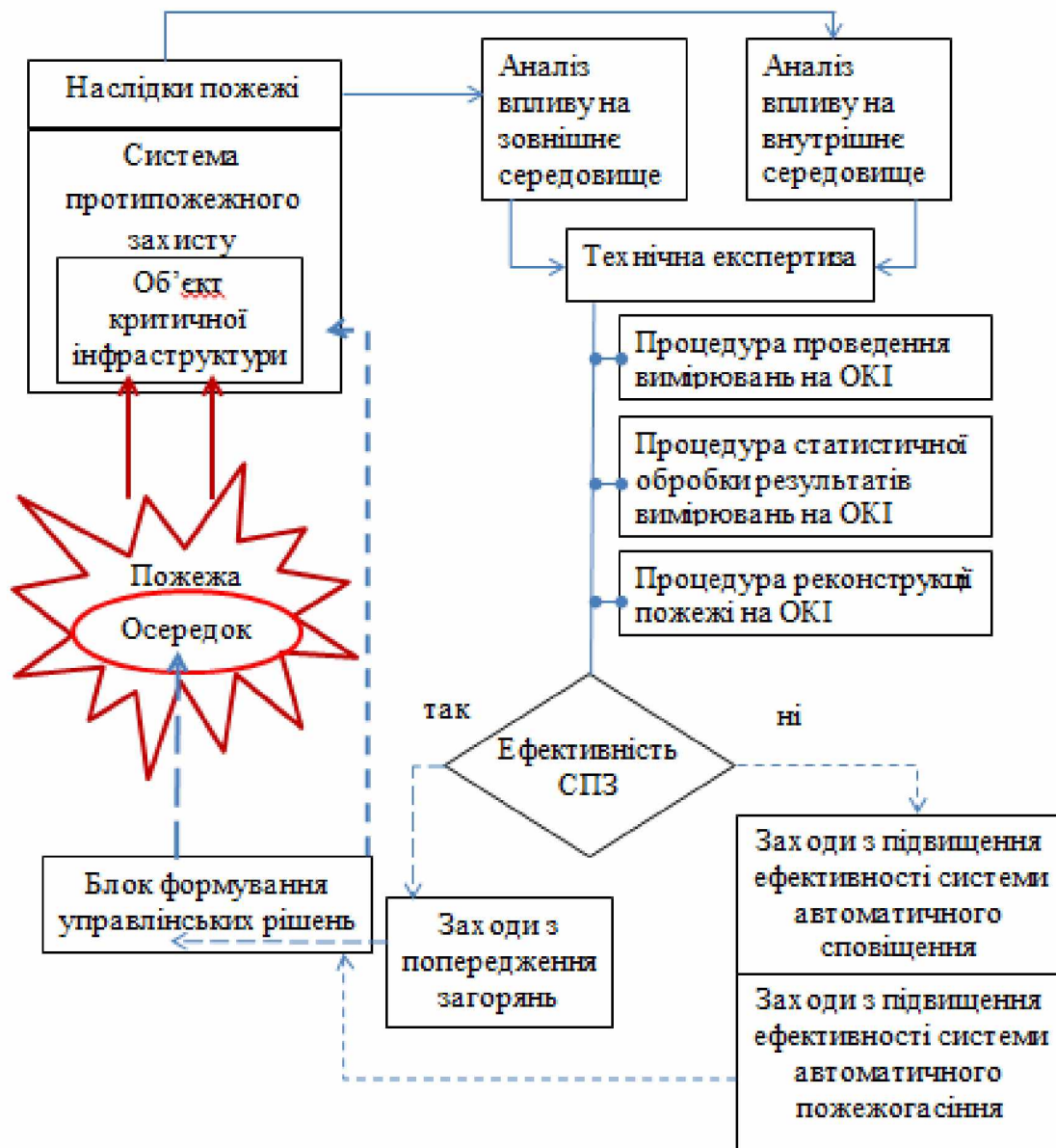


Рис. 2.2 Інформаційна модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі.

Таким чином, інформаційна модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі, складається з двох контурів управління загального контуру який відповідає позитивному рішення щодо ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури та оперативного контуру, який задіється у разі негативної оцінки ефективності системи

протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури, рішення щодо контуру управління приймається спираючись на сучасні технічні досягнення в області експертизи пожеж та їх наслідків;

Висновки за другим розділом

1.Різноманіття умов виникнення і розвитку пожеж у кожному окремому випадку може давати приклади ознак спрямованості горіння не тільки на однорідних конструкціях та елементах споруджень, але також і в умовах змішаного середовища в межах більш-менш великої зони горіння, що є основою для подальшого формування інформаційної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі.

2. Інформаційна модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі, складається з двох контурів управління загального контуру який відповідає позитивному рішенням щодо ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури та оперативного контуру, який задіється у разі негативної оцінки ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури, рішення щодо контуру управління приймається спираючись на сучасні технічні досягнення в області експертизи пожеж та їх наслідків.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗА РАХУНОК ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЕРТИЗИ КІПТЯВИ ПОВЕРХОНЬ ПРИМІЩЕНЬ В ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ

Вирішувати третє завдання наукового дослідження щодо розробки математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі, будемо наступним чином. Спочатку розглянемо рішення окремої задачі щодо визначення впливу термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви. Після чого розглянемо рішення окремої задачі щодо визначення характеристик випромінюючої поверхні полум'я над осередком пожежі у разі наявності огорожувальної поверхні. Наступними кроками з формування шуканої математичної моделі є розгляд рішення окремої задачі щодо визначення характеристик висхідного потоку над осередком пожежі та рішення окремої задачі щодо визначення коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння. На завершення розділу наведемо опис математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі.

3.1. Рішення окремої задачі щодо визначення впливу термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви

Спираючись на низку досліджень [132], [133] зазначмо, що широкому класу твердих і рідких речовин притаманна емпірична залежність довжини від розмірів осередку горіння і питомої масової швидкості вигорання

$$L = bD \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^n, \quad (3.1)$$

де L – довжина факела; D – діаметр осередку; η – питома масова швидкість вигорання; ρ_a – густина повітря; g – прискорення вільного падіння; $b > 0$, $n > 0$ – сталі.

Вираз (3.1) може бути застосований до осередків на початковій стадії горіння або горіння розливів рідини, що мають форму наближену до кола, але у випадку, коли форма осередку пожежі суттєво відрізняється від кола, використання (3.1) є досить складним.

Вираз (3.1) можна проілюструвати на рис. 3.1, де наведено залежності довжини факела від діаметра осередку пожежі для деяких горючих і легкозаймистих рідин з різними питомими масовими швидкостями вигорання, які здебільш знаходяться на об'єктах критичної інфраструктури. При цьому $b=55$; $n=0,67$ [133].

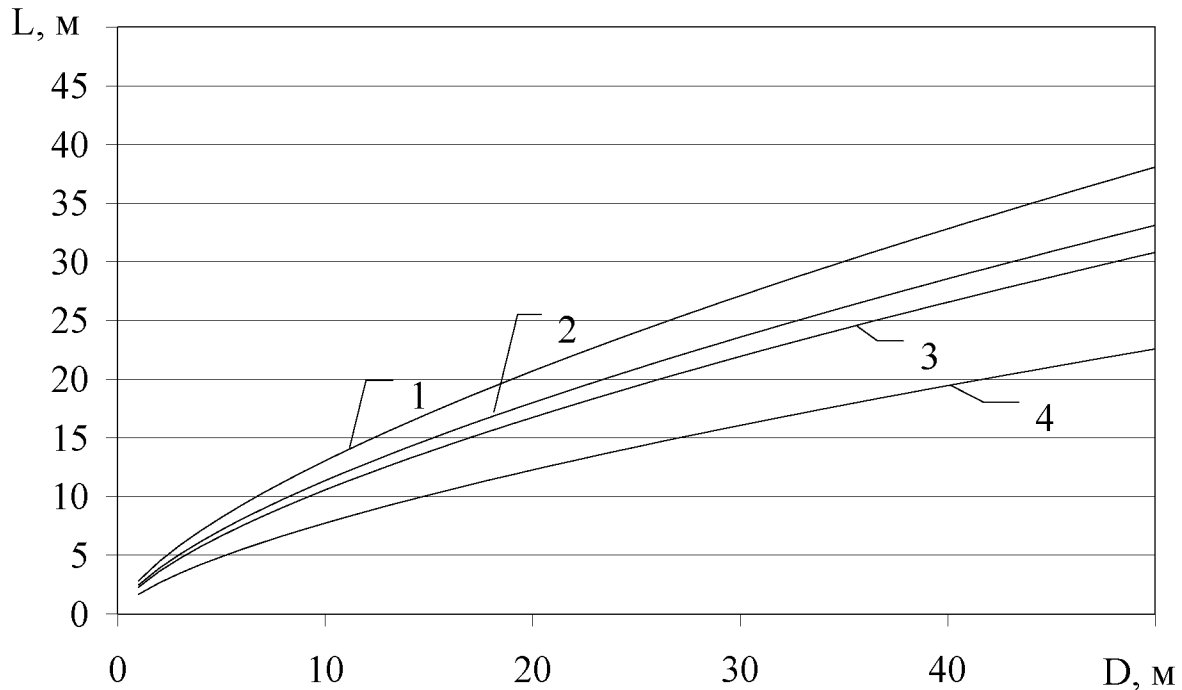


Рис. 3.1. Залежність довжини факела над осередком пожежі для горючих і легкозаймистих рідин.

На рис 3.1 застосовані наступні визначення: 1 – бензин, $\eta = 0,048 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 2 – трансформаторне мастило, $\eta = 0,039 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 3 – мазут, $\eta = 0,035 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; 4 – нафта, $\eta = 0,022 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

Аналіз виразу (3.1) свідчить, що довжина факела збільшується із зростанням величини питомої масової швидкості вигорання і середнього діаметра осередку пожежі. Формула (3.1) має рацію лише у разі коли осередок пожежі по формі близький до форми кола, що має місце для пожежі горючої рідини або пожежі в приміщенні без огорожувальних поверхонь. Якщо ж форма осередку пожежі істотно відрізняється від кола (має вплив огорожувальних поверхонь або розтікання на похилій поверхні тощо), то вираз (3.1) не можна застосовувати.

Розглядаючи довільну форму осередку пожежі будемо вважати, що довжина полум'я у довільній точці (x,y) осередку описується виразом:

$$L(x, y) = 2b \left(\frac{1}{\rho_a \sqrt{2g}} \right)^n r^{1-n/2}(x, y) \eta^n, \quad (3.2)$$

де $r(x, y)$ – відстань від точки (x, y) до межі горіння.

Це дозволяє узагальнити вираз (3.1) на випадок осередку довільної форми і отримати залежність (3.2).

Виносячи $r(x, y)$ і скорочуючи, отримаємо

$$L(x, y) = 2b \left(\frac{1}{\rho_a \sqrt{2g}} \right)^n r^{1-n/2}(x, y) \eta^n. \quad (3.3)$$

Підставляючи в останній вираз значення для густини повітря $\rho_a = 1,29 \text{ кг/м}^3$, прискорення вільного падіння $g = 9,8 \text{ м}^2/\text{с}$, отримаємо формулу для довжини полум'я у довільній точці (x, y) осередку пожежі.

$$L(x, y) = b 0,175^n r^{1-n/2}(x, y) \eta^n. \quad (3.4)$$

Із аналізу виразу (3.4) випливає, що довжина полум'я має степеневу залежність від відстані до межі осередку і від питомої масової швидкості вигорання речовини. Отже, збільшення питомої масової швидкості вигорання призводить до збільшення довжини полум'я. Так, наприклад, для бензину ($\eta = 0,048 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) довжина полум'я майже в 1,7 рази перевищує довжину полум'я для нафти ($\eta = 0,022 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$).

Відповідно, якщо осередок знаходиться на похилій площині, або на нього впливають елементи огороження, максимальна висота полум'я буде визначатися максимальною шириною осередку.

Наявність повітряного обміну у приміщенні призводить до нахилу факела. Залежність довжини факела L і кута нахилу α (відхилення від вертикальної осі) від швидкості повітряного обміну має наступний вигляд:

$$L = bD \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^n (w^*)^{-0,21}; \quad (3.5)$$

$$\cos \alpha = (w^*)^{-0,5}, \quad (3.6)$$

де w^* – безрозмірна швидкість повітряного обміну:

$$w^* = \max \left\{ 1, w \left(\frac{g\eta D}{\rho_a} \right)^{-1/3} \right\}. \quad (3.7)$$

Особливістю формул (3.5), (3.6) є залежність від безрозмірної швидкості повітряного переносу w^* . Це призводить до того, що існує деяке значення швидкості повітряного переносу, починаючи з якого полум'я над осередком пожежі, що горить, змінює свою форму. Отже, для того, щоб швидкість повітряного переносу впливала на форму полум'я, необхідно, щоб його вона задовольняла умові

$$w > (8,57\eta\sqrt{S})^{1/3}.$$

Із її аналізу випливає, що чим меншими є розміри осередку пожежі і питома масова швидкість вигорання пожежної навантаги, тим сильніше повітряний переніс відхиляє полум'я від вертикальної осі. Це пов'язано із формуванням більш потужних висхідних потоків над осередком горіння при збільшенні його розмірів і інтенсивності вигорання пожежної навантаги. Для осередку довільної форми будемо вважати, що мають місце залежності (3.5)-(3.7), де середній діаметр осередку D обчислюється за допомогою

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}},$$

де S – площа осередку пожежі. Тоді вираз (3.4) для довжини полум'я в довільній точці (x, y) осередку трансформується у

$$L(x, y) = b_{0,175} r^{1-n/2} (x, y) \eta^n (w^*)^{-0,21}, \quad (3.8)$$

де безрозмірна швидкість повітряного переносу обчислюється за формулою

$$w^* = \max \left\{ 1, w \left(\frac{2g\eta\sqrt{S}}{\rho_a \sqrt{\pi}} \right)^{-1/3} \right\} \approx \max \left\{ 1, w (8,57\eta\sqrt{S})^{-1/3} \right\}, \quad (3.9)$$

де відповідно проведено підстановку значень для прискорення вільного падіння і густини повітря.

Із формули (3.9) випливає, що повітряний переніс буде відхиляти полум'я від вертикалі, якщо для його швидкості виконано нерівність

$$w > (8,57\eta\sqrt{S})^{1/3}. \quad (3.10)$$

Підстановка значень $b=55$; $n=0,67$ [133] в (3.7) дає:

$$L(x, y) = 17 r^{0,67} (x, y) \eta^{0,67} (w^*)^{-0,21}. \quad (3.11)$$

Відтак за умови відсутності повітряного переносу довжина полум'я над точкою (u,v) осередку Ω визначається формулою (3.3). Тоді точці (u,v) на поверхні осередку відповідає точка (x,y,z) на випромінюючій поверхні полум'я:

$$\begin{cases} x = u, \\ y = v, \\ z = z_0, \end{cases} \quad (3.12)$$

де z_0 – довжина полум'я над точкою (u, v) . Скорочення довжини полум'я і його нахил повітряним переносом (формули (3.5), (3.6) відповідно) призводить до того, що точці (u,v) на поверхні осередку пожежі відповідає точка (x,y,z) :

$$\begin{cases} x = u + z_0 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi, \\ y = v + z_0 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi, \\ z = z_0 \cdot \cos \alpha, \end{cases} \quad (3.13)$$

φ – кут напрямку повітряного переносу.

Об'єднуючи (3.6), (3.11), отримаємо

$$\begin{cases} x = u + L(u,v) \sqrt{1 - (w^*)^{-1}} \cdot \cos \varphi, \\ y = v + L(u,v) \sqrt{1 - (w^*)^{-1}} \cdot \sin \varphi, \\ z = L(u,v) \cdot (w^*)^{-0,5}, \end{cases} \quad (3.14)$$

що після підстановки (3.12) дає

$$\begin{cases} x = u + a_1 r^{0,67}(u, v) \sqrt{1 - (w^*)^{-1}} \cdot \cos \varphi, \\ y = v + a_1 r^{0,67}(u, v) \sqrt{1 - (w^*)^{-1}} \cdot \sin \varphi, \\ z = a_1 r^{0,67}(u, v) (w^*)^{-0,5}, \end{cases} \quad (3.15)$$

де $a_1 = 17\eta^{0,67}(w^*)^{-0,21}$.

Відзначимо, що одиничний нормальний вектор до поверхні факела у точці $(x, y, z) \in S$, де S – поверхня факела, буде мати вигляд:

$$\vec{n}_1 = \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right), \quad (3.16)$$

де:

$$A = \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial z}{\partial v} - \frac{\partial z}{\partial u} \frac{\partial y}{\partial v}; \quad B = \frac{\partial z}{\partial u} \frac{\partial x}{\partial v} - \frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial z}{\partial v}; \quad C = \frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial y}{\partial v} - \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial x}{\partial v}. \quad (3.17)$$

Таким чином, дозволяє стверджувати, що довжина факела над осередком пожежі збільшується із зростанням величини питомої масової швидкості вигорання і середнього діаметра осередку пожежі.

3.2. Рішення окремої задачі щодо визначення характеристик випромінюючої поверхні полум'я над осередком пожежі у разі наявності огорожувальної поверхні

При горінні пожежної навантаги, не обмеженої вертикальними стінками приток кисню в зону горіння відбувається знизу з усіх боків (рис 3.2, а). Наявність вертикальної стінки поруч з осередком горіння призводить до того,

що полум'я «прилипає» до стінки і витягується вгору вздовж неї (рис. 3.2, б) [132].

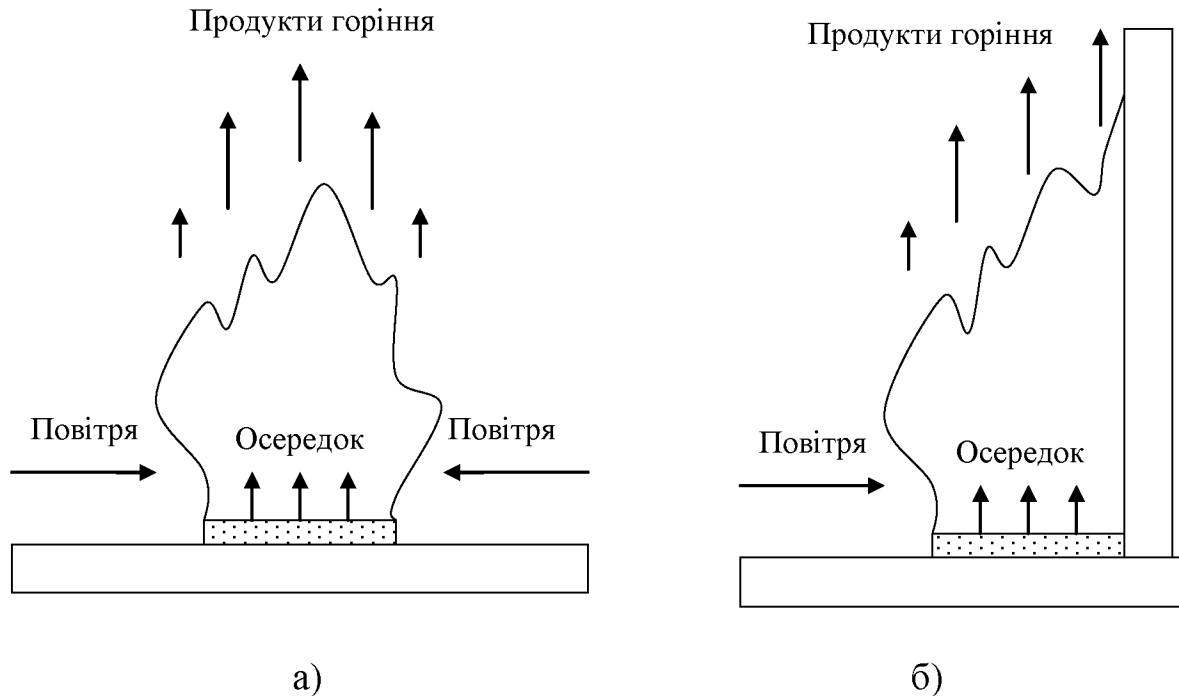


Рис. 3.2. Полум'я над осередком пожежі: вільне горіння (а) і горіння біля вертикальної стінки (б)

Причиною такого прилипання і витягування є те, що з боку стінки кисень не надходить в зону горіння, внаслідок чого пари термічного розкладу пожежної навантаги підіймаються вздовж стінки і згорають вище.

Нехай $h(x,y)$ – висота перешкоди вздовж межі $\partial\Omega$ області розливу Ω (рис. 3.2). Тоді вираз для випромінюючої поверхні полум'я за умови відсутності повітряного переносу набуде вигляду:

$$L(u,v) = \min_{(x,y) \in \partial\Omega} (b_0, 175^n r^{1-n/2}(x,y) \eta^n + h(x,y)), \quad (3.18)$$

де точка (u,v) належить області розливу Ω ; $b>0$, $n>0$ – ті самі сталі, що і в формулі (3.1): $b=55$; $n=0,67$ [133]; η – питома масова швидкість вигорання; $r(x,y)$ – відстань між точками (u,v) і (x,y)

$$r(x,y) = \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2}. \quad (3.19)$$

Далі визначимо характеристики випадкового процесу, що описує тепловий потік випромінюванням від пожежі. Щільність теплового потоку від пожежі визначається законом Стефана-Больцмана:

$$q = c_0 \varepsilon_f \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \psi, \quad (3.20)$$

де $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – стала; ε_f – ступінь чорноти випромінюючої поверхні факела; T_f – температура поверхні факела; T – температура елементарної площадки, на яку падає теплове випромінювання; ψ – коефіцієнт взаємного опромінення між факелом і цією елементарною площадку.

З урахуванням випадкового характеру коефіцієнта взаємного опромінення, викликаного пульсаціями полум'я, щільність теплового потоку $q(t)$ також є випадковим процесом. Внаслідок лінійного зв'язку між щільністю теплового потоку $q(t)$ і коефіцієнтом взаємного опромінення $\psi(t)$ їх математичні очікування і середньоквадратичні відхилення пов'язані між собою співвідношеннями:

$$\bar{q} = c_0 \varepsilon_f \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \bar{\psi}; \quad (3.21)$$

$$\sigma_q = c_0 \varepsilon_f \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \sigma_\psi. \quad (3.22)$$

Тоді величини пульсацій площі поперечного перерізу полум'я і щільності теплового потоку співпадають:

$$\frac{\sigma_q}{\bar{q}} = \frac{\sigma_\psi}{\bar{\psi}} = \frac{\sigma_s}{\bar{S}} = \delta. \quad (3.23)$$

Для розрахунку математичного очікування щільності теплового потоку приймалося, що випромінююча поверхня факела описується виразом (3.12). Це дозволило визначити середнє значення коефіцієнта взаємного опромінення:

$$\bar{\psi} = \frac{1}{\pi_s} \iint \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} dS, \quad (3.24)$$

де $\mathbf{r}$ – радіус-вектор, що з'єднує точку на поверхні полум'я і елементарну площадку, на яку падає тепловий потік; φ_1 – кут між нормальним вектором до елементарної площадки і радіус-вектором $\mathbf{r}$; φ_2 – кут між нормальним вектором до поверхні полум'я і радіус-вектором $\mathbf{r}$. При цьому інтегрування в (3.24) проводиться лише по тій частині поверхні полум'я, де $\cos \varphi_1 > 0$, $\cos \varphi_2 > 0$.

Підстановка (3.24) у (3.22) дозволяє визначити математичне очікування щільності теплового потоку. Тоді його середньоквадратичне відхилення можна знайти із (3.23):

$$\sigma_q = \delta \bar{q}. \quad (3.25)$$

Із стаціонарності випадкового процесу $\psi(t)$ також впливає стаціонарність випадкового процесу $q(t)$. Тоді кореляційна функція для щільності теплового потоку відрізняється від кореляційної функції коефіцієнта взаємного опромінення лише множником:

$$K_q(t) = \sigma_q^2 e^{-\alpha|t|}. \quad (3.26)$$

Стационарні випадкові процеси характеризуються спектральною щільністю $S(\omega)$, яка пов'язана з кореляційною функцією перетворенням Фур'є:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau; \quad (3.27)$$

$$K(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (3.28)$$

де $j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця. Для кореляційної функції виду (3.26) спектральна щільність має вигляд:

$$S_q(\omega) = \frac{2\sigma_q^2\alpha}{\omega^2 + \alpha^2}. \quad (3.29)$$

Відзначимо, що внаслідок лінійного зв'язку між випадковими процесами $q(t)$ і $\psi(t)$ із нормальності закону розподілу процесу $\psi(t)$ впливає нормальний закон розподілу для випадкового процесу $q(t)$.

Оскільки тепловий потік є випадковою функцією часу, а прибору для його вимірювання притаманна інерційність, то отримане внаслідок вимірювань значення є результатом усереднення на деякому інтервалі часу. Це призводить до того, що дисперсія результату буде відрізнятися від дисперсії вхідного теплового потоку. З точки зору теорії автоматичного керування прибор для вимірювання можна розглядати як аперіодичну ланку першого порядку. Передаточна функція такої ланки має вигляд:

$$W(p) = \frac{K}{\tau p + 1}, \quad (3.30)$$

де K – коефіцієнт передачі; τ – постійна часу, що характеризує інерційні властивості ланки. Роботу ланки можна представити схемою болометра, наведеною на рис. 3.3.

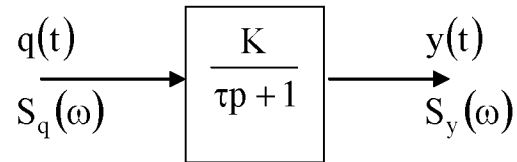


Рис. 3.3. Представлення болометра як аперіодичної ланки першого порядку

На вхід болометра надходить тепловий потік, який описується випадковим стаціонарний процесом $q(t)$ зі спектральною щільністю $S_q(\omega)$. На виході отримуємо результат вимірювання як стаціонарний випадковий процес зі спектральною щільністю $S_y(\omega)$.

Спектральні щільності вихідного і результуючого процесів пов'язані співвідношенням:

$$S_y(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_q(\omega), \quad (3.31)$$

Обчислюючи квадрат модуля частотної характеристики, отримаємо:

$$|W(j\omega)|^2 = \left| \frac{K}{1 + j\omega\tau} \right|^2 = \left| \frac{K(1 - j\omega\tau)}{1 + \omega^2\tau^2} \right|^2 = K^2 \frac{1 + \omega^2\tau^2}{(1 + \omega^2\tau^2)^2} = \frac{K^2}{1 + \omega^2\tau^2}. \quad (3.32)$$

Після підстановки виразів (3.29) і (3.30) в (3.31), отримаємо:

$$S_y(\omega) = \frac{K^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \frac{2\sigma_q^2 \alpha}{\omega^2 + \alpha^2}. \quad (3.33)$$

Враховуючи, що дисперсія стаціонарного випадкового процесу пов'язана зі спектральною щільністю виразом:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S_y(\omega) d\omega, \quad (3.34)$$

від так запишемо:

$$\sigma_y^2 = \frac{2\sigma_q^2 \alpha K^2}{\pi} \int_0^\infty \frac{d\omega}{(1 + \omega^2 \tau^2)(\omega^2 + \alpha^2)} = \frac{2\sigma_q^2 \alpha K^2}{\pi} \frac{\pi}{2\alpha(\tau\alpha + 1)} = \sigma_q^2 \frac{K^2}{\tau\alpha + 1}. \quad (3.35)$$

Приймаючи коефіцієнт передачі $K=1$, остаточно отримаємо:

$$\sigma_y^2 = \sigma_q^2 \frac{1}{\tau\alpha + 1}. \quad (3.36)$$

Таким чином, виходячи з аналізу рішення окремої задачі щодо визначення характеристик випромінюючої поверхні полум'я над осередком пожежі у разі наявності огорожувальної поверхні слід зазначити, що результат вимірювання за допомогою болометра має меншу дисперсію, ніж щільність теплового потоку випромінюванням, яка припадає на чутливий елемент болометра. Це зменшення буде тим більш істотним, чим більшою є інерційність пристрою для вимірювання і менш корельованим є вхідний сигнал.

3.3. Рішення окремої задачі щодо визначення характеристик висхідного потоку над осередком пожежі

Спочатку розглянемо систему рівнянь руху повітряних мас над осередком пожежі. Так горіння пожежної навантаги, що займає область Ω , розташовану в площині XOY (рис. 3.5). Розігріте повітря і продукти горіння, що утворились в зоні горіння, здійснюються вертикально вгору в напрямку осі OZ , захоплюючи сусідні нерухомі маси повітря. Внаслідок чого потік розширюється, а його швидкість зменшується. Будемо вважати, що швидкість потоку на висоті $z = 0$:

$$u_z(x, y, 0, t) = \begin{cases} u_0, & (x, y) \in \Omega \\ 0, & (x, y) \notin \Omega \end{cases}, \quad (3.37)$$

де $u_0 = \text{const}$ – початкова швидкість, що залежить від типу горючої рідини.

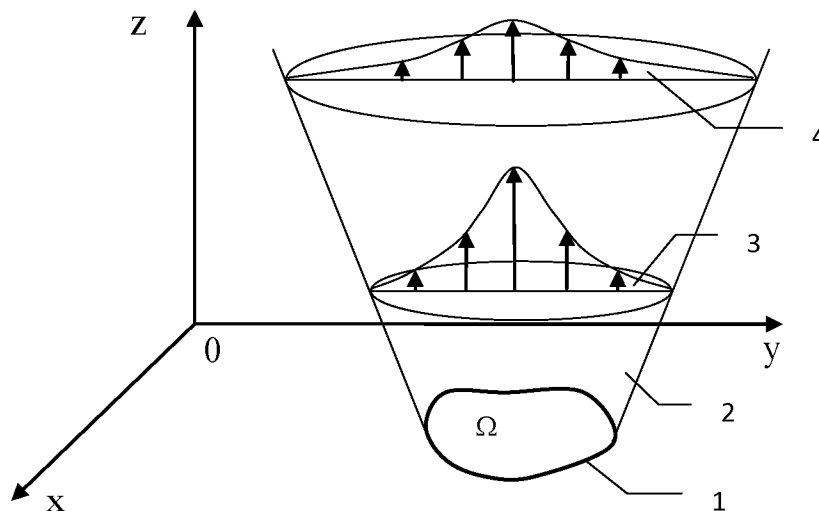


Рис. 3.4. Висхідний потік над осередком пожежі.

На рис. 3.4 використані наступні позначення: 1 – осередок пожежі; 2 – висхідний потік над осередком пожежі; 3 – розподіл швидкостей у потоці на висоті z_1 ; 4 – розподіл швидкостей у потоці на висоті $z_2 > z_1$.

Будемо розглядати повітря і продукти горіння, як Ньютонівську рідину, що не стискається. Тоді її рух може бути описаний рівнянням Нав'є-Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right), \end{cases} \quad (3.38)$$

де $u(u_x, u_y, u_z)$ – вектор швидкості руху повітря у певній точці; P – тиск; ν – кінематична в'язкість повітря, $\text{м}^2/\text{с}$. Будемо вважати, що тиск є сталим по всьому об'єму ($P = \text{const}$), а рух потоку визначається висхідною швидкістю u_z і вітром, напрямом якого співпадає з напрямом осі X .

Від так, $u_x = \text{const}$; $u_y = \text{const}$. Це дозволяє спростити систему рівнянь (3.38):

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} = \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} - u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} - u_y \frac{\partial u_z}{\partial y},$$

$$z > 0, t > 0. \quad (3.39)$$

Отримане рівняння (3.39) є нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку параболічного типу, яке разом з крайовою умовою (3.37) і початковою умовою:

$$u_z(x, y, z, 0) = 0 \quad (3.40)$$

задає розподіл швидкостей у напівпросторі $z > 0$ в довільний момент часу t .

В рівнянні (3.40) перейдемо до нових змінних:

$$\begin{cases} \xi = x - u_x t \\ \eta = y - u_y t \end{cases} \quad (3.41)$$

Будемо розглядати функцію:

$$w(\xi, \eta, z, t) = u_z(\xi + u_x t, \eta + u_y t, z, t). \quad (3.42)$$

В цьому випадку:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial u_z}{\partial x} u_x + \frac{\partial u_z}{\partial y} u_y + \frac{\partial u_z}{\partial t}; \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \xi} = \frac{\partial u_z}{\partial x}, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} = \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2}; \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \eta} = \frac{\partial u_z}{\partial y}, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} = \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2}. \quad (3.45)$$

Підставляючи (3.43)-(3.45) в (3.41), отримаємо рівняння:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = v \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - w \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.49)$$

з початковою і крайовою умовою:

$$w(\xi, \eta, z, 0) = 0, \quad (3.50)$$

$$w(\xi, \eta, 0, t) = \begin{cases} u_0, & (\xi + u_x t, \eta + u_y t) \in \Omega \\ 0, & (\xi + u_x t, \eta + u_y t) \notin \Omega. \end{cases} \quad (3.51)$$

В загальному випадку кінематична в'язкість залежить від температури.

Розподіли температури і швидкості у висхідному потоці пов'язані співвідношенням:

$$\frac{\Delta T(\xi, \eta, z, t)}{\Delta T(\xi_1, \eta_1, z_2, t)} = \sqrt{\frac{w(\xi, \eta, z, t)}{w(\xi_1, \eta_1, z_1, t)}}, \quad (3.52)$$

де

$$\Delta T(\xi, \eta, z, t) = T(\xi, \eta, z, t) - T_0, \quad (3.53)$$

T_0 – температура навколишнього середовища. Якщо в якості точки (ξ_1, η_1, z, t) обрано точку, для якої виконується умова $(\xi_1 + u_x t, \eta_1 + u_y t) \in \Omega$, то вираз (3.53) набуває вигляду:

$$\frac{\Delta T(\xi, \eta, z, t)}{T_f - T_0} = \sqrt{\frac{w(\xi, \eta, z, t)}{u_0}}, \quad (3.54)$$

де T_f – температура полум'я. Це дозволяє оцінити температуру потоку:

$$T(\xi, \eta, z, t) = T_0 + (T_f - T_0) \sqrt{\frac{w(\xi, \eta, z, t)}{u_0}}. \quad (3.55)$$

Диференціальне рівняння (3.38) містить коефіцієнт кінематичної в'язкості, який істотно залежить від температури повітряного потоку. В свою чергу температура потоку нелінійно пов'язана з його швидкістю. Така залежність унеможливилює аналітичний розв'язок диференціального рівняння.

Для розв'язання рівняння (3.38) скористаємося чисельним методом. Будемо розглядати рівняння (3.38) в області, обмеженій паралелепіпедом $\Omega = [a_x, b_x] \times [a_y, b_y] \times [0, b_z]$, доповнивши початкову і крайову умови, крайовими умовами першого роду на гранях паралелепіпеда:

$$w(a_x, \eta, z, \tau) = w(b_x, \eta, z, \tau) = 0;$$

$$w(\xi, a_y, z, \tau) = w(\xi, b_y, z, \tau) = 0;$$

$$w(x, \eta, b_z, \tau) = 0.$$

Побудуємо регулярну тривимірну сітку з кроком h в області Ω . В усіх внутрішніх вузлах сітки замінимо диференціальне рівняння рівнянням у скінчених різницях. Для цього апроксимуємо частинні похідні виразами:

$$\frac{\partial w}{\partial t} \approx \frac{w(\xi_i, \eta_j, z_k, t_{m+1}) - w(\xi_i, \eta_j, z_k, t_m)}{\Delta t},$$

де Δt – крок на вісі часу.

$$\frac{\partial w}{\partial \xi} \approx \frac{\Delta_\xi w}{h} = \frac{w(\xi_{i+1}, \eta_j, z_k, t_m) - w(\xi_i, \eta_j, z_k, t_m)}{h},$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \approx \frac{\Delta_{\xi\xi} w}{h^2} = \frac{w(\xi_{i+1}, \eta_j, z_k, t_m) + w(\xi_{i-1}, \eta_j, z_k, t_m) - 2w(\xi_i, \eta_j, z_k, t_m)}{h^2},$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial w}{\partial \eta} &\approx \frac{\Delta_{\eta} w}{h} = \frac{w(\xi_i, \eta_{j+1}, z_k, t_m) - w(\xi_i, \eta_j, z_k, t_m)}{h}, \\ \frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2} &\approx \frac{\Delta_{\eta\eta} w}{h^2} = \frac{w(\xi_i, \eta_{j+1}, z_k, t_m) + w(\xi_i, \eta_{j-1}, z_k, t_m) - 2w(\xi_i, \eta_j, z_k, t_m)}{h^2}, \\ \frac{\partial w}{\partial z} &\approx \frac{\Delta_z w}{h} = \frac{w(\xi_i, \eta_j, z_{k+1}, t_m) - w(\xi_i, \eta_j, z_k, t_m)}{h}, \\ \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} &\approx \frac{\Delta_{zz} w}{h^2} = \frac{w(\xi_i, \eta_j, z_{k+1}, t_m) + w(\xi_i, \eta_j, z_{k-1}, t_m) - 2w(\xi_i, \eta_j, z_k, t_m)}{h^2}.\end{aligned}$$

Тоді рівняння у скінчених різницях набуде вигляду:

$$\frac{\Delta_{\tau} w}{\Delta \tau} = v \left(\frac{\Delta_{\xi\xi} w}{h^2} + \frac{\Delta_{\eta\eta} w}{h^2} + \frac{\Delta_{zz} w}{h^2} \right) - w \frac{\Delta_z w}{h}, \quad (3.56)$$

Із (3.56) випливає, що приріст (за часом) швидкості w у внутрішній точці (x_i, y_j, z_k) області описується виразом:

$$\Delta_t w = v \frac{\Delta t}{h^2} (\Delta_{\xi\xi} w + \Delta_{\eta\eta} w + \Delta_{zz} w) - w \frac{\Delta t}{h} \Delta_z w, \quad (3.57)$$

що дозволяє обчислити швидкості потоку в точках сітки в наступний момент часу:

$$w(\xi_i, \eta_j, z_k, t + \Delta t) = w(\xi_i, \eta_j, z_k, t) + \Delta_t w. \quad (3.58)$$

Таким чином, формули отримані вирази для рівняння у скінчених різницях дозволяють знайти значення швидкості потоку у вузлах сітки у

довільний момент часу τ . Відзначимо, що в будь-якій скінченій області простору існує стаціонарний розв'язок рівняння. Ітераційний процес збігається до цього розв'язку.

3.4. Рішення окремої задачі щодо визначення коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння

Конвекційна складова теплового потоку від пожежі розливу горючої рідини має вигляд:

$$q_{\text{conv}} = \alpha(T - T_w), \quad (3.59)$$

де α – коефіцієнт конвекційного теплообміну; T – температура повітряних мас; T_w – температура поверхні, що нагрівається.

Коефіцієнт конвекційного теплообміну α визначається співвідношенням:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda}, \quad (3.60)$$

де Nu – число Нуссельта; D – умовний діаметр осередку горіння біля огорожувальної поверхні; λ – коефіцієнт теплопровідності повітряного середовища. Усереднене за периметром окружності осередку горіння значення числа Нуссельта описується залежністю:

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 Re^{0.5} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{2.82 \cdot 10^5}\right)^{5/8}\right]^{4/5}, \quad (3.61)$$

де Re – число Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_f D}{\nu}; \quad (3.61)$$

Pr – число Прандтля; w_f – швидкість повітряного потоку:

$$w_f = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + w^2}. \quad (3.62)$$

Тоді середнє за периметром значення коефіцієнту конвекційної тепловіддачі набуде вигляду:

$$\alpha = \frac{\lambda}{D} \left[0.3 + \frac{0.62 Re^{0,5} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr} \right)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{2.82 \cdot 10^5} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \right]. \quad (3.63)$$

В [134] показано, що в діапазоні температур $T = (273 \div 1273)$ К залежність (3.63) може бути апроксимована виразом

$$\alpha = 198 T^{-0.7655} w_f^{0.9227} D^{-0.0773}. \quad (3.64)$$

З урахуванням співвідношень (3.58) і (3.62), вираз (3.64) набуває вигляду

$$\alpha = 198 (T_0 + (T_f - T_0) w^{0,5} u_0^{-0,5})^{-0,7655} (u_x^2 + u_y^2 + w^2)^{0,4614} D^{-0,0773}. \quad (3.65)$$

Таким чином, коефіцієнт конвекційного теплообміну дозволяє оцінити конвекційну складову теплового потоку від пожежі. Аналіз свідчить, що в

залежності від відстані огорожувальної поверхні до осередку пожежі величина густини теплового потоку складає $(0,5 \div 2,5)$ кВт/м².

3.5 Опис математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі

Враховуючи отримані рішення окремих задач, а саме рішення окремої задачі щодо визначення впливу термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви рівняння, залежність довжини факела L і кута нахилу α (відхилення від вертикальної осі) від швидкості повітряного обміну має вигляд (3.5) та (3.6) відповідно:

$$L = bD \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^n (w^*)^{-0,21};$$

$$\cos \alpha = (w^*)^{-0,5},$$

З рішення другої окремої задачі, щодо визначення характеристик випромінюючої поверхні полум'я над осередком пожежі у разі наявності огорожувальної поверхні, отримаємо вираз для випромінюючої поверхні полум'я за умови відсутності повітряного переносу у вигляді (3.18):

$$L(u, v) = \min_{(x, y) \in \partial\Omega} (b_{0,175^n} r^{1-n/2} (x, y) \eta^n + h(x, y)),$$

Доповнюючи ці залежності виразами розподілу температури і швидкості у висхідному потоці (3.52) та (3.54) отриманими в ході рішення окремої задачі щодо визначення характеристик висхідного потоку над осередком пожежі:

$$\frac{\Delta T(\xi, \eta, z, t)}{\Delta T(\xi_1, \eta_1, z_2, t)} = \sqrt{\frac{w(\xi, \eta, z, t)}{w(\xi_1, \eta_1, z_1, t)}},$$

$$\frac{\Delta T(\xi, \eta, z, t)}{T_f - T_0} = \sqrt{\frac{w(\xi, \eta, z, t)}{u_0}},$$

Та виразом (3.65) для визначення коефіцієнту конвекційної тепловіддачі, як рішення четвертої окремої задачі щодо визначення коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння:

$$\alpha = 198(T_0 + (T_f - T_0)w^{0,5}u_0^{-0,5})^{-0,7655}(u_x^2 + u_y^2 + w^2)^{0,4614}D^{-0,0773}.$$

Отримаємо систему рівнянь (3.66), яка і є шуканою математичною моделлю підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі:

$$\left\{ \begin{array}{l} L = bD \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^n (w^*)^{-0,21}; \\ \cos \alpha = (w^*)^{-0,5}, \\ L(u, v) = \min_{(x, y) \in \partial \Omega} (b0,175^n r^{1-n/2}(x, y) \eta^n + h(x, y)), \\ \\ \frac{\Delta T(\xi, \eta, z, t)}{\Delta T(\xi_1, \eta_1, z_2, t)} = \sqrt{\frac{w(\xi, \eta, z, t)}{w(\xi_1, \eta_1, z_1, t)}}, \\ \\ \frac{\Delta T(\xi, \eta, z, t)}{T_f - T_0} = \sqrt{\frac{w(\xi, \eta, z, t)}{u_0}}, \\ \\ \alpha = 198(T_0 + (T_f - T_0)w^{0,5}u_0^{-0,5})^{-0,7655}(u_x^2 + u_y^2 + w^2)^{0,4614}D^{-0,0773}. \end{array} \right. \quad (3.66)$$

Таким чином, математична модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі складається з шести аналітичних залежностей. Перша та друга залежності визначають вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви. Третя описує вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару у разі наявності огорожувальної поверхні. Четверта та п'ята залежність дозволяють врахувати вплив на процеси формування кіптяви градієнтів температури та швидкості повітря у висхідному потоці над осередком пожежі. Шоста залежність враховує вплив величини коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння на формування шару кіптяви.

Висновки за третім розділом

1. Рішення окремої задачі щодо визначення впливу термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви дозволяє стверджувати, що довжина факела над осередком пожежі збільшується із зростанням величини питомої масової швидкості вигорання і середнього діаметра осередку пожежі.

2. Виходячи з аналізу рішення окремої задачі щодо визначення характеристик випромінюючої поверхні полум'я над осередком пожежі у разі наявності огорожувальної поверхні слід зазначити, що результат вимірювання за допомогою болометра має меншу дисперсію, ніж щільність теплового потоку випромінюванням, яка припадає на чутливий елемент болометра. Це зменшення буде тим більш істотним, чим більшою є інерційність пристрою для вимірювання і менш корельованим є вхідний сигнал.

3. Формули отримані вирази для рівняння у скінчених різницях дозволяють знайти значення швидкості потоку у вузлах сітки у довільний момент часу τ . Відзначимо, що в будь-якій скінченій області простору існує стаціонарний розв'язок рівняння. Ітераційний процес збігається до цього розв'язку.

4. Коефіцієнт конвекційного теплообміну дозволяє оцінити конвекційну складову теплового потоку від пожежі. Аналіз свідчить, що в залежності від відстані огорожувальної поверхні до осередку пожежі величина густини теплового потоку складає $(0,5 \div 2,5)$ кВт/м².

5. Математична модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі складається з шести аналітичних залежностей. Перша та друга залежності визначають вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви. Третя описує вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви у разі наявності огорожувальної поверхні. Четверта та п'ята залежність дозволяють врахувати вплив на процеси формування кіптяви градієнтів температури та швидкості повітря у висхідному потоці над осередком пожежі. Шоста залежність враховує вплив величини коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння на формування шару кіптяви.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИКА ВИЯВЛЕННЯ ОСЕРЕДКОВИХ ОЗНАК НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Четверте завдання наукового дослідження з розробки методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури будемо виконувати наступним чином. Насамперед розробимо алгоритм застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури. Потім розглянемо процедури застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури.

4.1. Розробка алгоритму методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури

Вимірювання електроопору шару кіптяви проводять на будь-яких поверхнях матеріалів, що мають діелектричні властивості (бетон, штукатурка, керамічна плитка і т.п.), бажано - на поверхнях одного типу. Якщо на поверхнях з осілою кіптявою до пожежі був якийсь бруд, то під шаром кіптяви він виділяється у вигляді нерівності на поверхні. Вимірювання електроопору на таких поверхнях проводити не слід.

Визначати місця точок виміру можна за допомогою рулетки, металевої лінійки довжиною 0,5-1,0 м, мірної вішки або лазерного далекоміра.

У приміщеннях великих розмірів з високими стелями для розмітки точок на стелі можна використовувати мірну вішку - спеціальний геодезичний інструмент для вимірювання висоти об'єктів. Для її використання, слід розмітити точки на підлозі, встановити вішку в точку на підлозі і розсунути так, щоб вона торкалася стелі. Крапка, в якій вішка торкнеться стелі, - це точка для вимірювання.

Найбільш доцільно використовувати для розмітки точок вимірювання електроопору лазерний далекомір - легкий і компактний прилад розміром не більше $190 \times 70 \times 50$ мм, масою не більше 450 г, призначений для вимірювання відстаней, площ, кутів нахилу та інших геометричних розмірів.

Максимальна помилка під час вимірювання відстаней становить ± 5 мм. Щоб використовувати лазерний далекомір, необхідно розмітити точки вимірювань на плані місця пожежі, визначити відстані між ними, знайти базову точку, відміряти відстань від базової точки до точки вимірювання, відзначити точку вимірювання опору лазерним променем.

У кожній точці необхідно робити не менше п'яти вимірювань, зміщуючи контактний щуп на 2-3 мм. Якщо виміряні в двох сусідніх точках значення опору значно відрізняються один від одного, слід намітити додаткову точку (або 2-3 точки), в якій необхідно провести вимірювання.

Отримані результати вимірювання електричного опору, а також середнє значення результатів вимірювань однієї точки R_{cp} і його логарифм $\lg(R_{cp})$ у подальшому застосовуються у шуканому алгоритмі.

Відповідно результатом відпрацювання блоку з дослідження пожежі алгоритму методики, що розробляється (рис. 4.1), є формування відповідних управлінських рішень, які формуються відповідним блоком методики.

Це рішення спирається на наступні елементи дослідження:

По-перше, досліджуються *ознаки осередку пожежі на місці її виникнення*, а саме:



Рис. 4.1. Алгоритм методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації

- *локальні термічні ураження в самому вогнищі.* Вони утворюються безпосередньо на конструкції, на яку впливає джерело займання або яка контактує з зоною горіння.

Прикладом першої ситуації може бути локальне обвуглювання стіни, підлоги, поверхні столів в зоні термічного впливу електронагрівального приладу. Прикладом другого може служити пропалювання підлоги під сміттєвим відром, палаючими паперами, купою тліючої тирси, ганчір'ям та ін. Термічний вплив такого роду виникає в матеріалі, що піддається нагріванню, в основному за рахунок теплопередачі. Це проявляються в локальному вигоранні органічних матеріалів (деревина, тканини, лінолеум, лакофарбові покриття та ін.), рідше - розтріскування кам'яних неорганічних матеріалів, відшаровування штукатурки, деформаціях.

- *локальні термічні ураження над осередком пожежі. Осередковий конус.* Утворюються на початковій стадії пожежі у вигляді сліду конвективного потоку, що підіймається від початкової локальної зони горіння (тобто осередку пожежі). Конструкції, об'єкти та їх частини, що потрапляють в зону теплового впливу конвективного потоку, нагріваються і отримують локальні термічні пошкодження (вигорання будівельних матеріалів і конструкцій, відкладання кіптяви, деформація, відшарування штукатурки, розтріскування бетону).

У спокійній атмосфері конвективний потік спрямований вгору, а локальні термічні ураження утворюються над осередком пожежі, з боку огорожувальних конструкцій (стіл). Над осередком пожежі, на стелі, ці термічні ураження ідеально мають форму кола, а з боків (на стінах) мають форму конуса, вершина якого звернена вниз.

У реальних ситуаціях сліди конвективного потоку можуть мати форму конуса з вершиною в точці згоряння, форму «перекинутого конуса» або будь-яку іншу форму, що відповідає конфігурації конвективного потоку.

Конвективний потік і, відповідно, осередковий конус, відхиляється в сторону тяги в приміщенні. Зазвичай осередковий конус добре виражений у високих приміщеннях і гірше в низьких.

При відсутності видимих ознак сліди вогнищ можна виявити інструментальним дослідженням кіптяви, ультразвуковим дослідженням бетонних і залізобетонних стін, іншими методами.

По-друге, досліджуються *ознаки напрямку поширення горіння*, які виникають уздовж шляхів поширення вогню від осередку пожежі та можуть розташовуватися на значній відстані, іноді в межах всієї зони пожежі. Відповідно досліджуються:

- *послідовно згасаючі (наростаючі) вогнища ураження*. При віддаленні від осередку пожежі термічне пошкодження (руйнування) матеріалів і конструкцій, як правило, зменшується. У цьому випадку, крім усього іншого, проявляється фактор часу. Чим далі від вогнища, тим коротше горіння, тим нижче ступінь термічного пошкодження конструкцій і матеріалів. Ці ознаку можна виявити візуально. Наприклад, своєрідний макроконус утворюється вигорянням дерев'яних перегородок, стоек та інших елементів на різній висоті.

Ослаблення ураження можуть проявлятися і іншими ознаками - послідовним зменшенням глибини обуглювання дерев'яних конструкцій, зменшенням деформації металевих елементів.

- *хаотично розташовані знаки напрямку поширення горіння*. Вони утворюються на окремих конструктивних елементах будівель і споруд і виражаються в односторонньому вигоранні або руйнуванні конструкцій і предметів з боку, спрямованого до вогнища вогню. Конвективні потоки і променисті теплові потоки сильніше прогрівають ділянки конструкцій, звернених до вогнища, і з цього боку конструкції руйнуються сильніше, ніж з протилежного.

- *розвиток вертикального горіння*. Основним механізмом, що визначає розвиток вертикального горіння, є конвекція, яка несе тепло вгору і

тим самим сприяє розвитку горіння в цьому напрямку. З огляду на цю обставину, в разі вертикального поширення горіння осередок пожежі найбільш імовірно може знаходитися в найнижчій зоні зі слідами горіння.

Як і в будь-якому правилі, тут є винятки. Палаючі предмети можуть падати зверху вниз, створюючи таким чином вторинні пожежі.

- *у разі коли осередкові ознаки пожежі не сформувалися, а це можливо при швидкому розвитку горіння через хороші умови повітрообміну, потужного джерела займання або використання ініціатора горіння, архітектурні особливості будівлі (наявність пустот та інших факторів), пожежонебезпечні властивості внутрішнього оздоблення, які сприяють швидкому розвитку горіння.*

Таким чином, алгоритм методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури складається із шести блоків виконання яких забезпечує проведення ефективної процедури дослідження пожежі на об'єкті критичної інфраструктури з використанням сучасних апаратних засобів.

4.2. Розробка процедур застосування алгоритму методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури

4.2.1. Опис за використання апаратного блоку. Вимірювання електроопору шару кіптяви проводять на будь-яких поверхнях матеріалів, що мають діелектричні властивості (бетон, штукатурка, керамічна плитка і т.п.), бажано - на поверхнях одного типу.

Якщо на поверхнях з осілою кіптявою до пожежі був якийсь бруд, то під шаром кіптяви він виділяється у вигляді нерівності на поверхні. Вимірювання електроопору на таких поверхнях проводити не слід.

Визначати місця точок виміру можна за допомогою рулетки, металевої лінійки довжиною 0,5-1,0 м, мірної вішки або лазерного далекоміра рис. 4.2.

Розмітку точок для невеликих приміщень - до 20 м² при висоті стелі 2,2-2,7 м можна здійснювати за допомогою рулетки або металевої лінійки.

У приміщеннях великих розмірів з високими стелями для розмітки точок на стелі можна використовувати мірну вішку - спеціальний геодезичний інструмент для вимірювання висоти об'єктів, що нагадує телескопічну вудку. Щоб її використовувати, слід розмітити точки на підлозі, встановити вішку в точку на підлозі і розсунути так, щоб вона торкалася стелі. Крапка, в якій вішка торкнеться стелі, - це точка для вимірювання.



Рис. 4.2 Дослідження кіптяви датчиком для горизонтальних поверхонь з нанесеною на стіну лазерною розміткою.

Найбільш доцільно використовувати для розмітки точок вимірювання електроопору лазерний далекомір - легкий і компактний прилад розміром не більше 190×70×50 мм, масою не більше 450 г, призначений для вимірювання відстаней, площ, кутів нахилу та інших геометричних розмірів.

Максимальна помилка під час вимірювання відстаней становить ± 5 мм. Щоб використовувати лазерний далекомір, необхідно розмітити точки вимірювань на плані місця пожежі, визначити відстані між ними, знайти базову точку, відміряти відстань від базової точки до точки вимірювання, відзначити точку вимірювання опору лазерним променем.

У кожній точці необхідно робити не менше п'яти вимірювань, зміщуючи контактний щуп на 2-3 мм. Якщо виміряні в двох сусідніх точках значення опору значно відрізняються один від одного, слід намітити додаткову точку (або 2-3 точки), в якій необхідно провести вимірювання.

Датчик для вимірювання електроопору необхідно притискати до контакту зовнішнього кільця з поверхнею. Після кожного вимірювання контакти та майданчик слід очищати від кіптяви марлевым тампоном, змоченим етиловим спиртом.

Отримані результати вимірювання електричного опору, а також середнє значення результатів вимірювань однієї точки R_{cp} і його логарифм $lg(R_{cp})$ заносять в цифрову базу для подальшої статистичної обробки.

Відповідно під час проведення вимірювань електроопору шару кіптяви, які проводять на будь-яких поверхнях матеріалів, що мають діелектричні властивості слід використовувати сучасні прилади для формування необхідної бази статистичної інформації, щодо стану приміщень об'єкту критичної інфраструктури після надзвичайної ситуації внаслідок пожежі.

4.2.2. Опис процедури статистичної обробки результатів вимірів отриманих з використанням апаратного блоку. При необхідності результати вимірювань можуть бути оброблені відповідно з розрахунком середнього значення вимірювань електроопору R_{cp} , середньоквадратичного відхилення, коефіцієнта варіації, верхньої та нижньої меж довірчого інтервалу для середнього значення, верхньої та нижньої меж довірчого інтервалу для середньоквадратичного. Середнє значення вимірювань електроопору для однієї точки.

$$R_{CP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (4.1)$$

n – кількість вимірювань; r_i ($i = 1, 2, \dots, n$) - показання електричного опору.

Оцінка дисперсії результатів вимірів проводиться за формулою:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - R_{cp})^2 \quad (4.2)$$

Середньоквадратичне відхилення визначається за такою формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - R_{cp})^2} \quad (4.3)$$

Коефіцієнт варіації визначається за формулою:

$$\vartheta = \frac{\sigma}{R_{cp}} * 100\% \quad (4.4)$$

Довірчі інтервали для математичного очікування та середньоквадратичного відхилення розраховуються для довірчої ймовірності $\beta = 0,99$ ($\alpha = 1 - \beta = 0,01$).

Довірчий інтервал для середнього значення електроопору:

$$R_m - \gamma \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < R_m < R_m + \gamma \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

де γ - значення коефіцієнта Стюдента для відомих значень n та α

Довірчий інтервал для середньоквадратичного відхилення визначається за формулою:

$$\gamma_1 \sigma < \sigma < \gamma_2 \sigma \quad (4.6)$$

де γ_1 і γ_2 - табличні значення для χ^2 - розподілу, що визначаються для відомих n та β .

Результати статистичної обробки даних з розрахунком середнього значення вимірювань електроопору R_{cp} , середньоквадратичного відхилення, коефіцієнта варіації, верхньої та нижньої меж довірчого інтервалу для середнього значення, верхньої та нижньої меж довірчого інтервалу для

середньоквадратичного відхилення вносять в таблицю, обчислюють, після чого в таблицю заносять значення логарифму $\lg(R_{cp})$ (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Десятичні логарифми електричного опору кіптяви $\lg(R \cdot 10^{-6})$ для приміщення

№ ряду по вертикалі	№ ряду по горизонталі			
	1	2	3	4
1	2,78	2,28	2,27	2,62
2	2,76	2,26	2,70	2,64
3	2,68	2,18	2,68	2,05
4	2,03	2,06	2,68	2,17
5	2,0	1,99		
6	2,03	2,0		

Побудова карти (плану) зон розподілу значень десяткових логарифмів середнього значення електроопору (так званих «ізорезистивних» зон) кіптяви можна робити:

- вручну;
- за допомогою комп'ютерних програм, призначених для побудови графічного представлення даних.

Карту ізорезистивних зон доцільно будувати для єдиного обсягу, виділеного конструкціями, що захищають, - окремого приміщення або групи приміщень, які до моменту початку пожежі не були розділені між собою.

Робота здійснюється у такому порядку.

Розраховується кількість інтервалів між ізолініями за формулою

$$J = \frac{\lg(R'_{\max}) - \lg(R'_{\min})}{s} \quad (4.7)$$

де $\lg(R'_{\max})$ і $\lg(R'_{\min})$ - округлені з точністю до значення "s" значення $R_{\max}$ і $R_{\min}$.

Значення $\lg(R_{cp})$ кожного окремого приміщення заносять у таблицю комп'ютерної програми Microsoft Excel, у своїй номер ряду по вертикалі відповідає номеру стовпця таблиці, а номер ряду по горизонталі - номеру рядка у таблиці.

Комірки таблиці, відповідні точкам, у яких виміри не проводилися, залишаються порожніми. Програма Microsoft Excel не дозволяє будувати графіки у випадку, якщо не всі осередки заповнені значеннями (а така ситуація виникає, якщо вимірювання електроопору проводилися не по всій площі виміру або приміщення має неправильну (непрямокутну) форму). Тому для порожніх осередків необхідно задати значення десяткового логарифму:

$$\lg(R) = \lg(R'_{\max}) + s/2. \quad (4.8)$$

При розміщенні порожніх осередків у нижньому правому куті комп'ютерна програма Microsoft Excel може будувати карту зон без спотворень, тому значення десяткового логарифму для порожніх осередків задавати немає необхідності.

Для графічного представлення введених даних (побудови ізорезистивних зон) у комп'ютерній програмі Microsoft Excel вибирається команда «Майстер діаграм», тип діаграми – «Поверхня», вид – «Контурна діаграма».

Побудована таким чином «контурна діаграма» є картиною розподілу значень електроопору кіптяви для окремої поверхні (стелі, стіни). Якщо контурна діаграма будувалася з урахуванням порожніх осередків, то у примітці до неї має бути зазначено, що в інтервалі $\lg(R'_{\max}) \div \lg(R'_{\max}) +$ виміри не проводилися (даних немає).

Істотним недоліком програми Microsoft Excel є необхідність проводити вимірювання в точках, розташованих на тому самому відстані по вертикалі і горизонталі, причому всередині зони вимірювання не повинно бути точок, в яких самі вимірювання неможливо було зробити, що на місці пожежі вдасться далеко не завжди (закопчена поверхня може бути не прямокутною, окремі

точки можуть бути недоступні для вимірювань або кіптява в них може бути відсутня).

Відповідно процедуру статистичної обробки результатів вимірів необхідно проводити у точках, розташованих по вертикалі і горизонталі, причому всередині зони вимірювання не повинно бути точок, в яких самі вимірювання неможливо було зробити, що на місці пожежі вдається далеко не завжди, оскільки закопчена поверхня може бути не прямокутною, окремі точки можуть бути недоступні для вимірювань або кіптява в них може бути відсутня.

4.2.3. Опис процедури з використання отриманої інформації під час реконструкції пожежі за рахунок використання апаратного блоку. Дані з електроопору шару кіптяви в різних зонах пожежі можуть бути об'єктивною основою для диференціації зон нагріву закопчених конструкцій та предметів. При інтерпретації (трактування) цих даних необхідно мати на увазі наступне.

Зони максимального прогріву конструкцій характеризуються найменшими значеннями опору шару кіптяви електричного струму. Такі зони виникають насамперед над осередком пожежі, якщо кіптява не вигоріла, а також на шляхах поширення основних конвективних потоків від вогнища. В окремих випадках так само проявляють себе осередки горіння, зумовлені зосередженням пожежного навантаження.

При досить високій температурі (більше 600-650°C) на конструкціях і предметах, що огорожують вогнище пожежі, осередкова зона може проявлятися також у повному локальному вигоранні кіптяви. В цьому випадку шляхом дослідження відкладень кіптяви поза зоною вигорання виявляються напрямки конвективних потоків з цього вогнища.

Зони проходження основних конвективних потоків продуктів горіння характеризуються поступовим збільшенням електроопору кіптяви від вогнища горіння у напрямку витяжних отворів. Електричний опір шару кіптяви на периферійних ділянках поза цими зонами істотно вище і може відрізнятися на один-два порядку (іноді і більше). Наприклад, електроопір кіптяви може бути

103 ÷ 104 Ом над осередковою зоною та на основних трасах просування потоку диму з вогнища та 106 ÷ 108 Ом - на периферійних ділянках.

Величина електроопору кіптяви пов'язана з режимом горіння в тій чи іншій зоні. Якщо ця величина, заміряна безпосередньо над досліджуваною зоною, перевищує 1010 ÷ 1011 Ом, значить інтенсивного полум'яного горіння на даній ділянці не було, а горіння протікало у формі тління.

Тривале тління пожежного навантаження в умовах недостатнього повітрообміну може призводити до утворення на стелі та у верхній частині стін товстого шару жирної кіптяви, іноді з явними краплями рідкої фази або краплеподібними плямами. В приміщеннях об'єктів критичної інфраструктури це може спостерігатися у невеликих приміщеннях, коморах та інших не вентилюваних обсягах. Якщо горіння переходить з таких приміщень у більш просторі, з кращим повітрообміном, і виникає полум'яне горіння, то картина електроопору кіптяви, що формується, буде відображати в основному розвиток полум'яного горіння.

Осередок пожежі у разі проявиться у вигляді вигорання кіптяви чи екстремально низьких значеннях її електроопору, а навпаки, у досить товстому шарі кіптяви з великим вмістом екстрактивних речовин.

Отримані результати дослідження кіптяви можуть бути використані в рамках пожежно-технічної експертизи для реконструкції процесу виникнення та розвитку горіння, у тому числі встановлення вогнища пожежі.

Враховуючи, що запропонований підхід - неруйнівний, немає жодних обмежень щодо його застосування під час огляду місця пожежі дізнавачами та технічними фахівцями на стадії перевірки за фактом пожежі. Остаточні висновки про осередок пожежі можуть бути сформовані лише в рамках пожежно-технічної експертизи на основі всього комплексу інформації, що є за пожежею. Крім даних з електроопору кіптяви це можуть бути: результати візуального огляду місця пожежі; результати застосування інших інструментальних методів (основних та допоміжних); непрямі ознаки вогнища

пожежі; свідчення свідків, а також інші фактори та джерела інформації, розглянуті у спеціальній літературі.

Відповідно трактування результатів вимірювання електроопору обов'язково має супроводжувати аналіз особливостей об'ємно-планувальних рішень будівлі (приміщення) об'єкту критичної інфраструктури, умов повітрообміну, розподілу пожежного навантаження тощо.

Таким чином, методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, реалізую розроблену математичну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі, спирається на алгоритм її застосування реалізація якого передбачає послідовне застосування наступних процедур: процедури проведення вимірювань, процедури статистичної обробки результатів вимірів, процедури реконструкції пожежі.

Висновок за четвертим розділом

1. Алгоритм методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури складається із шести блоків виконання яких забезпечує проведення ефективної процедури дослідження пожежі на об'єкті критичної інфраструктури з використанням сучасних апаратних засобів.

2. Методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, реалізую розроблену математичну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі, спирається на алгоритм її застосування реалізація якого передбачає послідовне застосування наступних

процедур: процедури проведення вимірювань, процедури статистичної обробки результатів вимірів, процедури реконструкції пожежі.

РОЗДІЛ 5

ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ

П'яте завдання наукового дослідження з перевірки достовірності розробленої моделі та методики будемо виконувати наступним чином. Спочатку проведемо заходи з планування експерименту щодо перевірки достовірності. Далі надамо опис лабораторної установки для проведення вимірювань електричного опору кіптяви. Розглянемо алгоритм проведення вимірювань за використання лабораторної установки, алгоритм статистичної обробки результатів вимірів отриманих з використанням лабораторної установки та алгоритм використання отриманої інформації під час реконструкції пожежі. Після чого проаналізуємо результати експериментів отримані за допомоги розробленої математичної моделі та відповідної методики та зробимо висновок про їх достовірність.

5.1 Планування проведення експерименту щодо перевірки достовірності

Опис місця пожежі здійснюється відповідно до загального плану. У протоколі огляду доцільно виділити окремим розділом опис закопчень на конструкціях. Слід зазначити порівняльну ступінь диму (що означає, суб'єктивне відчуття кольору), напрямок його посилення, особливу увагу, звертаючи увагу на місця, які мають аномально високі або, навпаки, низьку інтенсивність дим по відношенню до загальної площі. Потрібно вказувати точні координати таких зон. Додатково до протоколу огляду поряд із схемою місця

пожежі слід оформити схему закопчень із зазначенням місць відбору проб кіптяви.

Найбільш доцільне використання фотографії. При фотографуванні великих площ, використовуючи панорамну зйомку. У цьому випадку вони повинні бути забезпечені «перекриття» кадрами 10-20%, однакова експозиція, видно фотографований сайт рестрикції шляхом маркування загальної площі. Перспективним методом фіксування візуальної інформації є цифрова фото- та відеозйомка, яка дозволяє отримувати високу якість зображення та проводити його обробку на комп'ютері. Вибір зон дослідження здійснюється за результатами візуального огляду. На початковому етапі повинні бути окреслені зони, в яких шар кіптяви відсутній або порушений. Необхідно встановити причини утворення цих зон, що може бути пов'язане з локальним вигоранням кіптяви від впливу температури інтенсивного вогнища горіння або з впливом води при гасінні. Після цього виділяють зону безпосередньої теплової дії пожежі та розбивають її на ділянки горіння та задимлення (де конструкції закопчені, але власне горіння не було) з урахуванням інформації про розташування пожежного навантаження, розвиток пожежі та перебіг гасіння.

Далі проводиться дослідження властивостей кіптяви на цих ділянках. зони локального вигорання кіптяви - важлива ознака, що вказує на можливе вогнище пожежі або окремі вогнища горіння. При цьому необхідно мати на увазі, що локальна відсутність кіптяви може мати місце з причин:

- змивання кіптяви у процесі гасіння водою;
- екранування конструкцій під час пожежі будь-якими предметами.

Зони змиву кіптяви зазвичай мають смугоподібну форму і виникають навпроти прорізів (вікон, дверей та ін.), звідки з пожежних стволів під тиском подавалася вода на гасіння.

Зони відсутності кіптяви з різким переходом до закопчення можуть мати різні геометричні форми на момент огляду будь-яких предметів або речей, які в момент пожежі знаходилися в цих зонах.

На відміну від зазначених вище, зони вигорання кіптяви зазвичай мають округлі або овальні форми з поступовим переходом від поверхні без кіптяви до поверхні із закопченням.

Якщо причини утворення зон відсутності кіптяви під час огляду визначити неможливо, це можна зробити при реконструкції місця пожежі.

На схему місця пожежі (рис. 5.1) наносяться зони відсутності кіптяви. При складанні протоколу огляду та схем місця пожежі повинні бути зафіксовані всі зазначені зони локальної відсутності кіптяви незалежно від їх передбачуваної природи, однак при словесному описі повинні бути відображені зазначені вище деталі, що дозволяють цю природу прояснити (геометрична форма, характер закопчення та ін.).

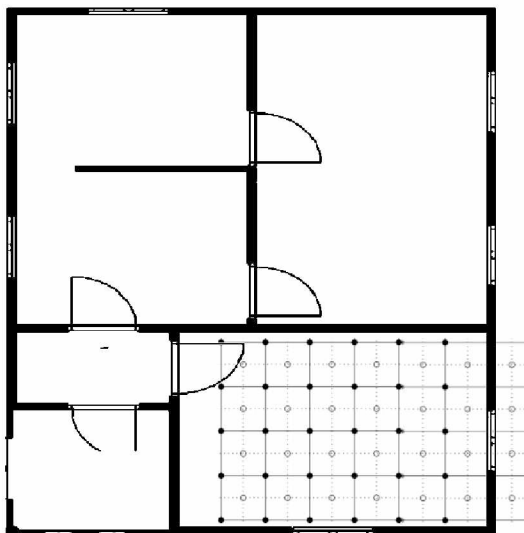


Рис. 5.1 Схема приміщення з нанесеною сіткою для вимірювання (точки вимірювання електричного опору кіптяви).

Відповідно до існуючих методів, ідентифікація джерела вогню здійснюється на основі осередкових ознак і ознак напрямку поширення горіння, показали візуальні та інструментальні методи. Однією з осередкових ознак є, зокрема, місцеве вигорання кіптяви над вогнищем. Проте, досить часто, особливо при пожежах в приміщеннях великих обсягів з відносно низькі пожежної навантаження або не схильна до інтенсивного горіння, з утрудненим повітрообміном і т.д. ситуації), температура на стелі над вогнищем не досягає температури, необхідної, щоб випалити кіптяву по всьому приміщенню

рівномірно. Візуально, в цій ситуації, фокус не встановлено, але дослідження кіптяви на вогнищі легко виявити.

Це може бути дуже корисно використовувати результати аналізу кіптяви у визначенні шляхів поширення горіння з вогнища. Відомо, що, в першу чергу, конвективні потоки визначають напрямок розвитку горіння під час пожежі, особливо на початковій стадії. Конвективні потоки несуть тверді частинки з ними, але останні осідають не тільки по ходу конвективного потоку, але і розсіяний, осідають на оточуючих, більш холодних структури і об'єктах, в результаті якого візуальні ознаки конвективного потоку «шлях» вирівнюються і можуть зовсім зникнути. Аналіз кіптяви дозволяє виявити ці «сліди». Безсумнівно, великомасштабне дослідження зразків кіптяви по всій зоні горіння розкриває картину просторового розподілу конвективних потоків від первинних і вторинних вогнищ, які вкрай цікаві для фахівця.

Аналіз кіптяви на вогнетривких конструкціях може успішно поєднуватися з дослідженнями відомими інструментальними способами самих матеріалів, у тому числі конструкції виготовлені (матеріалів з урахуванням цементу, вапна, гіпсу, сталей та інших.), т.к. дозволяє перекрити «низькотемпературну» зону, в якій зазначені методи є малоефективними. Так, наприклад, дослідження проб кіптяви, відібраних зі сталевих конструкцій, дозволяє досліджувати температурні зони до 600-650 °C. Вище цих температур кіптява вигоряє, але саме з 650-700 °C на поверхні сталі починає утворюватися шар високотемпературного оксиду - окалини, дослідження якого дозволяє визначати температуру та тривалість теплового впливу в даній високотемпературній зоні.

Дані, що отримуються за допомогою аналізу кіптяви, можуть бути використані для вирішення деяких приватних питань, що виникають при реконструкції пожежі. Так, наприклад, відомості про спрямованість основних конвективних потоків дозволяють визначити, були зачинені (або відкриті) при пожежі двері, вікна, інші отвори, а якщо відкриті, то до пожежі або на якійсь стадії пожежі це сталося.

Істотною експертною проблемою представляє при експертизі пожеж дослідження розбитого скла - чи були вони розбиті до пожежі (і мало місце проникнення або закидання джерела запалювання), зруйновані в ході пожежі механічно або луснули за рахунок перегріву. Є підстави вважати, що виявлення наявності кіптяви на уламках скла та аналіз цієї кіптяви (визначення температури її вторинного прогріву) дадуть інформацію, що дозволяє вирішити це питання.

При встановленні причини пожежі можуть бути використані дані про температурний режим та характер горіння (тління, полум'яне горіння різної інтенсивності) в осередковій зоні, що встановлюються шляхом дослідження кіптяви. Відомо, що з джерел запалювання різної потужності характер виникнення та розвитку горіння на початковій стадії може бути різний. Наприклад, в разі пожежі від тліючого тютюнового виробу і інших джерел малої потужності період запалювання зазвичай передує розпаду, іноді досить довго. При підпалах із застосуванням інтенсифікаторів горіння температурний режим у зоні горіння вищий за звичайний. Аналіз кіптяви дозволяє охарактеризувати режим горіння у вогнищі та, таким чином, отримати інформацію, що сприяє встановленню причини пожежі.

Перерахованими завданнями можливості використання інформації, одержуваної шляхом аналізу кіптяви, ймовірно, не обмежуються. У конкретних ситуаціях можуть виникати інші питання, які потребують вирішення.

Таким чином, етап планування проведення експерименту щодо перевірки достовірності базується на алгоритмі методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, та реалізує перший блок процедур.

5.2 Опис лабораторної установки для проведення вимірювань електричного опору кіптяви

Вимірювання електричного опору шару кіптяви проводиться з метою виявлення зон локального нагріву конструкцій на місці пожежі. Такі зони виникають, насамперед, над вогнищем вогню і вздовж шляхів поширення основних конвективних потоків від джерела вогню. Визначається напрям цих конвективних потоків і, отже, напрямок поширення горіння. Вимірювання проводиться відповідно до наміченого плану за результатами візуального огляду, який повинен передбачати максимальне покриття наявної сажі з кроком 0,2-0,3 м. У кожній позиції необхідно зробити не менше п'яти вимірювань, кожен раз роблячи зсув контактного щупа на 2-3 мм. Отримані результати усереднюються та наносяться на діаграму місця пожежі. Близькі значення об'єднуються в зони. Найменші значення будуть відповідати зонам найбільшого нагріву конструкцій.

Вимірювання електроопору можуть бути проведені у разі утворення шару кіптяви на будь-яких поверхнях матеріалів, що мають діелектричні властивості. При цьому слід враховувати шорсткість та чистоту поверхні. Як показала практична апробація, найбільш інформативними є результати досліджень шару кіптяви на стелі приміщень, так як він має однорідну поверхню і найбільш схильний до теплового впливу полум'я та конвективних потоків, що дозволяє об'єктивно оцінювати розташування в плані приміщення вогнищ інтенсивного горіння.

У разі незначних термічних руйнувань пожежного навантаження може бути встановлений, при необхідності, режим горіння. Для цього виміри електричного опору кіптяви проводяться безпосередньо над зоною горіння.

Для проведення вимірювань розроблено прилад основні частини якого складаються з:

- контактний щуп;
- прилад вимірювання електроопору;

- кабель, що з'єднує контактний щуп та вимірювач електроопору.

Конструкція контактного щупа повинна забезпечувати нормований рівномірний притиск контактів до закопченої поверхні, а також мінімізувати вплив нерівностей і неоднорідності шару кіптяви. Крім того, для вимірювань великих опорів щуп має бути екранованим.

Згідно проведеного аналізу визначено що, параметри кіптяви вкрай обмежено використовується, як об'єкт дослідження. На сьогоднішній час, фахівцями з дослідження пожеж проводяться лише спроби визначення природи згорілих матеріалів за структурою та складом кіптяви, а також встановлення факту наявності в зоні горіння етилованих палив за присутністю в кіптяві окису свинцю. Вимірювання електричного опору шару кіптяви, проводиться з метою виявлення зон локального нагріву конструкцій на місці пожежі. Можна визначити напрям конвективних потоків і, отже, напрямок поширення горіння.

Вимірювання електроопору, може бути проведено у разі утворення шару кіптяви на будь-яких поверхнях матеріалів, що мають діелектричні властивості. Як показала практична апробація, найбільш інформативними є результати досліджень шару кіптяви на стелі приміщень, так як він має однорідну поверхню і найбільш схильний до теплового впливу полум'я та конвективних потоків, що дозволяє об'єктивно оцінювати розташування в плані приміщення вогнищ інтенсивного горіння.

Перший дослідний зразок для вимірювання параметрів кіптяви на горизонтальних поверхнях (рис. 5.2), не забезпечив проведення вимірювань з великою точністю, тому що враховуючи фізичні параметри кіптяви розроблені контактні групи з твердосплавного металу не могли забезпечити рівномірне притискання пристрою до поверхні через це спостерігалися поверхневі пробої та плаваючі значення електричного опору. Було прийнято рішення, щодо розробки контактних груп з певною пружністю, рівномірним притисканням, фіксованою відстанню між контактами.



Рис.5.2. Прилад для вимірювання електричного опору шару кіптяви на горизонтальних поверхнях на основі жорстких контактів

Відмінною особливістю даного пристрою є конструкція контактного щупа (рис. 5.3), що забезпечує нормований рівномірний притиск контактів до закопченої поверхні, а також мінімізує вплив нерівностей і неоднорідності шару кіптяви.

Для виявлення осередкових ознак процесу горіння, було розроблено випробувальний зразок пристрою, для вимірювання електричного опору кіптяви. Це досягається шляхом поєднання контактної блоку, обчислювального пристрою та застосування штанги подовжувача. Конструктивні особливості розробленого пристрою полягають в тому що: контактний блок детектування (рис. 5.3) має 3 контакти по радіусу і 1 центральний комбінуючи з'єднання яких, можна знімати більше значень, з однієї точки дотику до поверхні зразка кіптяви.

З урахування поверхневих явищ кіптяви, були розроблені контактні пари, що мають амортизаційну фіксацію, з визначеною площею контакту та фіксованою відстанню між ними, для зменшення похибки вимірювання.



Рис. 5.3 Контактний блок з розміщеними на ньому контактними парами

Блок детектування з'єднується зі штангою-подовжувачем, за допомогою поворотного механізму (рис. 5.4), що дозволяє проводити дослідження, як на горизонтальних (кривих) поверхнях, так і на стелі. За допомогою фіксатора механізму, здійснюється регулювання кута нахилу блоку детектування.



Рис.5.4. Поворотний механізм з фіксаторами кута нахилу блоку детектування

Штанга подовжувач має 3 фіксованих положення довжини: 1 положення 70 см, 2-140 см, 3-210 см, дані розміри є оптимальними для проведення вимірювань кіптяви на рівні стелі у більшості приміщень (за необхідності є

можливість модифікації, встановлення додаткових сегментів штанги-подовжувача).

Обчислювальний блок являє собою автономний вимірювач електричного опору, що розташований у захисному корпусі та зафіксований на штанзі, має дисплей з підсвічуванням та набір клавіш для управління пристроєм, діапазон вимірювання лежить в області притаманних для продуктів неповного згоряння більшості полімерних матеріалів, від 1 кОм до 100 МОм. Перемикач пар контактного блоку (рис. 5.5), має три положення що дозволяє перемикати групи в певній послідовності, для підвищення точності отриманих даних та зменшення відхилень і похибки вимірювання.

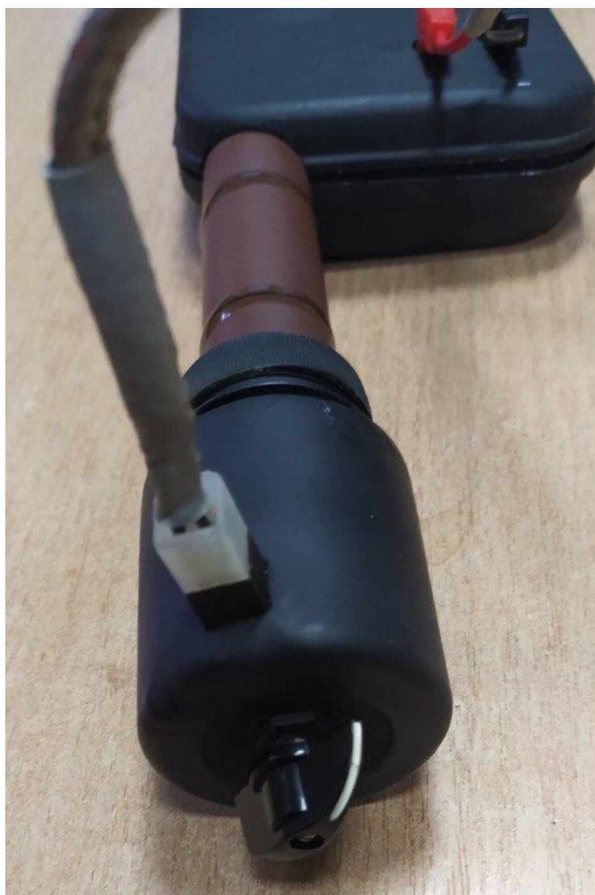


Рис. 5.5. Перемикач пар контактного блоку

Загальна конструкція лабораторного стенду наведена на рис. 5.6.

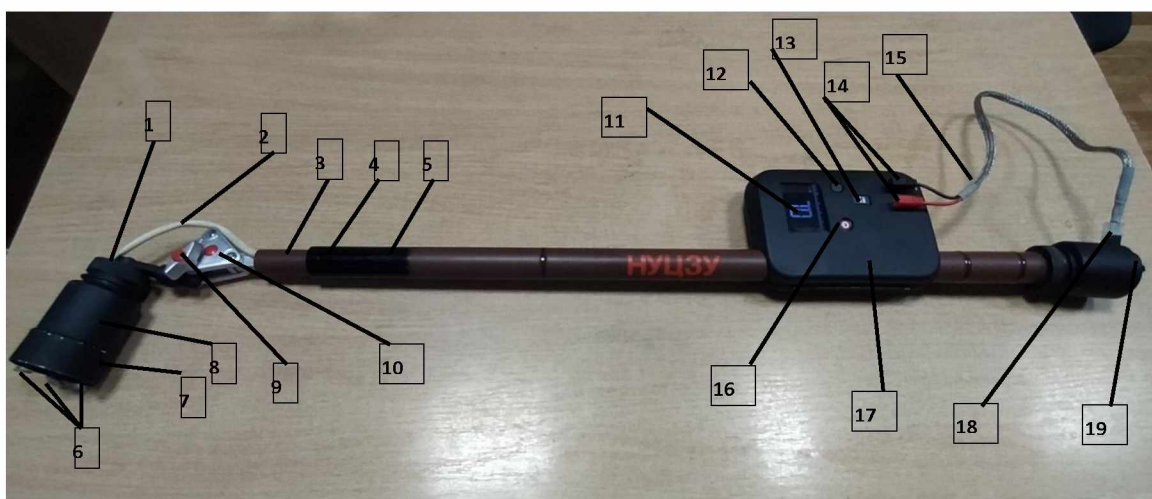


Рис. 5.6. Конструкція лабораторної установки для вимірювання опору шару кіптяви.

На рис. 5.6. використані наступні визначення: 1 - фіксатор блоку детектування, 2 - з'єднувальний кабель, 3,4,5 - секції телескопічної штанги, 6 - контактна група, 7 - обмежувач ходу пружинного механізму контактних пар, 8 - корпус контактної групи, 9 - фіксатор механізму регулювання положення контактної групи, 10 - механізму регулювання положення контактної групи, 11 - цифровий дисплей, 12 - клавіша фіксації значення опору, 13 - клавіша перемикачів режимів роботи пристрою, 14 - конектори датчиків вимірювання, 15 - екранований з'єднувальний кабель, 16 - клавіша ввімкнення/вимкнення приладу, 17 - корпус обчислювального блоку, 18 - конектор перемикача пар контактної групи, 19 - корпус перемикача пар контактної групи.

Обчислювальний блок (рис. 5.7) являє собою цифровий мультиметр ZOYI ZT-X RM409B що використовується для вимірювання деяких електричних величин: напруга, опір, ємність, струм, пряма напруга діода, частота, шпаруватість в електричних ланцюгах та фізичної величини температури.



Рис. 5.7 Обчислювальний блок (ZOYI ZT-X RM409B)

Відмінною особливістю мультиметра ZOYI ZT-X RM409B є можливість автоматичного вибору діапазону вимірювання та обчислення середньоквадратичного значення вимірюваної змінної напруги (функція True RMS). Функцію автоматичного вибору діапазону виміру можна вимкнути за допомогою кнопки RANGE. Мультиметр ZOYI ZT-X RM409B оснащений монохромним інверсним дисплеєм з діагоналлю 2,7 дюйми, розрядність дисплея 9999 відліків з плаваючою точкою. Для використання тестера RM409B потрібно спочатку встановити в бокс для елементів живлення дві батареї типу AA. Батарейки потрібно встановлювати, дотримуючись полярності, як зображено на корпусі боксу. Батарейки не входять до комплекту постачання. Бокс закріплений на шурупі, щоб відкрити бокс, потрібно відкрутити шуруп. Режими роботи тестера вибираються за допомогою кнопок. Тестер RM409B має захист від перевантаження: 1000 В постійного або 750 В змінного струму. При виході вимірюваної величини діапазон вимірювання на дисплеї з'являється піктограма OL (Overload). Тестер RM409B має індикацію полярності вхідного сигналу (піктограма "-").

За допомогою третьої кнопки можна працювати у трьох режимах:

перше натискання – вимір опору;

друге натискання - вимірювання прямої напруги діода та звуковий прозвон;

третє натискання – вимірювання ємності.

Для ручного вибору діапазону виміру потрібно натискати кнопку RANGE. Діапазон вимірюваного опору 0,01 Ом - 99,99 МОм. Діапазон вимірюваної ємності 9999 нФ - 9999 мкФ. Основні характеристики обчислювального блоку (ZOYI ZT-X RM409B) наведені у таблиці 5.1.

Для вимірювання сили постійного та змінного струму потрібно переключити червоний щуп тестера в гніздо, позначене A (сила струму до 10 A) або mA (сила струму до 200 mA) та мультиметр автоматично переключиться в режим вимірювання струму. Для перемикання між вимірюванням постійного та змінного струму потрібно натиснути кнопку увімкнення. Для ручного вибору діапазону виміру потрібно натискати кнопку RANGE. Діапазон вимірюваного струму 9999 мкA - 9999 A.

При натисканні кнопки "HOLD" на дисплеї фіксується поточне значення (піктограма HOLD). Ця функція може бути корисною, коли при вимірюванні ви не можете бачити дисплей приладу. При натисканні та утриманні протягом 2 секунд кнопки "HOLD" – вмикається режим відносних вимірювань. Для вимірювання температури потрібно обов'язково замість щупів підключати термопару, що входить до комплекту постачання. Термопара К-типу завдовжки 1 м. У комплект поставки мультиметра RM409B входять два щупи. Червоний та чорний щупи приладу оснащені ковпачками, що закривають повну довжину пробників. Ковпачки можуть зніматися з пробників із невеликим зусиллям. Довжина щупа та дроту становить 79 см. Тестер RM409B має відкидну підставку вертикальної установки приладу. Прилад має функцію автоматичного вимкнення. Якщо з приладом не відбувається жодних операцій, то через 4 хвилини він подає п'ять коротких звуків високої тональності (писків), ще через хвилину після тривалого звуку високої тональності переходить у сплячий режим і вимикається. Можна вимкнути автоматичне вимкнення. Для цього потрібно затиснути кнопку RANGE, увімкнути прилад та дочекатися закінчення п'яти коротких звуків високої тональності (писків).

Таблиця 5.1

Характеристики обчислювального блоку (ZOYI ZT-X RM409B):

	Параметр	Характеристика
1.	виробник:	ZOYI;
2.	модель:	ZT-X RM409B;
3.	категорія:	CAT II та CAT III;
4.	кількість відліків:	9999;
5.	дисплей:	монохромний; інверсний;
6.	додаткові функції:	True RMS, NCV (безконтактний пошук проводки);
7.	живлення:	елементи живлення типорозміру AA 2шт.;
8.	діапазон вимірюваної напруги:	DC 9,999 мВ ~ 1000; AC 9,999 мВ ~ 750 В;
9.	діапазон вимірюваного струму:	DC/AC 9999 мкА - 9999 А;
10.	діапазон вимірюваного опору:	0,01 Ом - 99,99 МОм;
11.	діапазон вимірюваної ємності:	9,999 нФ – 9,999 мкФ;
12.	діапазон вимірюваної частоти:	40 Гц – 999,9 кГц, 5 МГц;
13.	діапазон вимірюваної температури:	-20 ~ 1000 ° C; -4 - 1832 ° F;
14.	габарити:	146 x 74 x 34 мм;
15.	вага приладу:	125 г;
16.	вага комплекту:	330 г.

Кабель, що з'єднує щуп з вимірювальним приладом, повинен бути двожильним з подвійним екраном, при цьому кожна жила повинна мати свій екран і загальний екран, всередині якого знаходяться дві екрановані жили. Може бути використаний одножильний кабель з подвійним екраном, екрани один від одного повинні бути відокремлені ізоляцією, і внутрішній екран буде

використаний як друга жила. Як прилад для вимірювання опору може бути використаний будь-який вимірювач опору з верхньою межею вимірювань не нижче 10^{13} Ом. Мегаомметр (рис. 5.8), який дозволяє вимірювати опір ізоляції в діапазоні від 0,5 МОм до 100 000 МОм, тестовою напругою від 500 до 2500 В. Основні характеристики наведено у таблиці 5.2.



Рис. 5.8 Прилад мегаомметр UNI-T UT512

Таблиця 5.2

Технічні характеристики приладу мегаомметр UNI-T UT512

№	Параметр		Характеристика
	Дисплей		9999, РК-дисплей, 123 × 58 мм
	Опір ізоляції	Діапазон	0,5 МОм ~ 100 ГОм
		Похибка	±(3%+5)
	Тестова напруга	Діапазон	500 В / 1000 В / 1500 В / 2500 В
		Похибка	0 ~ 20%
	Постійна напруга	Діапазон	600 В
		Похибка	±(2%+5)
	Змінна напруга	Діапазон	600 В
		Похибка	±(2%+5)
	Живлення		1,5 В лужна батарейка (LR14) (8 шт.)
	Габарити		202 × 155 × 94 мм, 1,8 кг

Окремі елементи лабораторної установки для проведення вимірювань електричного опору кіптяви наведено на рис. 5.9 – 5.12.

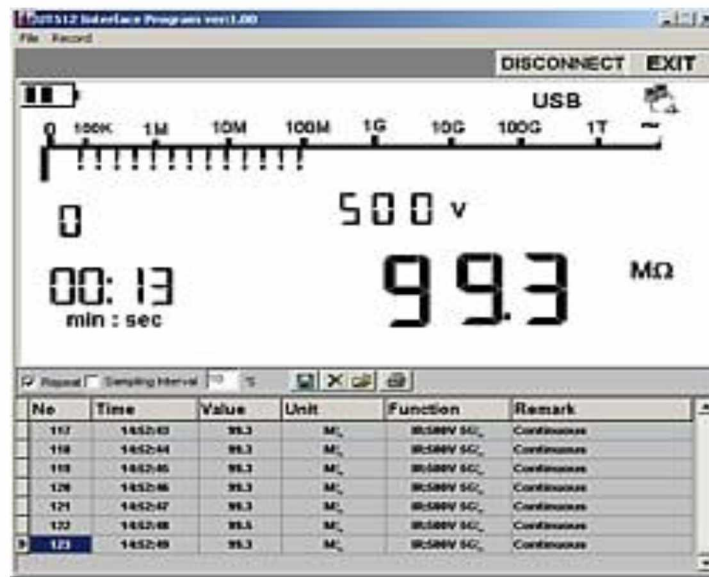


Рис.5.9 Вікно програмного забезпечення для ПК приладу UNI-T 512

Крім того, для вимірювань великих опорів з'єднувальні дроти мають екранізацію, це досягається застосуванням подвійного шару ізоляції дротів, використання ізоляційного компаунду всередині блоку детектування, покриття коннекторної частини діелектричною полімерною плівкою.



Рис. 5.10 Датчик для вимірювання електричного опору шару кіптяви на горизонтальних поверхнях на основі підпружинених контактів



Рис. 5.11 Підключений датчик для вимірювання електричного опору шару кіптяви на горизонтальних поверхнях до приладу UNI-T 512

Зазначені технічні вимоги реалізовані в розробленому комплекті обладнання для дослідження кіптяви на вертикальних поверхнях, що може входити до складу комплексу спеціальних приладів та обладнання для роботи пожежно-технічного експерта на місці пожежі.



Рис. 5.12 Модифіковані підпружинені контактні пари

Застосування розробленого приладу для вимірювання електричного опору шару кіптяви на горизонтальних поверхнях на основі підпружинених контактів, разом з мегаомметром UNI-T UT512 (рис. 5.11) або аналогічними пристроями для вимірювання великих значень опору, дає можливість швидкого та точного вимірювання параметрів електричного опору шару кіптяви на місці

пожежі, фіксація та аналіз даних у подальшому шляхом підключення пристрою UNI-T UT512 до комп'ютеру за допомогою програмного забезпечення (рис. 5.9), що поставляється в комплекті з приладом, перенесення та обробка отриманих даних та побудови карти ізорезистивних зон. В результаті отримання результатів, щодо визначення осередкових ознак горіння в досліджуваному приміщенні.

Таким чином, розроблена лабораторна установка для проведення вимірювань електричного опору кіптяви, яка складається з контактної щупи, приладу вимірювання електроопору, кабель, що поєднує контактний щуп та вимірювач електроопору, дозволяє вимірювати електричний опір шару кіптяви та виявляти зони локального нагріву конструкцій на місці пожежі та визначати напрям конвективних потоків та напрямок поширення горіння на об'єкті критичної інфраструктури.

5.3. Результати експериментів з перевірки достовірності розробленої математичної моделі та методики на її основі

5.3.1 Хроніка розвитку надзвичайної ситуації в наслідок пожежі. В якості об'єкту дослідження вибрано наступна надзвичайна ситуація: 18 серпня о 16 год. 51 хв. до служби порятунку Івано-Франківської області надійшло повідомлення про пожежу маслобаку в котлотурбінному цеху блоку № 3 Бурштинської ТЕС (рис. 5.13). По прибуттю до місця виклику пожежно-рятувальних підрозділів було встановлено, що на енергоблоці № 3 котельно-турбінного цеху ВП «Бурштинська ТЕС» АТ «ДТЕК Західенерго» внаслідок розгерметизації фланця у маслосистемі головного маслобака (об'ємом 45 м³) турбіни та розливу масла об'ємом 2 м³ загорілось масло та кабельні траси в лотках і кабельних тунелях енергоблоку № 3 на всіх відмітках. Пожежа виникла окремими осередками на загальній площі, орієнтовно, 1000 м² у будівлі цеху розміром 550 м×60 м. Пожежа супроводжувалася руйнуванням будівельних

конструкцій, технологічного обладнання, високою температурою та сильним задимленням. У результаті пожежі автоматична система пожежогасіння вийшла з ладу, тому постійно існувала загроза вибуху, оскільки у технологічному процесі використовується вугільний пил, водень, азот, кисень, масло. До гасіння пожежі всього було залучено 20 одиниць техніки та 89 чоловік, в тому числі від ДСНС 19 одиниць техніки та 66 чоловік особового складу. Також було залучено 12 членів ДПД ВП «Бурштинська ТЕС» АТ «ДТЕК Західенерго», працівників МПК смт Більшівці. О 18 год. 54 хв. пожежу було локалізовано, а о 19 год. 23 хв. – ліквідовано. Загиблих і травмованих немає. Матеріальні втрати від пожежі склали 708 тис. гривень. Попередньо причиною пожежі стало порушення правил пожежної безпеки при експлуатації теплогенеруючих агрегатів та обладнання.

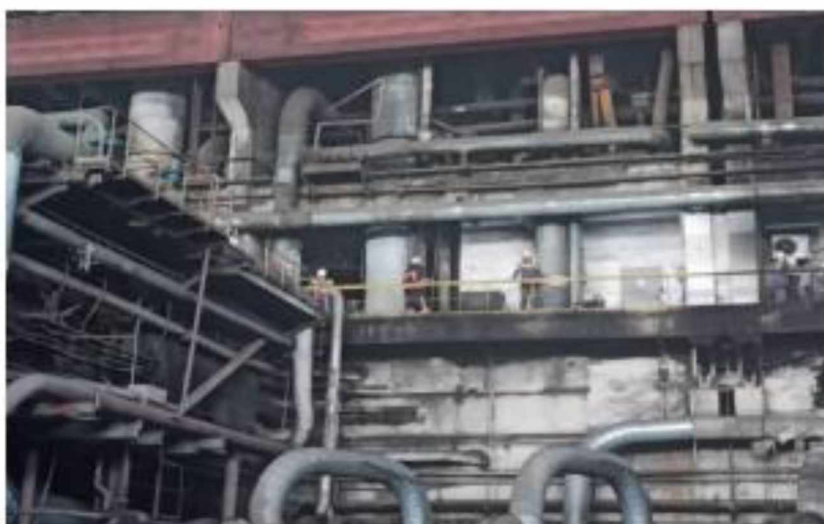


Рис. 5.13. Зовнішній вигляд будинку у якому сталася пожежа

5.3.2 Проведення натурних досліджень на об'єкті критичної інфраструктури. Після гасіння пожежі на об'єкті критичної інфраструктури, з метою перевірки достовірності математичної моделі та методики на її основі була проведена серія експериментів за допомогою розробленої лабораторної установки (рис. 5.14) та розроблена схема об'єкту критичної інфраструктури з нанесеною сіткою рис. 5.15 (точки вимірювання електроопору кіптяви)



а)



б)

Рис. 5.14. Проведення вимірювання електричного опору шару кіптяви в широких діапазонах значень на стелі приміщення у якому відбувалася пожежа.

На рис. 5.14 використані наступні позначення:

а) з використанням приладу для вимірювання значень електричного опору в діапазоні до 100 ГОм

б) з використанням приладу для вимірювання значень в діапазоні до 100 МОм

		Номер ряду по горизонталі							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Номер ряду по вертикалі	1	1-1	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1	7-1	8-1
	2	1-2	2-2	3-2	4-2	5-2	6-2	7-2	8-2
	3	1-3	2-3	3-3	4-3	5-3	6-3	7-3	8-3
	4	1-4	2-4	3-4	4-4	5-4	6-4	7-4	8-4
	5	1-5	2-5	3-5	4-5	5-5	6-5	7-5	8-5
	6	1-6	2-6	3-6	4-6	5-6	6-6	7-6	8-6
	7	1-7	2-7	3-7	4-7	5-7	6-7	7-7	8-7
	8	1-8	2-8	3-8	4-8	5-8	6-8	7-8	8-8
	9	1-9	2-9	3-9	4-9	5-9	6-9	7-9	8-9

Рис. 5.15. Схема приміщення об'єкту критичної інфраструктури з нанесеною сіткою (точки вимірювання електроопору кіптяви).

Вимірювання проводилися на стелі об'єкту критичної інфраструктури. Результати, отримані при вимірюванні електричного опору кіптяви за пропонованою методикою, наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Результати вимірювання електричного опору шару кіптяви в приміщеннях об'єкту критичної інфраструктури

№	Вид	Величина електричного опору, МОм				
		1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6	7
1-1	Стеля	2000,0	2100,0	2100,0	2000,0	1900,0
1-2	""	400,0	410,0	420,0	420,0	410,0
1-3	""	5,0	5,10	5,20	5,0	5,0
1-4	""	1,0	1,10	1,10	1,10	1,10
1-5	""	5,0	5,0	5,20	5,10	5,10
1-6	""	150,0	150,0	160,0	160,0	150,0
1-7	""	1000,0	1100,0	1200,0	1200,0	1000,0
2-1	""	2000,0	2100,0	1900,0	2000,0	2000,0
2-2	""	500,0	490,0	500,0	510,0	520,0
2-3	""	5,0	5,20	4,90	5,0	5,0
2-4	""	5,0	5,0	4,90	5,10	5,10
2-5	""	5,0	5,0	5,10	5,10	5,10
2-6	""	200,0	210,0	190,0	200,0	200,0
2-7	""	1000,0	1100,0	900,0	900,0	900,0
3-1	""	1200,0	1200,0	1200,0	1100,0	1100,0
3-2	""	1000,0	900,0	900,0	1000,0	1000,0
3-3	""	60,0	61,0	61,0	60,0	60,0
3-4	""	40,0	41,0	42,0	40,0	40,0
3-5	""	50,0	51,0	52,0	51,0	51,0
3-6	""	200,0	210,0	210,0	200,0	200,0
3-7	""	1500,0	1600,0	1600,0	1500,0	1500,0

Закінчення таблиці 5.3

1	2	3	4	5	6	7
4-1	-"	2000,0	2100,0	2100,0	2100,0	2000,0
4-2	-"	2000,0	2000,0	2100,0	2000,0	2000,0
4-3	-"	500,0	510,0	490,0	500,0	510,0
4-4	-"	61,0	61,0	62,0	63,0	62,0
4-5	-"	60,0	60,0	61,0	62,0	61,0
4-6	-"	250,0	240,0	240,0	250,0	240,0
4-7	-"	1000,0	1100,0	1000,0	1000,0	1000,0
5-3	-"	1000,0	1000,0	900,0	900,0	900,0
5-4	-"	520,0	510,0	520,0	510,0	510,0
5-5	-"	70,0	71,0	72,0	72,0	71,0
5-6	-"	220,0	210,0	220,0	210,0	210,0
5-7	-"	700,0	710,0	690,0	690,0	690,0
6-4	-"	1500,0	1400,0	1500,0	1400,0	1400,0
6-5	-"	1000,0	1000,0	900,0	900,0	900,0
6-6	-"	100,0	90,0	90,0	100,0	100,0
6-7	-"	500,0	510,0	510,0	500,0	490,0
6-8	-"	2000,0	2100,0	1900,0	1900,0	1900,0
7-4	-"	2000,0	2000,0	1900,0	1900,0	1900,0
7-5	-"	200,0	190,0	190,0	200,0	200,0
7-6	-"	100,0	95,0	110,0	100,0	100,0
7-7	-"	500,0	510,0	520,0	520,0	520,0
7-8	-"	2000,0	2100,0	2000,0	1900,0	1900,0
8-4	-"	2000,0	2000,0	1900,0	2000,0	1900,0
8-5	-"	250,0	240,0	230,0	230,0	230,0
8-8	-"	2000,0	2100,0	1900,0	1900,0	1900,0
9-5	-"	500,0	510,0	520,0	520,0	520,0
9-8	-"	2000,0	2000,0	1900,0	1900,0	1900,0

Далі була проведена статистична обробка результатів вимірювань та розрахований десятковий логарифм табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Результати статистичної обробки даних вимірювань електричного опору шару кіптяви в приміщеннях об'єкту критичної інфраструктури

№	Значення середнього квадратичного відхилення електричного опору МОм	Середньоквадратичне відхилення, МОм	Коефіцієнт варіації %	Межа довірчого інтервалу для середньоквадратичного відхилення, МОм		Межа довірчого інтервалу для середньоквадратичного відхилення, МОм		$\lg(R \cdot 10^{-6})$
				нижня	верхня	нижня	верхня	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-1	2020,0	83,67	4,14	1847,73	2192,27	25,10	1246,62	3,31
1-2	412,0	8,37	2,03	394,77	429,23	2,51	124,66	2,61
1-3	5,06	0,09	1,77	4,88	5,24	0,03	1,33	0,70
1-4	1,10	0,07	6,43	0,95	1,25	0,02	1,05	0,04
1-5	5,08	0,08	1,65	4,91	5,25	0,03	1,25	0,71
1-6	154,0	5,48	3,56	142,72	165,28	1,64	81,61	2,19
1-7	1100,0	100,0	9,09	894,10	1305,90	30,0	1490,0	3,04
2-1	2000,0	70,71	3,54	1854,41	2145,59	21,21	1053,59	3,30
2-2	504,0	11,40	2,26	480,52	527,48	3,42	169,89	2,70
2-3	5,02	0,11	2,18	4,79	5,25	0,03	1,63	0,70
2-4	5,02	0,08	1,67	4,85	5,19	0,03	1,25	0,70
2-5	5,06	0,05	1,08	4,95	5,17	0,02	0,82	0,70
2-6	200,0	7,07	3,54	185,44	214,56	2,12	105,36	2,30
2-7	960,0	89,44	9,32	775,84	1144,16	26,83	1332,70	2,98
3-1	1160,0	54,77	4,72	1047,23	1272,77	16,43	816,11	3,06
3-2	960,0	54,77	5,71	847,23	1072,77	16,43	816,111	2,98

Продовження таблиці 5.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3-3	60,40	0,55	0,91	59,27	61,53	0,16	8,16	1,78
3-4	40,60	0,89	2,20	38,76	42,44	0,27	13,33	1,61
3-5	51,0	0,71	1,39	49,54	52,46	0,21	10,54	1,71
3-6	204,0	5,48	2,68	192,72	215,28	1,64	81,61	2,31
3-7	1540,0	54,77	3,56	1427,23	1652,77	16,43	816,11	3,19
4-1	2060,0	54,77	2,66	1947,23	2172,77	16,43	816,11	3,31
4-2	2020,0	44,72	2,21	1927,92	2112,08	13,42	666,35	3,31
4-3	502,0	8,37	1,67	484,77	519,23	2,51	124,66	2,70
4-4	61,80	0,84	1,35	60,08	63,52	0,25	12,47	1,79
4-5	60,80	0,84	1,38	59,08	62,52	0,25	12,47	1,78
4-6	244,0	5,48	2,24	232,72	255,28	1,64	81,61	2,39
4-7	1020,0	44,72	4,38	927,92	1112,08	13,42	666,35	3,01
5-3	940,0	54,77	5,83	827,23	1052,77	16,43	816,11	2,97
5-4	514,0	5,48	1,07	502,72	525,28	1,64	81,61	2,71
5-5	71,20	0,84	1,18	69,48	72,92	0,25	12,47	1,85
5-6	214,0	5,48	2,56	202,72	225,28	1,64	81,61	2,33
5-7	696,0	8,94	1,29	677,58	714,42	2,68	133,27	2,84
6-4	1440,0	54,77	3,80	1327,23	1552,77	16,43	816,11	3,16
6-5	940,0	54,77	5,83	827,23	1052,77	16,43	816,11	2,97
6-6	96,0	5,48	5,71	84,72	107,28	1,64	81,61	1,98
6-7	502,0	8,37	1,67	484,77	519,23	2,51	124,66	2,70
6-8	1960,0	89,44	4,56	1775,84	2144,16	26,83	1332,70	3,29
7-4	1940,0	54,77	2,82	1827,23	2052,77	16,43	816,11	3,29
7-5	196,0	5,48	2,79	184,72	207,28	1,64	81,61	2,29
7-6	101,0	5,48	5,42	89,72	112,28	1,64	81,61	2,0
7-7	514,0	8,94	1,74	495,58	532,42	2,68	133,27	2,71
7-8	1980,0	83,67	4,23	1807,73	2152,27	25,10	1246,62	3,30

Наведемо приклад статистичної обробки результатів вимірювання електроопору кіптяви для однієї з точок.

1. Оцінка середнього значення електроопору шару кіптяви для однієї точки:

$$x_1 = 1/5 \cdot (2000,0 + 2100,0 + 2100,0 + 2000,0 + 1900,0) = 2020,0 \text{ МОм.}$$

2. Оцінка дисперсії результатів вимірів:

$$\sigma^2 = 1/(5 - 1) \cdot (2000,0 - 2020,0)^2 + (2100,0 - 2020,0)^2 + (2100,0 - 2020,0)^2 + (2000,0 - 2020,0)^2 + (1900,0 - 2020,0)^2 = 7000,0 \text{ МОм}^2.$$

3. Середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{7000,0} = 83,67 \text{ Мом}$$

4. Коефіцієнт варіації (%):

$$v = 83,67/2020,0 \cdot 100 = 4,14 \%$$

5. Довірчі інтервали для середнього значення та середньоквадратичного відхилення розраховувалися для довірчої ймовірності $\beta = 0,99$.

Коефіцієнт Стюдента за ймовірності $\alpha = 0,01$ ($\alpha = 1 - \beta$) та ступеня свободи $m = 4$ ($m = n - 1$) дорівнює $\gamma = 4,604$.

Довірчий інтервал для середнього значення:

$$2020,0 - 4,604 \cdot 83,67/\sqrt{5} < x_1 < 2020,0 + 4,604 \cdot 83,67/\sqrt{5}$$

$$1847,73 < x_1 < 2192,27.$$

6. Довірчий інтервал для середньоквадратичного відхилення.

Критерії згоди для $\alpha = 0,01$ та ступеня свободи $m = 4$ рівні

$$\gamma_{0,995} = 0,30 \ (\gamma_1 = \gamma_{\alpha/2}) \text{ и}$$

$$\gamma_{0,05} = 14,9 \ (\gamma_2 = \gamma_{1-\alpha/2}).$$

Довірчий інтервал дорівнює:

$$0,30 \cdot 83,67 < \sigma < 14,9 \cdot 83,67$$

$$25,10 < 83,67 < 1246,62.$$

Побудова зон розподілу значень десяткових логарифмів електроопору кіптяви проводилося за допомогою комп'ютерної програми Microsoft Excel.

Розрахункові параметри для побудови зон:

$$\lg(R_{\min} \cdot 10^{-6}) = 0,04; \lg(R_{\max} \cdot 10^{-6}) = 3,31; m = 0,5; J = (3,5 - 0,0)/0,5 = 7.$$

Розрахункові межі інтервалів наведено у табл. 5.5.

Табл. 5.5

Розрахункові межі інтервалів $\lg(R_{\min} \cdot 10^{-6})$

№	Межі	
	Верхня	Нижня
1	0,0	< 0,5
2	0,5	< 1,0
3	1,0	< 1,5
4	1,5	< 2,0
5	2,0	< 2,5
6	2,5	< 3,0
7	3,0	< 3,5

Таблиці розрахунку комп'ютерної програми Microsoft Excel для приміщення ОКІ наведено у табл. 5.6.

Табл. 5.6

Десяткові логарифми електроопору кіптяви $\lg(R \cdot 10^{-6})$ для кімнати

№ по вертикалі	№ по горизонталі								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3,31	3,30	3,06	3,31					
2	2,61	2,70	2,98	3,31					
3	0,70	0,70	1,78	2,70	2,97	3,75			
4	0,04	0,70	1,61	1,79	2,71	3,16	3,29	3,29	
5	0,71	0,70	1,71	1,78	1,85	2,97	2,29	2,37	2,71
6	2,19	2,30	2,31	2,39	2,33	1,98	2,0		
7	3,04	2,98	3,19	3,01	2,84	2,70	2,71		
8						3,29	3,30	3,29	3,29

Значення десятичного логарифму для порожніх осередків у табл. 5.6:

$$\lg(R \cdot 10^{-6}) = 3,5 + 0,5/2 = 3,75.$$

За допомогою комп'ютерної програми Microsoft Excel була побудована контурна діаграма (рис. 5.17) що відображає картину розподілу значень електроопору кіптяви для кімнати.

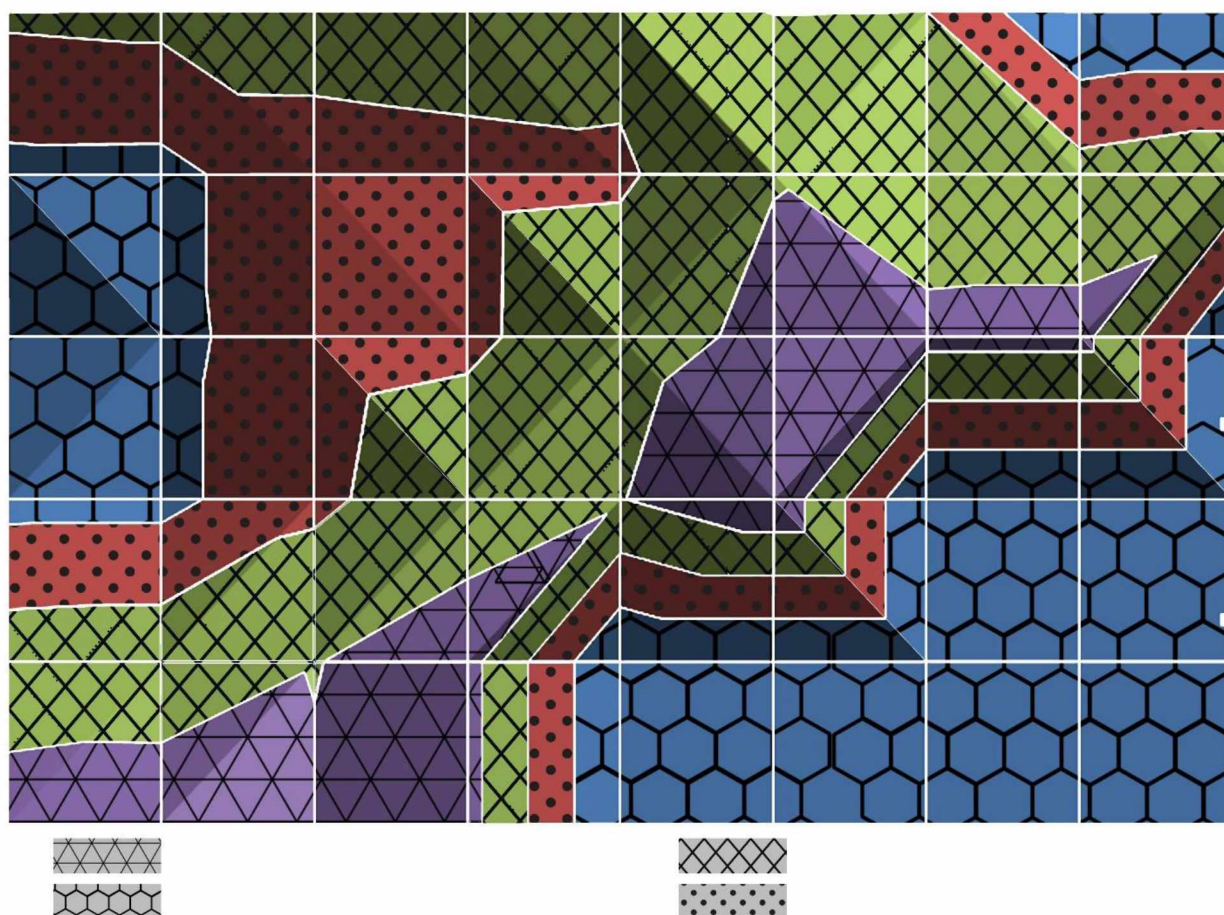


Рис. 5.16 Логарифмічний розподіл ділянок електричного опору шару кіптяви по стелі приміщення

На схемі видно, що дійсно основний конвективний потік значний час проходив від вікна до дверей приміщення ОКІ. З отриманих результатів визначимо, що зона найменших значень електроопору кіптяви ($R = 1,10 \text{ МОм}$) знаходиться в приміщенні, біля вікна та у наслідок поширення пожежі біля правої стіни (рис. 5.16). У міру віддалення від цієї стіни електроопір кіптяви послідовно зростає аж до $R = 2060 \text{ МОм}$. На (рис. 5.16) видно слід конвективного потоку у напрямку до дверей. Відповідно, можна констатувати, що осередок пожежі для наведеного приміщення ОКІ розташовувався поруч із вікном приміщення, що відповідає хроніці опису надзвичайної ситуації внаслідок пожежі.

Таким чином, результати натурного дослідження процесу ліквідації надзвичайної ситуації в енергоблоці № 3 котельно-турбінного цеху ВП «Бурштинська ТЕС» АТ «ДТЕК Західенерго» входять в довірчий інтервал,

отриманий під час комп'ютерного моделювання за допомоги розробленого математичного апарату, розрахований з надійністю 0,95, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі та методики, яка була створена на її основі.

Висновки за п'ятим розділом

1. Етап планування проведення експерименту щодо перевірки достовірності базується на алгоритмі методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, та реалізує перший блок процедур.

2. Розроблена лабораторна установка для проведення вимірювань електричного опору кіптяви, яка складається з контактного щупу, приладу вимірювання електроопору, кабелю, що поєднує контактний щуп та вимірювач електроопору, дозволяє вимірювати електричний опір шару кіптяви та виявляти зони локального нагріву конструкцій на місці пожежі та визначати напрям конвективних потоків та напрямок поширення горіння на об'єкті критичної інфраструктури.

3. Результати натурного дослідження процесу ліквідації надзвичайної ситуації в енергоблоці № 3 котельно-турбінного цеху ВП «Бурштинська ТЕС» АТ «ДТЕК Західенерго» входять в довірчий інтервал, отриманий під час комп'ютерного моделювання за допомоги розробленого математичного апарату, розрахований з надійністю 0,95, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі та методики, яка була створена на її основі.

РОЗДІЛ 6

ВАРІАНТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДИКИ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Розглянуто практичні кроки з впровадження розробленої методики, спрямовані на вирішення таких завдань розслідування пожежі, як встановлення місця розташування вогнища пожежі та шляхів поширення димових потоків, температурного режиму в зоні горіння.

Дані з електроопору шару кіптяви в різних зонах пожежі можуть бути об'єктивною основою для диференціації зон нагріву закопчених конструкцій і предметів. При інтерпретації (трактуванні) цих даних необхідно пам'ятати таке.

Зони найбільшого прогріву конструкцій характеризуються найменшими значеннями опору шару кіптяви електричного струму. Такі зони виникають передусім над осередком пожежі, якщо кіптява не вигоріла, а також на шляхах поширення основних конвективних потоків від вогнища. В окремих випадках так само проявляють себе осередки горіння, зумовлені зосередженням пожежного навантаження.

При досить високій температурі (понад 600-650° С) на огорожуючих осередках пожежі конструкціях і предметах осередкова зона може проявлятися у повному локальному вигоранні кіптяви. У цьому випадку шляхом дослідження відкладень кіптяви поза зоною вигорання виявляються напрями конвективних потоків з цього вогнища.

Зони проходження основних конвективних потоків продуктів горіння характеризуються поступовим збільшенням електроопору кіптяви від вогнища горіння у напрямку витяжних отворів. Електричний опір шару кіптяви на периферійних ділянках поза цими зонами істотно вище і може відрізнятися на один-два порядку (іноді і більше). Наприклад, електроопір кіптяви може бути

103–104 Ом над осередковою зоною та на основних трасах просування потоку диму з вогнища та 106–108 Ом - на периферійних ділянках.

Практична апробація методики показала, що найбільш доцільно застосування результатів даної роботи при експертизі пожеж на об'єктах критичної інфраструктури, а також у будь-яких інших випадках пожеж у будівлях та спорудах з будівельних конструкцій, що не згорають. Аналіз кіптяви на вогнетривких конструкціях дає можливість отримувати інформацію, що сприяє реконструкції пожежі, у разі незначного термічного впливу пожежі на конструкції, коли існуючі методики дослідження неорганічних будівельних матеріалів (матеріалів на основі цементу, вапна, гіпсу, сталей та ін.) є малоефективними. Використання в практичній експертній діяльності методики дослідження кіптяви дозволяє вирішити низку важливих завдань, що виникають у процесі роботи з реконструкції подій та умов розвитку пожежі. Зокрема, може бути встановлений режим горіння, шляхи розповсюдження вогню, зони прогріву будівельних конструкцій, що впритул підводить до висновку про місце розташування вогнища пожежі.

З огляду на те, що методика є неруйнівною – немає ніяких обмежень на її застосування при дослідженні місця пожежі технічними фахівцями на стадії перевірки за фактом пожежі. Остаточні висновки про осередок пожежі можуть бути сформовані лише в рамках пожежно-технічної експертизи на основі всього комплексу інформації, що є за пожежею. Крім даних з електроопору кіптяви це можуть бути: результати візуального огляду місця пожежі, результати застосування інших інструментальних методів (основних та допоміжних), непрямі ознаки осередку пожежі, показання свідків, а також інші фактори та джерела інформації.

ВИСНОВКИ

1. Перспективи вдосконалення протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури полягають у впровадженні сучасних методів та технологій виявлення загроз, створення баз даних для аналізу ризиків, а також інтеграцію воєнних факторів у систему пожежної безпеки. Результати експертизи джерел виникнення пожежі є основою ефективної системи протипожежного захисту, яка здатна протистояти будь-яким викликам сучасності.

2. Інформаційна модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі, складається з двох контурів управління загального контуру який відповідає позитивному рішенням щодо ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури та оперативного контуру, який задіється у разі негативної оцінки ефективності системи протипожежного захисту об'єкту критичної інфраструктури, рішення щодо контуру управління приймається спираючись на сучасні технічні досягнення в області експертизи пожеж та їх наслідків;

3. Математична модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі складається з шести аналітичних залежностей. Перша та друга залежності визначають вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви. Третя описує вплив термодинамічних процесів випромінюючої поверхні полум'я на формування шару кіптяви у разі наявності огорожувальної поверхні. Четверта та п'ята залежність дозволяють врахувати вплив на процеси формування кіптяви градієнтів температури та швидкості повітря у висхідному потоці над осередком пожежі. Шоста залежність враховує

вплив величини коефіцієнту конвекційного теплообміну огорожувальної поверхні з висхідними потоками над осередком горіння на формування шару кіптяви.

4. Методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, реалізую розроблену математичну модель підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі, спирається на алгоритм її застосування реалізація якого передбачає послідовне застосування наступних процедур: процедури проведення вимірювань, процедури статистичної обробки результатів вимірів, процедури реконструкції пожежі.

5. Результати натурного дослідження процесу ліквідації надзвичайної ситуації енергоблоці № 3 котельно-турбінного цеху ВП «Бурштинська ТЕС» АТ «ДТЕК Західенерго» входять в довірчий інтервал, отриманий під час комп'ютерного моделювання за допомоги розробленого математичного апарату, розрахований з надійністю 0,95, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи кіптяви поверхонь приміщень в осередку пожежі та методики, яка була створена на її основі.

6. Практична апробація методики показала, що найбільш доцільно застосування результатів даної роботи при експертизі пожеж на об'єктах критичної інфраструктури, а також у будь-яких інших випадках пожеж у будівлях та спорудах з будівельних конструкцій, що не згорають. Аналіз кіптяви на вогнетривких конструкціях дає можливість отримувати інформацію, що сприяє реконструкції пожежі, у разі незначного термічного впливу пожежі на конструкції, коли існуючі методики дослідження неорганічних будівельних матеріалів (матеріалів на основі цементу, вапна, гіпсу, сталей та ін.) є малоефективними. Використання в практичній експертній діяльності методики дослідження кіптяви дозволяє вирішити низку важливих завдань, що

виникають у процесі роботи з реконструкції подій та умов розвитку пожежі. Зокрема, може бути встановлений режим горіння, шляхи розповсюдження вогню, зони прогріву будівельних конструкцій, що впритул підводить до висновку про місце розташування вогнища пожежі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aven, T. (2010). On how to define, understand and describe risk. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(6), (pp. 623–631).
2. Уряднікова, І. В., Заплатинський В. М. Наукові підходи до визначення терміну «критична інфраструктура». *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2020. № 2 (47). URL: https://jdmi.donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/02/Uriadnikova-JDMI_2_2020.pdf
3. Zhyvylo, Y., & Kuz, V. (2023). Risk Management of Critical Information Infrastructure: Threats-Vulnerabilities-Consequences.
4. Іванюта С. П. Пріоритети зниження ризиків виникнення надзвичайних ситуацій у контексті захисту критичної інфраструктури. *Стратегічні пріоритети*, 2017. № 4. С. 43–54. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/spa_2017_4_7
5. Суходоля О. М. Захист критичної інфраструктури в умовах гібридної війни: проблеми та пріоритети державної політики України. *Стратегічні пріоритети. Серія: Політика*, 2016. № 3 (40). С. 65–67.
6. Бобро Д. Г. Визначення критеріїв оцінки та загрози критичній інфраструктурі. *Стратегічні пріоритети. Серія: Економіка*, 2015. № 4. С. 83–93.
7. Mostafaei, H., Kashef, A., Sultan, M., McCartney, C., Leroux, P., & Cowalchuk, R. (2014). Resilience of critical infrastructure to extreme fires—gaps and challenges. Report DRDCYRDDCY2014YC66, 73p.
8. Жартовський, С. В. Проблемні питання створення системи протипожежного захисту об'єкта критичної інфраструктури з пожежною навантагою із целюлозовмісних матеріалів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2017. № 27 (10). С 101–105.
9. Yuen, A. C. Y., Chen, T. B. Y., Li, A., De Cachinho Cordeiro, I. M., Liu, L., Liu, H., & Yeoh, G. H. (2021). Evaluating the fire risk associated with cladding panels: An overview of fire incidents, policies, and future perspective in fire standards. *Fire and materials*, 45(5), 663–689.

10. Gupta, V., Hidalgo, J. P., Cowlard, A., Abecassis-Empis, C., Majdalani, A. H., Maluk, C., & Torero, J. L. (2021). Ventilation effects on the thermal characteristics of fire spread modes in open-plan compartment fires. *Fire Safety Journal*, 120, 103072.
11. Minieiev, S., Smirnov, A., & Yanzhula, O. (2024). Air-gas control at ukrainian coal enterprises and ways to improve its efficiencY. *European Science*, (sge31-02), 63–100.
12. Ahmed, M. (2021). Impact of architectural layout on exit preference of RMG workers during fire emergency.
13. Гриб, П. В., Пелешук, В. П., Онушак, О. В., Цісінський, М. М., & Бандуровський, Р. М. (2023). Засади управління персоналом в умовах надзвичайної ситуації, пов'язаної з порушенням правил охорони праці на підприємстві. *Scientific notes of Lviv University of Business and Law*. 38. С. 343–349.
14. Яловець, А. Аналітичний огляд світових підходів щодо управління протидією надзвичайним ситуаціям. *Математичні машини і системи*, 2023. № 1. С. 84–100.
15. Кічата, Н. М., & Третьяков, О. В. Оцінка ризиків виникнення надзвичайних ситуацій в енергетичному секторі критичної інфраструктури. *Український журнал будівництва та архітектури*, 2024. 5 (023). С. 92–100.
16. Andrew, L. (2020). The vulnerability of vital systems: how critical infrastructure became a security problem. In *Securing the Homeland* (pp. 17–39). Routledge.
17. ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Загальні вимоги». Наказ від 27.02.2019 № 38 Про прийняття та скасування національних стандартів, прийняття змін до національних стандартів URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82138
18. Kumar, K. S., & Balachander, K. (2023). Fire risks in electrical installations: the review. In *E3S Web of Conferences*, 376, 01113. EDP Sciences.

19. Anderson, P. M., Henville, C. F., Rifaat, R., Johnson, B., & Meliopoulos, S. (2022). Power system protection. John Wiley & Sons. 72 p.
20. Krausmann, E., Girgin, S., & Necci, A. (2019). Natural hazard impacts on industry and critical infrastructure: Natech risk drivers and risk management performance indicators. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 40, 101163.
21. Park, H., Nam, K., & Lim, H. (2023). Is critical infrastructure safe from wildfires? A case study of wildland-industrial and-urban interface areas in South Korea. *International journal of disaster risk reduction*, 95, 103849.
22. Masum, J. H. (2019). Climatic Hazards in Bangladesh: A Literature Review. Coastal Development Partnership (CDP), Bangladesh, Coastal Development Partnership (CDP), Bangladesh.
23. Meigs, G. W., Case, M. J., Churchill, D. J., Hersey, C. M., Jeronimo, S. M., & Smith, L. A. C. (2023). Drought, wildfire and forest transformation: characterizing trailing edge forests in the eastern Cascade Range, Washington, USA. *Forestry*, 96(3), pp. 340–354.
24. Sohrabi, B., Arabnya, A., Thompson, M. P., & Khodaei, A. (2024). A Wildfire Progression Simulation and Risk-Rating Methodology for Power Grid Infrastructure. *IEEE Access*.
25. Ghodrat, M., Shakeriaski, F., Nelson, D. J., & Simeoni, A. (2021). Existing improvements in simulation of fire–wind interaction and its effects on structures. *Fire*, 4(2), 27.
26. Alenezi, H., & Al-Qabandi, O. (2022). A review of hazard management in petroleum/chemical facilities–fires and explosions. *NeuroQuantology*, 20(5), 4222.
27. Ďurica, T., Lošinczi, P., & Blišťanová, M. (2015). Possibilities for protection of critical infrastructure prior to geohazards. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 5(1), 663–668.
28. Pant, R., Thacker, S., Hall, J. W., Alderson, D., & Barr, S. (2018). Critical infrastructure impact assessment due to flood exposure. *Journal of Flood Risk Management*, 11(1), 22–33.

29. Qiang, Y. (2019). Flood exposure of critical infrastructures in the United States. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 39, 101240.
30. Lam, C. Y., & Shimizu, T. (2021). A network analytical framework to analyze infrastructure damage based on earthquake cascades: A study of earthquake cases in Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 54, 102025.
31. Franchin, P., & Cavalieri, F. (2015). Probabilistic assessment of civil infrastructure resilience to earthquakes. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(7), pp. 583–600.
32. Закон України «Про критичну інфраструктуру». Відомості Верховної Ради (ВВР), 2023, № 5, ст.13. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>
33. Наказ МВС 13.10.2023 № 836 Про затвердження Методики оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру та пожеж. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z1905-23?utm_source=chatgpt.com#Text
34. Мурасов, Р., Мельник, Я., & Марко, В. Порівняння існуючих методик оцінювання загроз і ризиків для потенційно-небезпечних об'єктів критичної інфраструктури в зоні ведення бойових дій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, 2022. 45(3). С. 32–36.
35. Іванюта, С. П., Панов, Є. М., Іваненко, О. І., & Гапон, С. В. Оцінка ризиків критичній інфраструктурі України в умовах російської військової агресії. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 2024. № (2). С. 47-61.
36. Osei-Kyei, R., Tam, V., Ma, M., & Mashiri, F. (2021). Critical review of the threats affecting the building of critical infrastructure resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60, 102316.
37. Мурасов, Р., Нікітін, А., Мещеряков, І., Підгородецький, М., & Поплавець, С. Методика оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури за сценаріями розвитку надзвичайних ситуацій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, 2023. 48(3). С. 35–43.

38. Бобро, Д. Г. Методологія оцінки рівня критичності об'єктів інфраструктури. *STRATEGIC PRIORITIES*, 2026. № 3 (40). С. 77–85.
39. Калініченко, З. Д. Ризик-менеджмент. Навчальний посібник. Дніпро: ДДУВС, 2021. 224 с.
40. Мурасов, Р. Метод оцінювання ризиків для об'єктів критичної інфраструктури в умовах бойових дій з урахуванням їх деструктивно-кумулятивного потенціалу. *Social Development and Security*, 2023. 13(1). С. 152–160.
41. Rathnayaka, B., Robert, D., Adikariwattage, V., Siriwardana, C., Meegahapola, L., Setunge, S., & Amaratunga, D. (2024). A Unified Framework for Evaluating the Resilience of Critical Infrastructure: Delphi Survey Approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 104598.
42. Kalogeraki, M., & Antoniou, F. (2021). Improving Risk Assessment for Transporting Dangerous Goods through European Road Tunnels: A Delphi Study. *Systems*, 9(4), 80.
43. Cantelmi, R., Di Gravio, G., & Patriarca, R. (2021). Reviewing qualitative research approaches in the context of critical infrastructure resilience. *Environment Systems and Decisions*, 41(3), 341–376.
44. Damaraju, A. (2021). Securing Critical Infrastructure: Advanced Strategies for Resilience and Threat Mitigation in the Digital Age. *Revista de Inteligencia Artificial en Medicina*, 12(1), 76–111.
45. Cantelmi, R., Di Gravio, G., & Patriarca, R. (2021). Reviewing qualitative research approaches in the context of critical infrastructure resilience. *Environment Systems and Decisions*, 41(3), 341–376.
46. Kumar, N., Poonia, V., Gupta, B. B., & Goyal, M. K. (2021). A novel framework for risk assessment and resilience of critical infrastructure towards climate change. *Technological Forecasting and Social Change*, 165, 120532.
47. Gheorghe, A. V., Vamanu, D. V., Katina, P. F., Pulfer, R., Gheorghe, A. V., Vamanu, D. V., & Pulfer, R. (2018). Critical infrastructures, key resources, and

key assets. Critical infrastructures, key resources, key assets: Risk, vulnerability, resilience, fragility, and perception governance, 3–37.

48. Zhou, X. Y., Lu, G., Xu, Z., Yan, X., Khu, S. T., Yang, J., & Zhao, J. (2023). Influence of Russia-Ukraine war on the global energy and food security. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106657.

49. Vhpiliarevych, V., Tocicka, J. W., & Szafrńska, K. (2023). Civil protection and protection of critical infrastructure in ukraine during the conditions of the martial state. *Journal of Security & Sustainability Issues*, 13(1).

50. Mykytyn, Y., Kośmider, T., & Snopek, M. (2023). Civil protection services in ukraine in emergency during the legal regime of martial law. *Journal of Security & Sustainability Issues*, 13(1).

51. Lilienthal, G., & Ahmad, N. (2015). Cyber-attack as inevitable kinetic war. *Computer Law & Security Review*, 31(3), 390–400.

52. Villamil, F. (2021). Mobilizing memories: The social conditions of the long-term impact of victimization. *Journal of Peace Research*, 58(3), 399–416.

53. Sydorenko, H., & Kyselytsia, S. (). Social-economic and moral-ethical aspects of logistic activities in wartime conditions. *Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток підприємництва як фактор зростання національної економіки»*, 2023. С. 132.

54. Балаш, Л., & Гонтар, З. (). Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення. 2022.

55. Джога, О., & Благополучна, А. (2024). Problems of creating safe working conditions during war. *Актуальні питання у сучасній науці*, 4 (22).

56. Rook, I. E. Threats to critical infrastructure. Research Report. 36 p. URL: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR2300/RR2397-2/RAND_RRA2397-2.pdf

57. Williams, G. H. (2016). Reconstructing the Infrastructure of Damaged Societies. *Effective Civil-Military Interaction in Peace Operations: Theory and Practice*, 123–136.

58. Krajnović, Z., & Smolek, A. (2024). Impact of Military Activities on the Environment. *Strategos: Znanstveni časopis Sveučilišta obrane i sigurnosti „Dr. Franjo Tuđman “i Hrvatskog vojnog učilišta „Dr. Franjo Tuđman”, 8(2), 89–124.*

59. Sedláček, M., Dohnal, F., Ivan, J., & Šustr, M. (2024). Possible approaches to assessing terrain mobility after the effects of artillery munition. *Cogent Social Sciences, 10(1), 2368096.*

60. Перші кроки щодо організації цивільного захисту на базовому рівні місцевого самоврядування: серія практичних порадників / О.Я. Лещенко, С.А. Кудін, В.М. Михайлов, М.В. Андрієнко, В.Ф. Коробкін, Н.М. Романюк, Л.В. Калиненко, А.С. Борисова; за заг. ред. П.Б. Волянського, С.А. Парталяна. К. : ІДУ НД ЦЗ, 2021. Серія 7. 39 с.

61. Захист критичної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій: монографія / С.І. Азаров, В.Л. Сидоренко, С.А. Єременко, А.В. Пруський, А.М. Демків; за заг. ред. П.Б. Волянського. Київ, 2021. 375 с

62. Jakubowski, K., Paś, J., Duer, S., & Bugaj, J. (2021). Operational Analysis of Fire Alarm Systems with a Focused, Dispersed and Mixed Structure in Critical Infrastructure Buildings. *Energies, 14(23), 7893.*

63. Varshini, M. (2024). Fire secure using chain mechanism and IoT. *Management (JOIREM), 10(04).*

64. Kanagamalliga, S., Aarthi Radha, T. S., Vengadakrishnan, S., Sridhar, R., Adinkrah-Appiah, K., & Rajalingam, S. (2024, January). Harnessing IoT-Powered Fire Detection Systems for Enhanced Security. In *International Conference on Advances in Distributed Computing and Machine Learning* (pp. 347–356). Singapore: Springer Nature Singapore.

65. Zhang, Y., Geng, P., Sivaparthipan, C. B., & Muthu, B. A. (2021). Big data and artificial intelligence based early risk warning system of fire hazard for smart cities. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 45, 100986.*

66. Huang, X., Wu, X., & Usmani, A. (2022). Perspectives of using artificial intelligence in building fire safety. In *Handbook of cognitive and autonomous*

systems for fire resilient infrastructures (pp. 139–159). Cham: Springer International Publishing.

67. Almatared, M., Liu, H., Abudayyeh, O., Hakim, O., & Sulaiman, M. (2023). Digital-twin-based fire safety management framework for smart buildings. *Buildings*, 14(1), 4.

68. Kim, Y. J., Kim, H., Ha, B., & Kim, W. T. (2024). Advanced fire emergency management based on potential fire risk assessment with informative digital twins. *Automation in Construction*, 167, 105722.

69. Štitilis, D., Laurinaitis, M., & Verenius, E. (2023). The Use of biometric technologies in ensuring critical infrastructure security: the context of protecting personal data. *Entrepreneurship and sustainability issues*, 10(3), 133.

70. Manowska, A., Boros, M., Hassan, M. W., Bluszcz, A., & Tobór-Osadnik, K. (2024). A Modern Approach to Securing Critical Infrastructure in Energy Transmission Networks: Integration of Cryptographic Mechanisms and Biometric Data. *Electronics*, 13(14), 2849.

71. Anderson, I. S., McGreevy, R. L., & Bilheux, H. Z. (2009). Neutron imaging and applications. *Springer Science+ Business Media*, 200(2209), 987-0.

72. Sarawade, A. A., & Charniya, N. N. (2018, October). Infrared thermography and its applications: A review. In 2018 3rd International conference on communication and electronics systems (ICCES) (pp. 280–285). IEEE.

73. Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., & Jayakumar, T. (2013). Infrared thermography for condition monitoring—A review. *Infrared Physics & Technology*, 60, 35–55.

74. Khan, A., Gupta, S., & Gupta, S. K. (2022). Emerging UAV technology for disaster detection, mitigation, response, and preparedness. *Journal of Field Robotics*, 39(6), 905–955.

75. Hildmann, H., & Kovacs, E. (2019). Using unmanned aerial vehicles (UAVs) as mobile sensing platforms (MSPs) for disaster response, civil security and public safety. *Drones*, 3(3), 59.

76. Ibrahimbegovic, A., Boulkertous, A., Davenne, L., Muhasilovic, M., Duhovnik, J., & Pokrklic, A. (2009). Fire induced damage in structures and infrastructure: analysis, testing and modeling. In *Damage assessment and reconstruction after war or natural disaster* (pp. 309–329). Springer Netherlands.
77. Sohrabi, B., Arabnya, A., Thompson, M. P., & Khodaei, A. (2024). A Wildfire Progression Simulation and Risk-Rating Methodology for Power Grid Infrastructure. *IEEE Access*.
78. Naser, M. Z. (2019). Properties and material models for modern construction materials at elevated temperatures. *Computational materials science*, 160, 16–29.
79. Mostafaei, H., Kashef, A., Sultan, M., McCartney, C., Leroux, P., & Cowalchuk, R. (2014). Resilience of critical infrastructure to extreme fires—gaps and challenges. Report DRDCYRDDCY2014YC66, 73.
80. Šarūnienė, I., Martišauskas, L., Krikštolaitis, R., Augutis, J., & Setola, R. (2024). Risk assessment of critical infrastructures: A methodology based on criticality of infrastructure elements. *Reliability Engineering & System Safety*, 243, 109797.
81. Fire, N. I. (2016). Integrated Risk Management Plan 2016-2021. Northern Ireland Fire & Rescue Service IRMP, 53.
82. Henriques, J. P. M. (2023). Audit Compliance and Forensics Frameworks for Improved Critical Infrastructure Protection (Doctoral dissertation, Universidade de Coimbra).
83. Oka, M. E., & Hromada, M. (2023). The Role of Auditors in Critical Infrastructure Protection: Case in Czech Republic. *Transportation Research Procedia*, 74, 1239–1245.
84. Gromek, P. (2021). Strategic training and exercises for critical infrastructure protection and resilience: A transition from lessons learned to effective curricula. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 65, 102647.
85. Aradau, C. (2010). Security that matters: Critical infrastructure and objects of protection. *Security dialogue*, 41(5), 491–514.

86. Austin, R. F., DiSera, D. P., & Brooks, T. J. (2015). GIS for critical infrastructure protection. CRC Press.
87. Yusta, J. M., Correa, G. J., & Lacal-Arántegui, R. (2011). Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art. *Energy policy*, 39(10), 6100–6119.
88. Urbina, O., Sousa, H. S., Fekete, A., Matos, J. C., & Teixeira, E. (2023). Spatial Vulnerability Assessment of Critical Infrastructure Based on Fire Risk through GIS Systems-Case Study: Historic City Center of Guimarães, Portugal. *Applied Sciences*, 13(15), 8881.
89. Bui, H., Sakurahara, T., Reihani, S., Kee, E., & Mohaghegh, Z. (2020). Spatiotemporal integration of an agent-based first responder performance model with a fire hazard propagation model for probabilistic risk assessment of nuclear power plants. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 6(1), 011011.
90. Larsson, A., & Große, C. (2023). Data use and data needs in critical infrastructure risk analysis. *Journal of Risk Research*, 26(5), 524–546.
91. Zhang, J., Rong, L., & Bao, C. (2023). The Research On Statistical Identification of Critical Infrastructure Chain Failure Paths. *Procedia Computer Science*, 221, 626–633.
92. Tien, I., & Der Kiureghian, A. (2017). Reliability assessment of critical infrastructure using Bayesian networks. *Journal of infrastructure systems*, 23(4), 04017025.
93. Misuri, A., Khakzad, N., Reniers, G., & Cozzani, V. (2019). A Bayesian network methodology for optimal security management of critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 191, 106112.
94. Luo, S., Chu, V. W., Zhou, J., Chen, F., Wong, R. K., & Huang, W. (2017, June). A multivariate clustering approach for infrastructure failure predictions. In 2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress) (pp. 274–281). IEEE.

95. Huang, J., Xu, Z., Yang, F., Zhang, W., Cai, S., Luo, J., & Li, T. (2022). Fire Risk Assessment and Warning Based on Hierarchical Density-Based Spatial Clustering Algorithm and Grey Relational Analysis. *Mathematical Problems in Engineering*, 1, 7339312.
96. Kim, I. T., Cha, K. H., Jeong, Y. S., & Shin, A. S. (2022). Visual inspection of the heavy-duty paint systems used in steel bridges for assessing the level of fire damage. *Coatings*, 12(11), 1697.
97. Vandecasteele, F., Kumar, K., Milleville, K., & Verstockt, S. (2019). Video Summarization And Video Highlight Selection Tools To Facilitate Fire Incident Management. In ISCRAM.
98. Calo, A. M. V. M., & Barbosa, J. B. (2024). Video-based Fire Detection and Reporting System for Immense Urban Areas. *Mindanao Journal of Science and Technology*, 22(2).
99. Narendran, R., Vinesh, T., Cheong, S. H., & Yee, H. X. (2023). Aerial Drones for Fire Disaster Response. In *Drones-Variou Applications*. Intech Open.
100. Peacock, R. D., Forney, G. P., & Reneke, P. A. (2015). CFAST – consolidated fire and smoke transport (version 7) – volume 3: verification and validation guide. NIST Technical Note 1889v3 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2015).
101. Ding, Z., Xu, S., Xie, X., Zheng, K., Wang, D., Fan, J., & Liao, L. (2024). A building information modeling-based fire emergency evacuation simulation system for large infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 244, 109917.
102. Kodur, V. K. R., Garlock, M., & Iwankiw, N. (2012). Structures in fire: state-of-the-art, research and training needs. *Fire Technology*, 48, 825–839.
103. Baker, G. B., & Wade, C. A. (2009). Development of probabilistic design and analysis tools for performance-based fire safety engineering. *Proceedings*, 37–49.
104. Brake, D. J. (2013, July). Fire modelling in underground mines using Ventsim Visual VentFIRE Software. In *Proceedings of the Australian mine ventilation conference*, Adelaide, SA, Australia, 1–3.

105. Florea, G. D., & Vlasin, N. I. (2020). Locating the probable ignition source in fire expertise. In MATEC Web of Conferences, 305, 00042. EDP Sciences.
106. Gorbett, G. E., Meacham, B. J., Wood, C. B., & Dembsey, N. A. (2015). Use of damage in fire investigation: a review of fire patterns analysis, research and future direction. *Fire Science Reviews*, 4, 1–35.
107. Kerr, T. J., Duncan, K. L., Myers, L. Application of vibrational spectroscopy techniques for material identification from fire debris. *Vib Spectrosc* 2013, 68, 225–235.
108. Doty, K. C., Muro, C. K., Bueno, J., Halámková, L., & Lednev, I. K. (2016). What can Raman spectroscopy do for criminalistics?. *Journal of Raman Spectroscopy*, 47(1), 39–50.
109. González-Rodríguez, J.; Sissons, N., Robinson, S. Fire debris analysis by raman spectroscopy and chemometrics. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2011, 91, 210–218.
110. Yadav, V. K., Nigam, K., & Srivastava, A. (2020). Forensic investigation of arson residue by infrared and Raman spectroscopy: From conventional to non-destructive techniques. *Medicine, Science and the Law*, 60(3), 206–215.
111. Choi, S., & Yoh, J. J. (2017). Fire debris analysis for forensic fire investigation using laser induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 134, 75–80.
112. Fettig, I., Krüger, S., Deubel, J. H., Werrel, M., Raspe, T., & Piechotta, C. (2014). Evaluation of a headspace solid-phase microextraction method for the analysis of ignitable liquids in fire debris. *Journal of forensic sciences*, 59(3), 743–749.
113. Godet, M., Loisel, C., Vergès-Belmin, V., Menguy, N., Chabas, A., Verney-Carron, A., & Azéma, A. (2024). Multi-scale characterization of lead-rich deposited particles originating from the fire of Notre-Dame de Paris. *Science of The Total Environment*, 946, 174309.
114. Hong, H., Xie, D., Duo, S., & Wang, W. (2020). Investigating the oxidation behavior of carbon steel in fire scene: A new method for fire investigations. *ScienceAsia*, 46(1), 59–64.

115. Zhenping, Y. (2007). Determination of fused traces caused by primary or secondary short-circuits using optical microscopy. *Fujian Analysis and Testing*, 16(2), 46.
116. Smijs, T., Galli, F., & van Asten, A. (2016). Forensic potential of atomic force microscopy. *Forensic Chemistry*, 2, 93–104.
117. Aliaño-González, M. J., Ferreiro-González, M., Barbero, G. F., Palma, M., & Barroso, C. G. (2018). Application of headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry for the determination of ignitable liquids from fire debris. *Separations*, 5(3), 41.
118. Sigman, M. E., Williams, M. R. Assessing evidentiary value in fire debris analysis by chemometric and likelihood ratio approaches. *Forensic Sci. Int.* 2016, 264, pp. 113–121.
119. Woolfenden, E. (2021). Thermal desorption gas chromatography. In *Gas chromatography*, 267–323. Elsevier.
120. Fabritius, M. M., Broillet, A., König, S., & Weinmann, W. (2018). Analysis of volatiles in fire debris by combination of activated charcoal strips (ACS) and automated thermal desorption–gas chromatography–mass spectrometry (ATD/GC–MS). *Forensic science international*, 289, 232–237.
121. Sambhi, S. (2018, October). Thermal imaging technology for predictive maintenance of electrical installation in manufacturing plant – a literature review. In *2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES-2018)*.
122. Вишняков В. Ю., Ткачук П. А. Особливості методів визначення температурних аномалій за даними ДЗЗ MODIS (TERRA) та AVHRR (NOAA). Оцінки їх якості. Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. пр. К., 2012. Вип. 10. С. 81–90.
123. Balakrishnan, G. K., Yaw, C. T., Koh, S. P., Abedin, T., Raj, A. A., Tiong, S. K., & Chen, C. P. (2022). A review of infrared thermography for condition-based monitoring in electrical energy: Applications and recommendations. *Energies*, 15(16), 6000

124. Jiaqing, Z., Yubiao, H., Xinjie, Q., & Taiyun, Z. (2024). A review on fire research of electric power grids of China: state-of-the-art and new insights. *Fire Technology*, 60(2), 1027–1076.
125. Ljungkvist E., Thomsen, B. (2019). Interpretation of a fire scene with ultra violet light: an assessment of the possible utilisation of ultra violet light at fire scene and subsequent recommendations for procedures. *Forensic Sc Int*, 297, 284–292.
126. Xu, X., Zhang, T., & Li, M. (2021). Ultrasonic wave propagation analysis for fire-damaged concrete: A case study. *Journal of Building Performance*, 12(3), 122–132.
127. Osumi, A., Enomoto, M., & Ito, Y. (2014). Basic study of an estimation method for fire damage within concrete sample using high-intensity ultrasonic waves and optical equipment. *Japanese Journal of Applied Physics*, 53(7S), 07KC16.
128. Truong, C. T., Nguyen, T. H., Vu, V. Q., Do, V. H., & Nguyen, D. T. (2023). Enhancing fire detection technology: A UV-based system utilizing fourier spectrum analysis for reliable and accurate fire detection. *Applied Sciences*, 13(13), 7845.
129. Guo, J., Shang, H., Cai, G., Jin, Y., Wang, K., & Li, S. (2023). Early detection of coal spontaneous combustion by complex acoustic waves in a concealed fire source. *ACS omega*, 8(19), 16519–16531.
130. Luo, R. C., Lin, S. Y., & Su, K. L. (2003, August). A multiagent multisensor based security system for intelligent building. In *Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, MFI2003. 311–316. IEEE.
131. Růžicková, J., Raclavská, H., Kucbel, M., Raclavský, K., Šafář, M., & Švédová, B. (2018). The possibilities to identify combusted fuel based on an analysis of ash from local heating. *Journal of Environmental Management*, 219, 269–276.
132. Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Ltd., New York. 2011. doi: 10.1002/9781119975465.

133. Lees F. P. Loss prevention in the process industries. 4th Edition. 2012. Vol. 2. doi: 10.1016/C2009-0-24104-3.

134. Basmanov O., Kulik Y. Identifying the convective heat transfer coefficient of the tank wall in the case of dike fire // Problems of fire safety. 2017. Vol. 41. P. 31-37. Available online: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/1023/1/Basmanov_Kulik.pdf.

135. Neshpor Oleh Optimization of the technology for designing sensitive gas sensors based on zinc oxide using a sol-gel method / Neshpor Oleh; Deyneko Natalya; Ponomarenko Roman; Maiboroda Artem; Kropyva Mykhaylo; Blyashenko Oleg; Yeremenko Serhii; Sydorenko Volodymyr; Servatyuk Vasyly; Pruskyi Andrii // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* T. 4, B. 5-118, С. 30 – 36 . 2022 (Scopus).

136. Нешпор О.В. Алгоритм застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Щербак О.С., Нешпор О.В., Дерев'янка О.А., Єременко С.А., Шевченко Р.І. // *Комунальне господарство міст*, 2023, том 4, випуск 178. С.179- 187 ISSN 2522-1809(Print); ISSN2522-1817 (Online)

137. Нешпор О.В. Методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Щербак О.С., Дерев'янка О.А., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // *Комунальне господарство міст*, 2023, том 1, випуск 175. С.105- 111 ISSN 2522-1809(Print); ISSN2522-1817 (Online)

138. Нешпор О.В. Розробка засобу автоматизації проектування шлейфів пожежної сигналізації з оптимізованим складом / Антошкін О.А., Нешпор О.В. // *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: НУЦЗУ, 2023. Вип. 37 (1). С. 203-218.

139. Нешпор О.В. Формування алгоритму інформаційно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій на територіях, що зазнали ракетно-артилерійських уражень / Рашкевич Н.В., Нешпор О.В., Шевченко Р.І.

// Комунальне господарство міст, 2024, том 1, випуск 175. С.105 - 111 ISSN 2522-1809(Print); ISSN2522-1817 (Online)

140. Нешпор О.В. Аналіз небезпек та постановка завдання з дослідження ефективності інноваційних засобів гасіння пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Гадир В.О., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // Матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2024» («Fire Safety Issues 2024»). – Х.: НУЦЗ України, 2024. С. 25-26.

141. Нешпор О.В. До питання організації процедури виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Щербак О.С., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням. Матеріали круглого столу. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2023. С. 82-83.

142. Нешпор О.В. Інформаційні технології у питаннях попередження надзвичайних ситуацій внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури /Вовчук Т.С., Нешпор О.В., Шевченко Р.І.// Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2023. С. 229.

143. Нешпор О.В. До питання підвищення ефективності протипожежного захисту розподільних пристроїв електричних мереж/ Нешпор О.В., Єременко С.А., Христич В.В // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022»). – Х.: НУЦЗ України, 2022. – 40-41 с.

144. Нешпор О.В. До питання актуалізації досліджень з попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з вибухом вибухонебезпечних предметів в місцях масового перебування людей / П. Корчагін, О. Нешпор, І. Ячна, Р.Шевченко // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. – Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. – С. 43.

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

A1. **Neshpor Oleh** Optimization of the technology for designing sensitive gas sensors based on zinc oxide using a sol-gel method / Neshpor Oleh; Deyneko Natalya; Ponomarenko Roman; Maiboroda Artem; Kropyva Mykhaylo; Blyashenko Oleg; Yeremenko Serhii; Sydorenko Volodymyr; Servatyuk Vasyly; Pruskyi Andrii // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* Т. 4, В. 5-118, С. 30 – 36 . 2022 (Scopus).

(Здобувачу особисто належать аналіз літературних та інформаційних джерел та формування логічних зав'язків інформаційної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту)

A2. **Нешпор О.В.** Алгоритм застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Щербак О.С., Нешпор О.В., Дерев'янка О.А., Єременко С.А., Шевченко Р.І. // *Комунальне господарство міст*, 2023, том 4, випуск 178. С.179- 187 ISSN 2522-1809(Print); ISSN2522-1817 (Online)

(Здобувачу особисто належать розробка алгоритму застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури та отримання практичних рекомендацій)

A3. **Нешпор О.В.** Методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Щербак О.С., Дерев'янка О.А., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // *Комунальне господарство міст*, 2023, том 1, випуск 175. С.105- 111 ISSN 2522-1809(Print); ISSN2522-1817 (Online)

(Здобувачу особисто належать розробка Методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури)

А4. Нешпор О.В. Розробка засобу автоматизації проектування шлейфів пожежної сигналізації з оптимізованим складом / Антошкін О.А., Нешпор О.В. // Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗУ, 2023. Вип. 37 (1). С. 203-218.

(Здобувачу особисто належать розробка рівнянь математичної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури)

А5. Нешпор О.В. Формування алгоритму інформаційно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій на територіях, що зазнали ракетно-артилерійських уражень / Рашкевич Н.В., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // Комунальне господарство міст, 2024, том 1, випуск 175. С.105 - 111 ISSN 2522-1809(Print); ISSN2522-1817 (Online)

(Здобувачу особисто належать практичні рекомендації з впровадження інформаційно-технічних підходів з підвищення безпеки об'єктів критичної інфраструктури та територій під час воєнного стану)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

А6. Нешпор О.В. Аналіз небезпек та постановка завдання з дослідження ефективності інноваційних засобів гасіння пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Гадир В.О., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // Матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2024» («Fire Safety Issues 2024»). – Х.: НУЦЗ України, 2024. С. 25-26.

(Здобувачу особисто належать аналіз інноваційних засобів з дослідження ефективності протипожежного захисту та гасіння пожеж на об'єктах критичної інфраструктури)

А7. Нешпор О.В. До питання організації процедури виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури / Щербак О.С., Нешпор О.В., Шевченко Р.І. // Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням. Матеріали круглого столу. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2023. С. 82-83.

(Здобувачу особисто належать розробка блоку процедур методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури)

А8. Нешпор О.В. Інформаційні технології у питаннях попередження надзвичайних ситуацій внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури /Вовчук Т.С., Нешпор О.В., Шевченко Р.І.// Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2023. С. 229.

(Здобувачу особисто належать аналіз можливостей сучасних інформаційних технологій у питаннях попередження надзвичайних ситуацій внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури)

А9. Нешпор О.В. До питання підвищення ефективності протипожежного захисту розподільних пристроїв електричних мереж/ Нешпор О.В., Єременко С.А., Христич В.В // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022»). – Х.: НУЦЗ України, 2022. – 40-41 с.

(Здобувачу особисто належать розробка практичних рекомендацій з підвищення протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури на прикладі розподільних пристроїв електричних мереж)

А10. Нешпор О.В. До питання актуалізації досліджень з попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з вибухом вибухонебезпечних предметів в місцях масового перебування людей / П. Корчагін, О. Нешпор, І. Ячна, Р.Шевченко // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XIV

Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. – С. 43

(Здобувачу особисто належать розробка практичних рекомендацій з підвищення протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури з масовим перебуванням людей)

Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник 6 ДПРЗ

ГУ ДСНС України у Харківській області

Олександр КОВАЛЕВСЬКИЙ

" 24 "

2025



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів отриманих в ході виконання дисертаційних досліджень
Нешпора Олега Валерійовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за темою: «Підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів
критичної інфраструктури за рахунок експертизи джерел виникнення пожеж»

Комісія у складі: голови – голови – заступника начальника загону з питань організації служби та оперативного реагування 6 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Харківській області Антона МЕЛЬНИКА; членів комісії: т.в.о. заступника начальника 6 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Харківській області Вадима ТАМАШЕВСЬКОГО, начальника 28 ДПРЧ 6 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Харківській області Олега САМОЙЛЕНКА склала цей акт про те, що нові практичні результати, одержані особисто Нешпором Олегом Валерійовичем в ході виконання дисертаційних досліджень за темою: «Підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок експертизи джерел виникнення пожеж» у вигляді: нової інформаційної моделі підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури за рахунок технічної експертизи поверхні приміщень які зазнали впливу негативних факторів пожежі, яка складається з двох контурів управління загального контуру (традиційного) і оперативного контуру, який спирається на сучасні технічні досягнення в області експертизи пожеж та їх наслідків. Модель дозволяє оцінити розміри осередку пожежі та реконструювати хід розвитку пожежі та дій з її локалізації.

Голова комісії:

Заступник начальника загону

з питань організації служби

та оперативного реагування 6 ДПРЗ

ГУ ДСНС України у Харківській області

Антон МЕЛЬНИК

Члени комісії:

Т.в.о. заступника начальника 6 ДПРЗ

ГУ ДСНС України у Харківській області

Вадим ТАМАШЕВСЬКИЙ

Начальник 28 ДПРЧ 6 ДПРЗ

ГУ ДСНС України у Харківській області

Олег САМОЙЛЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник 1 ДПРЗ

ГУ ДСНС України
у Харківській області

Сергій ПАТЛАХ

16.03 2025

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів отриманих в ході виконання дисертаційних досліджень
Нешпора Олега Валерійовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за темою: «Підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів
критичної інфраструктури за рахунок експертизи джерел виникнення пожеж»

Комісія у складі: голови – начальника 6 ДПРЧ 1 ДПРЗ ГУ ДСНС України
у Харківській області Івана ГОРЕЛКІНА; членів комісії: заступника начальника
6 ДПРЧ 1 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Харківській області Анатолія ЯСКОВЦЯ,
заступника начальника з реагування на НС 6 ДПРЧ 1 ДПРЗ ГУ ДСНС України
у Харківській області Романа ВЕРХОВЕНКА склала цей акт про те, що нові
практичні результати, одержані особисто Нешпором О.В., у межах
дисертаційних досліджень у вигляді нової методики виявлення осередкових
ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної
інфраструктури, яка складається з трьох блоків процедур, а саме: блоку
процедур проведення вимірювань на об'єкті критичної інфраструктури, блоку
процедур статистичної обробки результатів вимірювання, блоку процедур
реконструкції пожежі введена у практичну діяльність.

Голова комісії:

Начальник 6 ДПРЧ 1 ДПРЗ

ГУ ДСНС України

у Харківській області

Іван ГОРЕЛКІН

Члени комісії:

Заступник начальника

6 ДПРЧ 1 ДПРЗ ГУ ДСНС

України у Харківській області

Анатолій ЯСКОВЕЦЬ

Заступник начальника

з реагування на НС 6 ДПРЧ 1 ДПРЗ

ГУ ДСНС України у Харківській області

Роман ВЕРХОВЕНКО