

О.С. Щербак<sup>1</sup>, О.В. Нешпор<sup>2</sup>, О.А. Дерев'янка<sup>1</sup>, С.А. Єременко<sup>2</sup>, Р.І. Шевченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України, Україна

<sup>2</sup>Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

## АЛГОРИТМ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ ВИЯВЛЕННЯ ОСЕРЕДКОВИХ ОЗНАК НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

*Робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання у сфері цивільного захисту, а саме розробці алгоритму застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури. Наведені рекомендації з практичного застосування методики, як основи методу неруйнівного контролю процесів запобігання надзвичайних ситуацій внаслідок пожежі терористичного характеру на об'єктах критичної інфраструктури України.*

**Ключові слова:** надзвичайна ситуація, об'єкт критичної інфраструктури, методика, осередкові ознаки, термічне ураження.

### Постановка проблеми

Збитки, які виникають під час пожежі, залежать не тільки від тривалості горіння, але й від багатьох інших факторів і умов, пов'язаних з розвитком пожежі, починаючи з температурного режиму в зоні горіння. Звичайно, розвиток температури пов'язаний не тільки з фактором часу. Температура в окремій зоні пожежі також залежить від кількості і природи горючих матеріалів, що знаходяться в цій зоні, умов їх горіння, особливостей газообміну (надходження повітря), що визначається розвитком конвекції та вогнегасних властивостей. Усе це визначатиме умови та причини виникнення пожежі, утворення локалізованих осередків горіння або окремих, краще збережених ділянок зони пожежі. Слід зазначити, що навіть в осередку пожежі можливі мінімальні збитки через архітектурно-конструкційні особливості будівлі.

Питання отримання об'єктивних даних, необхідних для визначення джерела пожежі та способів її поширення, залишається першочерговим, особливо в надзвичайних ситуаціях, спричинених пожежами, коли фізичний стан предметів неможливо перевірити, оскільки вони були знищені або переміщені під час ліквідації надзвичайної ситуації. Відкладення кіптяви на конструкціях і предметах є практично при всіх пожежах - як в зоні горіння, так і в зоні задимлення. Така ситуація дозволяє розглядати сажу як перспективний об'єкт експертних досліджень у процесі моніторингу надзвичайних ситуацій, які виникли у наслідок пожежі. В даний

час кіптява використовуються як об'єкти дослідження вкрай обмежено, хоч є дуже важливим джерелом криміналістичної інформації про надзвичайні пожежі. Тому формування чітких алгоритмів застосування методів виявлення осередкових ознак при пожежах критичної інфраструктури є актуальним завданням цивільного захисту.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нижче наведено аналіз сучасних публікацій за напрямками досліджень. Так у роботі [1] автори розглянули статистику основних надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами в містах, надали детальний перелік причин пожеж, типи пошкоджень залізобетонних конструкцій та критичної інфраструктури, а також запропонували дослідження різних експериментальних підходів до вогнестійкості структурних компонентів і ролі чисельного моделювання для надання більш детальної інформації щодо кількісної оцінки полів температури та теплового потоку.

У роботі [2] автори розглядають вплив екстремальних теплових умов, що виникають під час лісових пожеж, на об'єкти критичної інфраструктури в залежності від типу їх будівництва.

У статті [3] автори розглянули проблему впливу умов експлуатації на функціональну надійність систем пожежної сигналізації при виникненні несприятливих умов у будівлях критичної інфраструктури.

У результаті проведеного дослідження [4] авторами представлено алгоритм моделювання

поведінки залізобетонних конструкцій об'єктів критичної інфраструктури при теплових навантаженнях на основі поєднання теплового та структурного аналізу.

Автори статті [5] провели критичний огляд сучасних протипожежних заходів та їх застосування при вирішенні питань, пов'язаних з пожежною безпекою в критичній інфраструктурі.

У статті [6] представлено огляд стійкості міської критичної інфраструктури до впливу факторів пожежної безпеки.

У роботі [7] наведено результати обстеження пошкоджень бетонних конструкцій після пожеж, де в рамках дослідницької програми авторами проведено прикладне дослідження існуючих процедур та літератури для оцінки тунелів як об'єктів критичної інфраструктури.

У статті [8] представлено пожежну проблему критичної транспортної інфраструктури, такої як мости, шляхопроводи та тунелі, наведено масштаби пожежної проблеми та збільшення проблем пожежі на мостах і тунелях за останні роки.

У дослідженнях [9, 10] оцінка аварійних ситуацій, викликаних пожежею, проводилася за допомогою методів неруйнівного контролю.

Аналіз результатів, отриманих у цитованих роботах, показує, що розробка методу запобігання терористичним інцидентам у критичній інфраструктурі на сьогоднішній день залишається невирішеним науковим завданням у сфері цивільного захисту, а перед цим слід розробити метод виявлення пожеж у об'єкти критичної інфраструктури України. Ознаки вогнища, що призводять до надзвичайних ситуацій. Це завдання було розглянуто в попередній публікації [11].

Відповідно наступним кроком є формування алгоритму практичного використання наведеної методики та розробка дієвих рекомендацій, що і є основним завданням наведеного нижче дослідження.

### Формулювання мети статті

Розробка алгоритму застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури. Для вирішення поставленої мети необхідно:

1. Визначити процедуру проведення вимірювань на об'єкті критичної інфраструктури, який підпав під вплив пожежі;
2. Визначити процедуру статистичної обробки результатів вимірювання;
3. Визначити процедуру реконструкції пожежі;

4. Надати рекомендації з практичного застосування методики під час реконструкції подій, що привели до виникнення надзвичайної ситуації на об'єкті критичної інфраструктури.

### Виклад основного матеріалу

**Опис процедури проведення вимірювань на об'єкті критичної інфраструктури.** Вимірювання опору шару сажі проводять на поверхні будь-якого матеріалу з діелектричними властивостями (бетон, штукатурка, плитка тощо), бажано на однотипній поверхні. Якщо на поверхні, де осідала кіптява до пожежі, був бруд, вона буде виступати під шаром кіптяви у вигляді нерівностей поверхні. Опір не слід вимірювати на таких поверхнях.

Для визначення місця вимірювання можна використовувати рулетку, металеву лінійку 0,5-1,0 метра, вимірювальну голку або лазерний далекомір (рис. 1). Точкову розмітку невеликих приміщень - до 20 м<sup>2</sup> з висотою стелі 2,2-2,7 м можна зробити за допомогою рулетки або металевої лінійки.



Рис. 1. Дослідження кіптяви в осередку пожежі за допомогою датчиків горизонтальної поверхні та нанесення лазерних позначок на стіни

У великих приміщеннях з високою стелею для позначення точок на стелі можна використовувати мірну палицю – спеціальний інструмент для вимірювання висоти предметів, що нагадує телескопічну палицю. Щоб використовувати його, ви повинні розмітити точки на підлозі, встановити кілочок у певному місці на підлозі та перемістити його, щоб торкнутися стелі. Вимірюється точне розташування дюбеля, який торкається стелі. Для розмітки точок вимірювання електричного опору найпрактичніше використовувати лазерний далекомір - легкий, компактний прилад розміром не більше 190x70x50 мм, вагою не більше 450 г, призначений для вимірювання відстаней, площ і кутів. нахил, а також інші геометричні вимірювання.

Максимальна помилка під час вимірювання відстаней становить  $\pm 5$  мм. Щоб використовувати лазерний далекомір, необхідно розмітити точки вимірювань на плані місця пожежі, визначити

відстані між ними, знайти базову точку, виміряти 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 [11]. 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 до відповідної таблиці.

**Опис процедури статистичної обробки результатів вимірювання.** 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:

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

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

Оцінка дисперсії результатів вимірів проводиться за формулою:

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

Середньоквадратичне відхилення визначається за такою формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - R_{CP})^2}. \quad (3)$$

Коефіцієнт варіації визначається за формулою:

$$\vartheta = \frac{\sigma}{R_{CP}} * 100\%. \quad (4)$$

Довірчі інтервали для математичного очікування та середньоквадратичного відхилення розраховуються для довірчої ймовірності:

$$\beta = 0,99 \quad (\alpha = 1 - \beta = 0,01). \quad (5)$$

Довірчий інтервал для середнього значення електроопору:

$$R_m - \gamma \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < R_m < R_m + \gamma \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

де  $\gamma$  – значення коефіцієнта Стюдента для відомих значень  $n$  та  $\alpha$ .

Довірчий інтервал для середньоквадратичного відхилення визначається за формулою:

$$\gamma_1 \sigma < \sigma < \gamma_2 \sigma, \quad (7)$$

де  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  - табличні значення для  $\chi^2$  - розподілу, що визначаються для відомих  $n$  та  $\beta$ .

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  $lg(R_{cp})$ , як-то наприклад -табл. 1.

Таблиця 1  
Десяткові логарифми електричного опору кіптяви  $lg(R \cdot 10^{-6})$  для приміщення об'єкту критичної інфраструктури

№ 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 десятикових 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.

Процедура здійснюється у наступному порядку.

Розраховується кількість інтервалів між ізолініями за формулою:

$$J = \frac{\lg(R'_{\max}) - \lg(R'_{\min})}{s}, \quad (8)$$

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

Значення  $\lg(R_{sp})$  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.

Осередки таблиці, які відповідають точкам, у яких виміри не проводилися, залишаються порожніми. На жаль технічно, 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:

$$\lg(R) = \lg(R'_{\max}) + s/2. \quad (9)$$

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 вдається далеко не завжди (закопчена поверхня може бути не прямокутною, окремі точки можуть бути недоступні для вимірювань або кіптява в них може бути відсутня) [11].

**Опис процедури реконструкції пожежі.** Дані електричного опору шару кіптяви в різних зонах пожежі можуть бути об'єктивними і дати можливість диференціювати нагрівальні властивості смердючих конструкцій і предметів.

Ці фактори необхідно враховувати під час інтерпретації даних. Області максимального підвищення температури характеризуються найменшим ступенем опору шару сажі електричному струму.

Ці ділянки переважно розташовані над центром полум'я, якщо сажа не повністю витрачена, а також на шляхах первинних потоків конвекції від вогню. У рідкісних випадках осередки горіння, пов'язані з концентрованою вогняною кулею, також демонструють ознаки активності.

На конструкціях та інших об'єктах навколо пожежі осередкова зона також може призвести до повного згорання сажі. У цьому випадку шляхи конвективних потоків з вогнища виявляються шляхом вивчення відкладень сажі поза зоною горіння.

Зони первинного руху основних ароматизаторів продуктів згорання характеризуються збільшенням електричного опору сажі від центру згорання до вихлопів. Електричний опір шару сажі на периферійних ділянках поза цими ділянками значно більший і може відрізнятись на один-два порядки (часто більше). Наприклад, електричний опір сажі на 103/100 Ом вище, ніж у фокальній області та первинному шляху потоку диму від каміна, і на  $10^6 = 10$  Ом на периферійних областях. На величину електричного опору сажі впливає спосіб горіння на одній або кількох ділянках. Якщо значення, виміряне безпосередньо над досліджуваною ділянкою, перевищує 101/111 Ом, це означає, що область не горіла інтенсивно, а процес був повільний.

Тривалий процес димлення пожежної навантаги в умовах недостатнього повітрообміну може призвести до утворення товстого шару жирної кіптяви на стелі та у верхній частині стін, іноді це має явний зв'язок з рідкою фазою або краплеподібні плями.

Причина пожежі очевидна, виходячи або з низького значення електричного опору, або навпаки, з аналізу шару сажі, який є досить товстий і містить велику кількість екстрактивних речовин. Оскільки цей метод є неруйнівним, то

немає обмежень щодо його застосування під час огляду місця пожежі експертами та слідчими на етапі перевірки фактів пожежі.

Остаточні висновки про походження пожежі можна зробити лише за допомогою технічної експертизи комплексу наявної інформації про пожежу. Де до наявної інформації додається також інша інформація щодо електричного опору сажі: результати візуального огляду зони пожежі; результати інших інструментальних методів (основних і додаткових); непрямі ознаки пожежі; показання свідків, а також інша доречна інформація, розглянута в спеціальній літературі.

**Рекомендації з практичного застосування методики.** Для формування практичних рекомендацій розглянемо наслідки пожежі яка відбулася у м. Харкові у липні 2021 в приміщенні одноповерховому будинку. Внаслідок пожежі вогнем було пошкоджено меблі, скління зруйновано, одного постраждалого відправлено до лікарні у важкому стані, у приміщенні знайдено тіло чоловіка з опіками.

Характер пошкоджень предметів обстановки не дав можливості для встановлення осередку пожежі візуальним оглядом, оскільки частина предметів була знищена вогнем, частина викинута у вікно при гасінні. Стеля приміщення мала рівномірний шар кіптяви по всій площі. За словами свідків, пожежу було виявлено о 2 год. 30 хв. у початковій стадії по виходу диму через квартиру у вікні приміщення, проте на момент початку гасіння площа пожежі становила половину площі приміщення.

Схема приміщення з нанесеними точками, в яких проводилося вимірювання електроопору кіптяви, наведено на рис. 2.

		Назва рядів по горизонталі							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Площа приміщення	1-1	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1	7-1	8-1	
	2-2	3-2	4-2	5-2	6-2	7-2	8-2		
	3-3	4-3	5-3	6-3	7-3	8-3			
	4-4	5-4	6-4	7-4	8-4				
	5-5	6-5	7-5	8-5					
	6-6	7-6	8-6						
	7-7	8-7							
	8-8								
	9-9								
	10-10								

Рис. 2. Схема приміщення з нанесеною сіткою (точки вимірювання електроопору кіптяви)

Дослідження проводили на стелі приміщення. Результати, отримані при вимірюванні електричного опору кіптяви за пропонованою методикою, наведено в табл. 2.

Далі була проведена статистична обробка результатів вимірювань та розрахований десятковий логарифм (табл. 3).

Таблиця 2

Результати вимірювання електричного опору шару кіптяви

№	Пит.	Вимірювання електричного опору, МОм				
		1	2	3	4	5
1-1	Серед	2000,0	2100,0	2100,0	2000,0	1900,0
1-2	-	400,0	410,0	420,0	430,0	410,0
1-3	-	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
1-4	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1-5	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1-6	-	100,0	110,0	120,0	130,0	150,0
1-7	-	1000,0	1100,0	1200,0	1300,0	1400,0
1-8	-	2000,0	2100,0	2100,0	2000,0	2000,0
1-9	-	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1-10	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1-11	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1-12	-	100,0	210,0	300,0	400,0	500,0
1-13	-	1000,0	1100,0	1200,0	1300,0	1400,0
1-14	-	1200,0	1300,0	1400,0	1500,0	1600,0
1-15	-	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0	3000,0
1-16	-	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
1-17	-	40,0	41,0	42,0	43,0	40,0
1-18	-	50,0	51,0	52,0	53,0	50,0
1-19	-	200,0	210,0	210,0	200,0	200,0
1-20	-	1500,0	1600,0	1600,0	1500,0	1500,0
4-1	-	2000,0	2100,0	2100,0	2000,0	2000,0
4-2	-	2000,0	2000,0	2100,0	2000,0	2000,0
4-3	-	100,0	110,0	120,0	130,0	110,0
4-4	-	81,0	81,0	82,0	83,0	82,0
4-5	-	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
4-6	-	250,0	240,0	240,0	250,0	240,0
4-7	-	1000,0	1100,0	1000,0	1000,0	1000,0
3-3	-	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
3-4	-	120,0	110,0	120,0	110,0	110,0
3-5	-	70,0	71,0	72,0	73,0	70,0
3-6	-	120,0	210,0	320,0	210,0	210,0
3-7	-	100,0	110,0	100,0	100,0	100,0
6-4	-	1500,0	1400,0	1300,0	1400,0	1400,0

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 Стьюдента 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:

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

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

Таблиця 3  
Результати статистичної обробки даних вимірювань електричного опору шару кіптяви

№	Значення середньоквадратичного відхилення електричного опору МОм	Середньо-квадратичне відхилення, МОм	Коефіцієнт варіації, %	Межа довірчого інтервалу для середньоквадратичного відхилення, МОм		Межа довірчого інтервалу для середньоквадратичного відхилення, МОм		lg(R · 10 <sup>-6</sup> )
				нижня	верхня	нижня	верхня	
1-1	2020,0	83,67	4,14	1847,73	2192,27	25,16	1246,62	3,31
1-2	412,0	8,37	2,03	394,77	429,23	2,51	124,66	2,61
1-3	5,81	0,81	1,77	4,88	5,24	0,03	1,33	0,70
1-4	1,11	0,87	6,43	0,95	1,25	0,02	1,03	0,04
1-5	5,81	0,81	1,65	4,91	5,25	0,03	1,23	0,71
1-6	154,0	5,41	3,56	142,72	165,28	1,64	81,81	2,19
1-7	1100,0	181,0	9,09	894,10	1305,90	30,0	1491,0	3,04
2-1	2000,0	71,71	3,54	1854,41	2145,59	21,21	1053,99	3,10
2-2	584,0	11,40	2,26	480,52	527,48	3,42	188,89	2,70
2-3	5,81	0,11	2,18	4,79	5,25	0,03	1,61	0,70
2-4	5,81	0,81	1,67	4,83	5,19	0,03	1,23	0,70
2-5	5,81	0,85	1,88	4,95	5,17	0,02	1,82	0,70
2-6	288,0	7,87	3,54	185,44	214,56	3,12	185,16	2,10
2-7	848,0	89,44	10,52	775,84	1144,16	26,83	1352,70	2,98
3-1	1160,0	54,77	4,72	1047,23	1272,77	16,43	816,11	3,06
3-2	848,0	54,77	5,71	847,23	1072,77	16,43	816,11	2,98
3-3	61,40	0,55	0,91	59,27	61,53	0,16	1,16	1,78
3-4	41,60	0,85	2,20	38,76	42,44	0,27	13,33	1,61
3-5	51,1	0,71	1,39	49,54	52,46	0,21	10,54	1,71
3-6	214,0	5,41	2,68	192,72	215,28	1,64	81,81	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	15,42	666,35	3,31
4-3	582,0	8,37	1,67	484,77	519,23	2,51	124,66	2,70
4-4	81,80	0,84	1,35	60,08	63,52	0,25	12,47	1,79
4-5	81,80	0,84	1,38	59,08	62,52	0,25	12,47	1,78
4-6	244,0	5,41	2,24	232,72	255,28	1,64	81,81	2,39
4-7	1020,0	44,72	4,38	927,92	1112,08	13,42	666,35	3,01
5-1	848,0	54,77	5,83	827,23	1052,77	16,43	816,11	2,97
5-4	514,0	5,41	1,07	502,72	525,28	1,64	81,81	2,71
5-5	71,20	0,84	1,18	69,48	72,92	0,25	12,47	1,83
5-6	214,0	5,41	2,50	202,72	225,28	1,64	81,81	2,31
5-7	696,0	8,84	1,29	677,58	714,42	2,69	133,27	2,84
6-4	1440,0	54,77	3,80	1327,23	1552,77	16,43	816,11	3,16
6-5	848,0	54,77	5,83	827,23	1052,77	16,43	816,11	2,97
6-6	96,1	5,41	5,71	84,72	107,28	1,64	81,81	1,98

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 проводилася 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.4.

Приклад таблиці комп'ютерної програми Microsoft Excel для кімнати наведено у табл. 5.

Таблиця 4  
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

Таблиця 5  
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	5,31	5,30	3,08	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	3,29	2,37	2,71
6	2,19	2,30	2,31	2,39	2,33	1,98	2,0		
7	5,04	2,98	1,19	3,01	2,84	2,70	2,71		
8						3,29	3,30	3,29	3,29

Значення десяткового логарифму для порожніх осередків у табл. 5.

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

За допомогою комп'ютерної програми Microsoft Excel була побудована контурна діаграма (рис. 3), яка відображає картину розподілу значень електроопору кіптяви для приміщення.

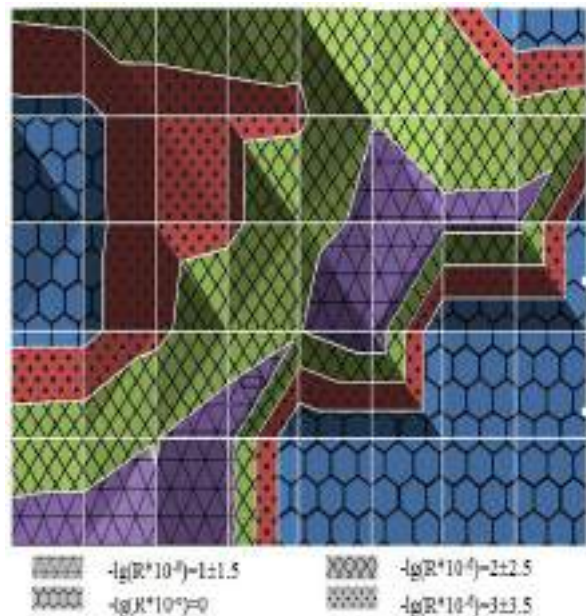


Рис. 3. Логарифмічний розподіл ділянок електричного опору шару кіптяви по стелі приміщення

На схемі видно, що дійсно основний конвективний потік значний час проходив від вікна

до дверей приміщення. З отриманих результатів отримуємо, що зона найменших значень електроопору кіптяви ( $R = 1,10$  МОм) знаходиться в приміщенні, біля вікна та у наслідок поширення пожежі біля правої стіни (рис. 3). У міру віддалення від цієї стіни електроопір кіптяви послідовно зростає аж до  $R = 2060$  МОм. На (рис. 3) видно слід конвективного потоку у напрямку до дверей. Вище зазначалося, що пожежу було виявлено після виходу диму саме з цього вікна. Таким чином, можна констатувати, що осередок пожежі розташовувався поруч із вікном кімнати. З осередку конвективні потоки поширилися через двері до коридору та суміжного приміщення. У осередковій зоні в ході огляду місця пожежі було виявлено саморобний електричний обігрівач на основі ніхромового дроту, включеного в електромережу 220 В. Порушення правил експлуатації електроприладів призвело до виникнення пожежі на об'єкті.

### Висновки

Таким чином, алгоритм застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури складається з трьох процедур, а саме: процедури проведення вимірювань на об'єкті критичної інфраструктури, процедури статистичної обробки результатів вимірювання, процедури реконструкції пожежі.

Отримані загальні пропозиції можна звести до наступного. Зокрема, ми спостерігаємо, що величина електричного опору сажі залежить від способу горіння в тій чи іншій області. Якщо значення, зафіксоване безпосередньо над досліджуваною областю, було більшим за  $1010 \div 1011$  Ом, це означало б, що полум'я області було недостатньо інтенсивним, щоб викликати горіння досліджуваної області, горіння області відбувалося б в результаті тління. Тривале димлення пожежної навантаги в умовах недостатнього повітрообміну може призвести до утворення товстого шару жирної кіптяви на стелі та у верхній частині стін, іноді це має явний зв'язок з рідкою фазою або краплеподібні плями. Це помітно в невеликих приміщеннях, які не провітрюються. Якщо рух горіння відбувається від цих початкових точок до більшого простору з більш ефективним повітряним сполученням, і якщо відбувається полум'яне горіння, то сформована картина електричного опору в першу чергу відображатиме розвиток полум'яного горіння.

Таким чином, трактування результатів вимірювання електроопору обов'язково має супроводжувати аналіз особливостей об'ємно-планувальних рішень будівлі (приміщення), умов повітрообміну, розподілу пожежної навантаги.

Отримані результати дослідження кіптяви можуть бути використані в межах пожежно-технічної експертизи для реконструкції процесу виникнення та розвитку горіння, у тому числі для встановлення осередку пожежі, як причини надзвичайної ситуації.

### Література

1. Ibrahimbegovic, A., Boulkertous, A., Davenne, L., Muhasilovic, M., Duhovnik, J. & Pokrklic, A., (2009). *Fire Induced Damage in Structures and Infrastructure: Analysis, Testing and Modeling January 2009 NATO. Security through Science Series C: Environmental Security. Damage Assessment and Reconstruction after War or Natural Disaster*, 309-329 DOI: [http://doi.org/10.1007/978-90-481-2386-5\\_12](http://doi.org/10.1007/978-90-481-2386-5_12)
2. Papalou, A., Baros, K., (2019). *Assessing Structural Damage after a Severe Wildfire: A Case Study Department of Civil Engineering, University of Peloponnese; 26334 Patras, Greece. Buildings, 9(7), 171* DOI: <http://doi.org/10.3390/buildings9070171>
3. 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;* DOI: <http://doi.org/10.3390/en14237893>
4. Aliş, B., Yazıcı, C., & Özkal, F.M., (2022). *Investigation of Fire Effects on Reinforced Concrete Members via Finite Element Analysis ACS Omega 2022, 7(30), 26881–26893* DOI: <http://doi.org/10.1021/acsomega.2c03414>
5. Kodur, V., Kumar, P., & Rafi, M.M., *Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety. PSU Research Review. DOI: http://doi.org/10.1108/PRR-12-2018-0033*
6. Gemaya, T., Selametb. S., Tondinic N., Khorasanid, N., (2016) *Urban Infrastructure Resilience to Fire Disaster: An Overview. Procedia Engineering 161. World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium, 1801 -1805* DOI: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.782>
7. Gerasimidis, S., & Civjan, S., (2021). *Post-Fire Damage Inspection of Concrete Structures. University of Massachusetts Amherst. 4-187 Retrieved from: https://rosap.nrl.gov/view/dot/59901/dot\_59901\_DS1.pdf*
8. Kodur, V., & Naser, M. Z., (2021). *Fire hazard in transportation infrastructure: Review, assessment, and mitigation strategies. Front. Struct. Civ. Eng., 15(1), 46–60* DOI: <http://doi.org/10.1007/s11709-020-0676-6>
9. Kang, H., Cho H., Choi S., Heo I., Kim, H., & Kim K., (2019). *Estimation of Heating Temperature for Fire-Damaged Concrete Structures Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, DOI: http://doi.org/10.3390/ma12233964*
10. Dodman, D., Hayward. B., & Pelling M., (2022). *Cities, Settlements and Key Infrastructure. DOI: http://doi.org/10.1017/9781009325844.008*
11. Щербак, О.С., Дерев'яно, О.А., Неупор, О.В., Шевченко, Р.І. (2023) *Методика виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури // Комунальне господарство міст, том 1, випуск 175. С.105- 111. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-105-111*

### References

1. Ibrahimbegovic, A., Boulkertous, A., Davenne, L., Muhasilovic, M., Duhovnik, J. & Pokrklic, A., (2009). *Fire Induced Damage in Structures and Infrastructure: Analysis, Testing and Modeling January 2009 NATO. Security through Science Series C: Environmental Security. Damage*

- Assessment and Reconstruction after War or Natural Disaster, 309-329 DOI: [http://doi.org/10.1007/978-90-481-2386-5\\_12](http://doi.org/10.1007/978-90-481-2386-5_12)
2. Papalou, A., Baros, K., (2019). Assessing Structural Damage after a Severe Wildfire: A Case Study Department of Civil Engineering, *University of Peloponnese*; 26334 Patras, Greece. *Buildings*, 9(7), 171 DOI: <http://doi.org/10.3390/buildings9070171>
3. 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; DOI: <http://doi.org/10.3390/en14237893>
4. Aliş, B., Yazici, C., & Özkal, F.M., (2022). Investigation of Fire Effects on Reinforced Concrete Members via Finite Element Analysis *ACS Omega* 2022, 7(30), 26881–26893 DOI: <http://doi.org/10.1021/acsomega.2c03414>
5. Kodur, V., Kumar, P., & Rafi, M.M., Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety. *PSU Research Review*. DOI: <http://doi.org/10.1108/PRR-12-2018-0033>
6. Gemaya<sup>1</sup>, T., Selameth. S., Tondinic N., Khorasanid, N., (2016) Urban Infrastructure Resilience to Fire Disaster: An Overview. *Procedia Engineering* 161. *World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium*, 1801 -1805 DOI: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.782>
7. Gerasimidis, S., & Civjan, S., (2021). Post-Fire Damage Inspection of Concrete Structures. *University of Massachusetts Amherst*. 4-187 Retrieved from: [https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/59901/dot\\_59901\\_DS1.pdf](https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/59901/dot_59901_DS1.pdf)
8. Kodur, V., & Naser, M. Z., (2021). Fire hazard in transportation infrastructure: Review, assessment, and mitigation strategies. *Front. Struct. Civ. Eng.*, 15(1), 46–60 DOI: <http://doi.org/10.1007/s11709-020-0676-6>
9. Kang, H., Cho H., Choi S., Heo I., Kim, H., & Kim K., (2019). Estimation of Heating Temperature for Fire-Damaged Concrete Structures Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, DOI: <http://doi.org/10.3390/ma12233964>
10. Dodman, D., Hayward. B., & Pelling M., (2022). Cities, Settlements and Key Infrastructure. DOI: <http://doi.org/10.1017/9781009325844.008>
11. Shcherbak, O., Derevyanko, O., Neshpor, O., Shevchenko, R. (2023) Method of detecting central signs of emergency situation due to fire at critical infrastructure facilities. *Municipal Economy of Cities*, 1(175), 105–111. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-105-111>

**Рецензент:** д.т.н., проф., заступник начальника, О.М. Мірошник, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна.

## ALGORITHM FOR APPLICATION OF METHODS FOR DETECTING CENTRAL SIGNS OF AN EMERGENCY SITUATION DUE TO FIRE AT CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

O. Shcherbak<sup>1</sup>, O. Neshpor<sup>2</sup>, O. Derevyanko<sup>1</sup>, S. Yeremenko<sup>2</sup>, R. Shevchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection, Ukraine

*The work is devoted to the solution of an actual scientific task in the field of civil protection, namely, the development of an algorithm for the application of the technique of detecting focal signs of an emergency situation due to a fire at critical infrastructure facilities. Recommendations for the practical application of the methodology as the basis of the method of non-destructive control of the processes of preventing emergency situations due to a fire of a terrorist nature at the objects of critical infrastructure of Ukraine are given.*

*the algorithm for the application of the method of detecting focal signs of an emergency situation due to a fire at critical infrastructure facilities consists of three procedures, namely: procedures for conducting measurements at*

**Автор:** ЩЕРБАК Олексій Сергійович  
ад'юнкт кафедри автоматичних систем безпеки та інформаційних технологій факультету пожежної безпеки  
Національний університет цивільного захисту України  
E-mail - [aleksejsrbk@gmail.com](mailto:aleksejsrbk@gmail.com)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8843-0352>

**Автор:** НЕШПОР Олег Валерійович  
заступник начальника інституту  
Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту  
E-mail - [neshpor\\_mns@ukr.net](mailto:neshpor_mns@ukr.net)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0670-5445>

**Автор:** ДЕРЕВ'ЯНКО Олександр Анатолійович  
кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматичних систем безпеки та інформаційних технологій факультету пожежної безпеки  
Національний університет цивільного захисту України  
E-mail - [asbit@nuczu.edu.ua](mailto:asbit@nuczu.edu.ua)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3602-2055>

**Автор:** ЄРЕМЕНКО Сергій Анатолійович  
доктор технічних наук, професор, заступник начальника інституту з навчальної роботи  
Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту  
E-mail - [esamns@ukr.net](mailto:esamns@ukr.net)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3685-4713>

**Автор:** ШЕВЧЕНКО Роман Іванович  
доктор технічних наук, професор, начальник кафедри автоматичних систем безпеки та інформаційних технологій факультету пожежної безпеки  
Національний університет цивільного захисту України  
E-mail - [shevchenko605@i.ua](mailto:shevchenko605@i.ua)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9634-6943x>



*a critical infrastructure facility, procedures for statistical processing of measurement results, fire reconstruction procedures.*

*The received general recommendations of the fire reconstruction procedure can be reduced to the following. In particular, we note that the value of the electrical resistance of soot is related to the mode of combustion in one or another zone. If this value, which was measured directly above the investigated area, exceeds 1010-1011 Ohm, then this indicates that there was no intense flame burning in this area, but the burning took place in the form of smoldering.*

*Long-term smoldering of a fire load in conditions of insufficient air exchange can lead to the formation of a thick layer of greasy soot on the ceiling and in the upper part of the walls, sometimes with clear drops of the liquid phase or drop-like spots. This can be observed in small rooms and other volumes that are not ventilated. If the combustion moves from such premises to a larger space with better air exchange, and a flaming combustion occurs, then the formed electrical resistance pattern will mainly reflect the development of flaming combustion.*

*The source of the fire may appear in the form of soot burning or extremely low values of its electrical resistance, or vice versa, in a rather thick layer of soot with a high content of extractive substances.*

*Thus, the interpretation of the results of the measurement of electrical resistance must be accompanied by an analysis of the specifics of the volume-planning decisions of the building (room), the conditions of air exchange, and the distribution of the fire load.*

*The obtained results of the soot research can be used within the framework of fire engineering expertise to reconstruct the process of the occurrence and development of combustion, including to establish the center of the fire.*

**Keywords:** *emergency situation, critical infrastructure object, technique, focal signs, thermal damage.*