

УДК 614.841

DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-2636.2025.9.1.12>

Ніна РАШКЕВИЧ¹, доктор філософії (ORCID: 0000-0001-5124-6068)
Роман ШЕВЧЕНКО¹, д-р техн. наук, професор (ORCID: 0000-0001-9634-6943)

Катерина КАРПЕНКО¹ (ORCID: 0009-0005-3905-8829)

Ольга ШЕВЧЕНКО¹, канд. техн. наук (ORCID: 0000-0003-2106-5009)

Іван РУЩАК¹ (ORCID: 0009-0008-5714-9224)

Олександр ДМИТРИЄНКО² (ORCID: 0009-0005-3997-670X)

¹Національний університет цивільного захисту України

²Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВНАСЛІДОК НАДЗВИЧАЙНИХ ПОДІЙ

У статті запропоновано алгоритм аналізу температурного розподілу на поверхні будівельних конструкцій, що враховує просторові та часові параметри теплового впливу. Основні етапи алгоритму включають збір вхідних даних, попередню обробку, моделювання розподілу температури, просторовий та часовий аналіз, інтерпретацію результатів і прийняття відповідних рішень.

Описано можливості безконтактних методів вимірювання температури, таких як тепловізійне обстеження, що дозволяють ефективно ідентифікувати осередки пожежі.

Розглянуто критерії оцінки ступеня пошкодження будівельних конструкцій на основі отриманих температурних характеристик, включаючи максимальну температуру, її розподіл по конструкціях, швидкість зміни температури, тривалість впливу високих температур, фізико-хімічні властивості матеріалів, а також візуальні та інструментальні зміни. Визначено основні параметри для прогнозування подальшого розвитку пошкодження і оцінки ризиків виникнення вторинних ушкоджень.

Окреслено перспективи впровадження тепловізійного моніторингу у сферу пожежної безпеки об'єктів критичної інфраструктури.

Запропонована методика оперативного оцінювання пошкодження будівельних конструкцій після надзвичайних подій включає підготовку до вимірювань, збирання вхідних даних, проведення тепловізійного обстеження, аналіз температурних характеристик, оцінку ступеня пошкодження та визначення ризиків, а також ухвалення рішень щодо подальших заходів. Використання цієї методики сприятиме швидкому та точному визначенню стану конструкцій і дозволить запобігти їх подальшому руйнуванню.

Ключові слова: тепловізійне вимірювання, оцінка пошкодження, моніторинг, пожежа, фізико-хімічні властивості.

Постановка проблеми. У сучасних умовах воєнного стану зростає ризик виникнення пожеж на об'єктах критичної інфраструктури внаслідок бойових дій, обстрілів, диверсій, а також аварійних ситуацій. Руйнування або пошкодження будівельних конструкцій можуть створювати приховані загрози, що ускладнюють ліквідацію наслідків пожежі та унеможливають швидке відновлення виробничих процесів. Затримка у виявленні осередку загоряння та оцінці ступеня пошкодження може призвести до поглиблення руйнувань, вторинних аварій та загрози життю рятувальників та персоналу.

Одним із найбільш ефективних підходів для моніторингу пожежонебезпечних об'єктів є використання безконтактних методів, зокрема тепловізійного аналізу, який дозволяє оперативно оцінити температурний стан будівельних конструкцій без безпосереднього контакту з небезпечною зоною. Це забезпечує можливість дистанційного

виявлення перегрітих ділянок, визначення осередку займання та оцінки пошкоджень конструкцій, що критично важливо для прийняття рішень щодо подальших дій.

На сьогодні існує потреба у розробці методики оперативного оцінювання пошкоджень будівельних конструкцій після надзвичайних подій, яка базуватиметься на безконтактних методах аналізу температурних характеристик матеріалів. Така методика має забезпечувати:

- швидке виявлення зон критичного нагріву та локалізацію осередку пожежі на основі теплового випромінювання;
- оцінку стану будівельних конструкцій з урахуванням термічних впливів та можливих змін фізико-механічних властивостей матеріалів;
- автоматизований аналіз просторового розподілу температури для прогнозування можливого подальшого поширення вогню або ризику обвалення конструкцій;
- використання тепловізійного моніторингу для контролю об'єктів критичної інфраструктури в небезпечних умовах з мінімізацією загроз для рятувальників і персоналу.

Розробка такої методики дозволить підвищити ефективність реагування на пожежі та аварійні ситуації, сприятиме зменшенню людських і матеріальних втрат, а також стане основою для вдосконалення протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури у воєнний та післявоєнний періоди.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Наукові дослідження у сфері пожежної безпеки та методів оцінки пошкоджень будівельних конструкцій зосереджені на використанні безконтактних технологій, зокрема тепловізійного аналізу, математичного моделювання поширення температури та автоматизованих систем моніторингу.

Тепловізійні камери здатні виявляти гарячі точки та полум'я навіть за відсутності видимого диму, що дозволяє попередити оператора про потенційну небезпеку на ранніх стадіях загоряння [1]. Це особливо важливо для моніторингу периметрів промислових об'єктів та забезпечення безпеки інфраструктурних споруд.

Автори [2] відзначають, що сучасні тепловізійні сенсори з високою роздільною здатністю дозволяють отримати точні теплові карти пошкоджених конструкцій, що сприяє оперативному прийняттю рішень щодо локалізації та ліквідації пожеж.

Тепловізійне обстеження дозволяє виявити дефекти теплоізоляції, місця витоку тепла та інші аномалії, що можуть свідчити про пошкодження конструкцій [3]. Проведення енергоаудиту з використанням тепловізорів допомагає оцінити фактичні показники енерговитрат та розробити рекомендації щодо поліпшення енергоефективності будівель.

Сучасні системи безпеки інтегрують тепловізійні камери для моніторингу об'єктів у реальному часі [4]. Це дозволяє не лише виявляти пожежі на ранніх стадіях, але й оцінювати стан будівельних конструкцій після надзвичайних ситуацій, що сприяє швидкому прийняттю рішень щодо ліквідації наслідків та відновлення об'єктів.

Дослідження [5] показують, що використання методів машинного навчання та штучного інтелекту значно покращує точність виявлення пошкоджених конструкцій на основі аналізу теплових зображень.

Математичне моделювання теплових процесів у будівельних конструкціях – інструмент для прогнозування поведінки матеріалів під впливом температурних навантажень, особливо в умовах пожеж [6]. Наукові дослідження зосереджені на розробці та вдосконаленні моделей, які дозволяють точно описувати теплопередачу в різних типах конструкцій. У [1] розглядається задача нестационарної теплопровідності в багатошарових будівельних виробках. Автор пропонує чисельно-аналітичний підхід до розв'язання одновимірної релаксаційної моделі теплопровідності, що дозволяє враховувати вплив теплофізичних характеристик матеріалів на розподіл температури.

Математичне моделювання теплових процесів у будівельних конструкціях дозволяє прогнозувати їхню вогнестійкість та ефективність вогнезахисту [8, 9].

Робота [10] зосереджена на вивченні факторів, що впливають на вогнестійкість перегородок із сендвіч-панелей. У цьому дослідженні розглядається теплофізична поведінка панелей при дії високих температур та запропоновані методи підвищення їх вогнестійкості.

Дослідження [11] присвячене вивченню вогнестійкості сталевих конструкцій з вогнезахистом. Авторами запропоновані заходи для підвищення пожежної безпеки таких конструкцій, зокрема використання вогнезахисних покриттів та обґрунтування їхньої ефективності.

У [12] розглянуто ефективність зрошувачів для підвищення вогнестійкості світлопрозорих фасадних конструкцій. Авторами було змодельовано поведінку таких конструкцій при дії вогню та досліджено, як наявність водяного охолодження впливає на їхню термостійкість.

Робота [13] присвячена методам математичного моделювання теплових процесів під час випробувань на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій. У роботі розглядаються підходи до оцінки температурних полів та їх впливу на несучу здатність конструкцій при високотемпературних впливах.

У [14] представлено математичне моделювання двовимірного в'язкопружного стану деревини під час сушіння. Робота акцентує увагу на взаємозв'язку між температурними полями та механічними напруженнями, що виникають у процесі теплової обробки дерев'яних матеріалів.

Дослідження [15] спрямовані на вивчення полів напружень і температури в конструкціях із застосуванням методу R-функцій та методу скінченних елементів. Ці методи дозволяють моделювати складні геометричні форми та неоднорідності матеріалів, що є важливим для точного прогнозування теплової поведінки будівельних елементів.

У [16] розглядається математичне моделювання теплопередачі у бетонних та металевих конструкціях під час пожежі. Використання числових методів, таких як метод кінцевих елементів (FEM), дозволяє прогнозувати поведінку матеріалів при високих температурах, що є важливим для оцінки їх залишкової несучої здатності після пожежі.

Останні дослідження, зокрема [17] описують інтегровані системи моніторингу, які поєднують тепловізійний аналіз, датчики температури та газового аналізу для всебічного оцінювання стану будівельних конструкцій у реальному часі. Такі системи активно впроваджуються у критичну інфраструктуру та промислові об'єкти, що дозволяє значно скоротити час реагування на пожежні загрози.

Аналіз наукових публікацій свідчить про розвиток безконтактних методів контролю пожежної безпеки, серед яких тепловізійний аналіз займає провідне місце. Водночас, існує потреба у розробці комплексної методики оперативного оцінювання пошкоджень будівельних конструкцій, яка б поєднувала сучасні підходи до тепловізійного аналізу, математичне моделювання термічного впливу на матеріали.

Постановка задачі та її розв'язання. З огляду на актуальність проблеми, сформульовано науково-прикладну задачу, а саме: розробити методику оперативного оцінювання пошкоджень будівельних конструкцій після надзвичайних подій на основі безконтактних тепловізійних вимірювань температурного стану матеріалів, що дозволить ідентифікувати осередок пожежі, визначити ступінь термічного впливу та прогнозувати можливі конструктивні ризики.

Для цього необхідно вирішити задавання:

1. Визначити залежності теплового випромінювання будівельних матеріалів від температури та фізико-хімічних властивостей для точного інтерпретування тепловізійних даних.

2. Розробити алгоритм аналізу температурного розподілу на поверхні будівельних конструкцій з урахуванням просторових і часових параметрів теплового впливу.

3. Оцінити можливість виявлення осередку пожежі за допомогою безконтактних методів вимірювання температури тіл на основі залежності теплового випромінювання нагрітих тіл від їхньої температури і фізико-хімічних властивостей.

4. Запропонувати критерії оцінки ступеня пошкоджень будівельних конструкцій на основі отриманих температурних характеристик та аналізу можливих ризиків втрати несучої здатності.

5. Розробити рекомендації щодо впровадження тепловізійного моніторингу у практику пожежної безпеки об'єктів критичної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу дослідження. Визначити залежності теплового випромінювання будівельних матеріалів від температури та фізико-хімічних властивостей для точного інтерпретування тепловізійних даних.

Точне визначення температури будівельних матеріалів за допомогою тепловізійного аналізу є важливим для оцінки їх стану в умовах пожежного впливу. Однак, коректна інтерпретація тепловізійних даних залежить від фізико-хімічних характеристик матеріалу, таких як теплопровідність, теплоємність, коефіцієнт випромінювання та структурні зміни при нагріванні.

Теплове випромінювання будівельних матеріалів визначається за законом Стефана-Больцмана: $E = \varepsilon \sigma T^4$ (де: E – енергія випромінювання, Вт/м²; ε – коефіцієнт випромінювання матеріалу; σ – стала Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T – температура поверхні в абсолютних одиницях (К)).

Коефіцієнт випромінювання є змінною величиною, що залежить від складу матеріалу, ступеня окислення, шорсткості поверхні та наявності покриття.

Для підвищення точності тепловізійного аналізу необхідно: коригувати отримані температурні значення з урахуванням коефіцієнта випромінювання для кожного матеріалу; враховувати зміну фізико-хімічних характеристик будівельних конструкцій при впливі високих температур; розробляти алгоритми автоматичної корекції температури для тепловізійних систем, що базуються на математичних моделях теплообміну.

Розробка алгоритму аналізу температурного розподілу на поверхні будівельних конструкцій з урахуванням просторових і часових параметрів теплового впливу.

Для підвищення точності діагностики стану конструкцій необхідно враховувати як просторовий розподіл температури, так і її зміну в часі.

Основні процедури алгоритму аналізу температурного розподілу на поверхнях будівельних конструкцій наведені на рис. 1.



Рисунок 1 – Процедури алгоритму аналізу температурного розподілу на поверхні будівельних конструкцій

Попередня обробка даних включає фільтрацію шумів та аномальних значень, калібрування з урахуванням коефіцієнта випромінювання матеріалів, нормалізацію температурних значень для різних ділянок конструкції шляхом усереднення температури в контрольних точках або застосуванням корекційних коефіцієнтів.

Моделювання температурного розподілу базується на використанні математичних моделей теплопередачі, що враховують фізичні властивості матеріалів, геометрію конструкцій, а також зовнішні і внутрішні теплові впливи. Для складних конструкцій із різними матеріалами та геометричними характеристиками використовується чисельне моделювання на основі методу скінченних різниць або методу скінченних елементів. Це дозволяє розділити об'єкт на множину малих елементів, у межах яких рівняння теплопровідності розв'язується з урахуванням граничних умов та теплових впливів.

Залежно від результатів до основних рекомендацій можна віднести:

- якщо температура виявляється вищою за критичні значення, встановлення додаткових вогнезахисних бар'єрів або проведення локальних заходів для швидкої стабілізації температури в окремих ділянках конструкцій;
- у разі виявлення осередків загоряння або надмірного нагріву, застосування систем охолодження для запобігання подальшому поширенню вогню чи деформації матеріалів;
- якщо інтерпретація результатів вказує на можливе руйнування або деградацію матеріалів у певних зонах, розробка плану ремонту та відновлення цих ділянок будівлі;
- якщо температурні показники не перевищують критичних рівнів, але спостерігаються зміни, які можуть свідчити про потенційну небезпеку, рішення про подальше спостереження та регулярний моніторинг цих зон.

Оцінка можливості виявлення осередку пожежі за допомогою безконтактних методів вимірювання температури тіл на основі залежності теплового випромінювання нагрітих тіл від їхньої температури і фізико-хімічних властивостей.

Принцип дії пірометрів базується на використанні залежності енергетичної яскравості випромінювання в обмеженому діапазоні довжин хвиль від температури об'єкта вимірювання. Функція перетворення пірометра є складною аналітичною залежністю вихідного сигналу від температури і випромінювальної здатності, пропускання проміжного середовища, апаратної функції і інших параметрів пірометрів.

Результати проведеного безконтактного вимірювання температури металевого даху виробничої будівлі представлені в табл. 1., схема відображення границь температурних зон – рис. 2.

Таблиця 1 – Результати проведеного безконтактного вимірювання температури металевого даху виробничої будівлі

Порядковий номер точки вимірювання	T, °C	Порядковий номер точки вимірювання	T, °C
1	95	11	135
2	97	12	145
3	98	13	148
4	95	14	144
5	93	15	135
6	115	16	140
7	120	17	146
8	125	18	150
9	120	19	147
10	115	20	140

1		3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20

	130-160
	110-130
	80-110
	50-80

Рисунок 2 – Схема відображення границь температурних зон

У результаті досліджень визначено що найбільша температура + 150 °C зафіксована на даху у місці примикання стіни та стелі на відстані 10 метрів від правого ближнього кута, відносно основних в'їзних воріт. В інших напрямках температура поступово зменшувалася, що дозволяє ідентифікувати можливий осередок пожежі та його зону впливу.

Просторовий розподіл температури вказує на наявність точкового джерела нагріву або наслідки термічного впливу, що важливо для аналізу причин займання.

Дослідження підтверджує перспективність безконтактних методів виявлення осередків пожежі та може бути основою для удосконалення протипожежних заходів у критичних умовах.

Критерії оцінки ступеня пошкоджень будівельних конструкцій на основі отриманих температурних характеристик та аналізу можливих ризиків втрати несучої здатності.

Оскільки температурні зміни можуть суттєво впливати на фізико-механічні властивості матеріалів, використання точних критеріїв для оцінки пошкоджень дозволяє ефективно прогнозувати наслідки теплових впливів та ухвалювати обґрунтовані рішення щодо подальших дій.

Для оцінки ступеня пошкоджень будівельних конструкцій доцільно використовувати критерії:

1. Максимальна температура та її розподіл по конструкціях. Оцінка максимальних температур, до яких нагріваються окремі елементи конструкцій, дозволяє визначити, чи перевищують вони критичні значення для відповідних матеріалів. Наявність зон з підвищеною температурою вказує на можливі локальні пошкодження або виникнення загрози для несучої здатності.

2. Швидкість зміни температури (температурний градієнт). Швидка зміна температури у певній частині конструкції може призвести до термічних напруг, що, в свою чергу, викликає механічні деформації матеріалів і навіть їх руйнування. Високий температурний градієнт, зокрема між зовнішніми і внутрішніми шарами конструкцій, може призвести до тріщин або деформацій.

3. Тривалість впливу високих температур. Оцінка часу, протягом якого конструкція піддається певним температурним режимам, є важливою для визначення ступеня пошкоджень. Короткочасне перебування при високих температурах може бути менш небезпечним, ніж довготривале нагрівання, яке призводить до змін фізико-хімічних властивостей матеріалів, таких як зниження міцності, втрати теплоізоляційних властивостей або корозія.

4. Фізико-хімічні властивості матеріалів.

5. Візуальні та інструментальні зміни в конструкціях, що дозволяють оцінити зміни в матеріалах, такі як деформації, тріщини, обвуглювання, розм'якшення або відшарування зовнішніх покриттів. Зміни на поверхні конструкції можуть бути чітким індикатором ступеня пошкодження.

6. Аналіз втрати несучої здатності. Пошкодження, які можуть призвести до втрати міцності та стабільності конструкцій, включають в собі обрушення або спотворення металевих елементів, руйнування бетону та інших будівельних матеріалів.

7. Прогнозування подальшого розвитку пошкоджень, оскільки конструкції, що зазнали термічних впливів, можуть продовжувати деформуватися з часом. Це може включати в себе подальші тріщини, відшарування матеріалів або руйнування через втрату міцності.

8. Оцінка ризиків виникнення вторинних пошкоджень через корозію металевих елементів, що були пошкоджені вогнем, або через порушення герметичності ізоляційних матеріалів, тощо.

Розробка рекомендації щодо впровадження тепловізійного моніторингу у практику пожежної безпеки об'єктів критичної інфраструктури.

Тепловізійний моніторинг дозволяє ефективно контролювати температурний стан об'єктів, виявляти приховані осередки загорянь і вчасно реагувати на зміни, що можуть призвести до катастрофічних наслідків.

Першим етапом є ідентифікація об'єктів, на яких використання тепловізійного моніторингу є найбільш доцільним з огляду на високий ризик пожеж через роботу з горючими матеріалами або високотемпературні процеси, де відмови можуть призвести до надзвичайних ситуацій.

Вибір відповідного обладнання є важливим для реалізації ефективного моніторингу. Для цього потрібні тепловізори з високою роздільною здатністю, які дозволяють виявляти навіть незначні зміни температури, а також автоматизовані системи моніторингу, що дозволяють проводити цілодобове спостереження за критичними зонами. Мобільні пристрої для оперативного обстеження також повинні бути наявні для швидкої оцінки ситуації в разі необхідності.

Тепловізійний моніторинг має бути інтегрований з іншими системами пожежної безпеки об'єкта, зокрема з системами пожежної сигналізації, які можуть передавати сигнал про виявлену аномалію на центральний пульт для оперативного реагування, а також з системами автоматичного гасіння пожежі, що можуть бути активовані в разі виявлення загрози.

Важливо забезпечити регулярний моніторинг та обстеження будівель і конструкцій, щоб своєчасно виявити підвищену температуру, яка може бути ознакою загрози пожежі.

Інтерпретація теплових зображень спеціалістами з урахуванням особливостей технологічного процесу і матеріалів конструкцій є важливою частиною цього процесу.

Оцінка ефективності системи тепловізійного моніторингу повинна здійснюватися регулярно, зокрема для аналізу точності виявлення загроз та своєчасності реагування на них.

Крім того, необхідно забезпечити ефективну комунікацію між всіма службами, зокрема з рятувальними службами, для забезпечення швидкої евакуації персоналу та вжиття заходів у разі виявлення загрози.

Дані, отримані за допомогою тепловізійного моніторингу, повинні використовуватися для подальшого аналізу і прогнозування можливих ризиків, що дозволить своєчасно вжити заходів для запобігання майбутнім надзвичайним ситуаціям.

З огляду на вищезазначене, методика оперативного оцінювання пошкоджень будівельних конструкцій після надзвичайних подій на основі безконтактних тепловізійних вимірювань температурного стану матеріалів, що дозволяє ідентифікувати осередок пожежі, визначити ступінь термічного впливу та прогнозувати можливі конструктивні ризики, складається з етапів:

1. Підготовка до проведення тепловізійного моніторингу, що включає оцінку об'єкта для визначення найбільш уразливих і критичних зон, які потребують моніторингу, таких як стіни, покрівля, стелі, колони та інші несучі конструкції; вибір відповідного тепловізійного обладнання, що забезпечить високу точність вимірювань; проведення попередніх обстежень для виявлення зон, де температура може перевищувати нормальні межі через зовнішній вплив, наприклад, від обстрілів, вибухів або пожеж.

2. Збір вхідних даних, що включає температурні характеристики будівельних матеріалів, до яких входять фізико-хімічні властивості, теплоємність, теплопровідність, які можуть впливати на швидкість нагрівання та охолодження матеріалу; геометричні параметри

конструкції для точного визначення площі, яку необхідно обстежити, а також для можливості коректного аналізу температурного розподілу на поверхнях матеріалів; час, що минув з моменту надзвичайної події, та поточний стан об'єкта для оцінки динаміки змін температури.

3. Тепловізійне вимірювання.

4. Аналіз температурних характеристик для виявлення зон з підвищеною температурою, що можуть свідчити про наявність активних або прихованих осередків пожежі; оцінки ступеня термічного впливу; прогнозування конструктивних ризиків.

5. Оцінка ступеня пошкоджень та визначення ризиків.

6. Прийняття рішень.

Висновки. 1. Теплове випромінювання будівельних матеріалів – важливий фактор для точного аналізу температурних характеристик на основі тепловізійних даних. Для кожного типу матеріалу існує специфічна залежність між температурою та випромінюваною енергією, що визначається його фізико-хімічними властивостями, зокрема коефіцієнтом випромінювання. Врахування цих властивостей дозволяє значно підвищити точність інтерпретації тепловізійних зображень, що є основою для ефективного моніторингу та оцінки температурного стану конструкцій у разі надзвичайних ситуацій.

2. Основними положеннями алгоритму аналізу температурного розподілу на поверхні будівельних конструкцій з урахуванням просторових і часових параметрів теплового впливу є: збір вхідних даних; попередня обробка даних; моделювання температурного розподілу; просторовий аналіз; часовий аналіз; інтерпретація результатів та ухвалення рішень.

3. Використання безконтактних методів вимірювання температури, таких як тепловізійне обстеження, дозволяє ефективно виявляти осередки пожежі. Завдяки вивченню залежностей між температурою та тепловим випромінюванням, а також врахуванню фізико-хімічних властивостей матеріалів, можна точно визначити місця підвищеного теплового навантаження. Це дає можливість оперативно виявляти загоряння та інші критичні ситуації, що значно підвищує рівень безпеки на об'єктах.

4. До критеріїв оцінки ступеня пошкоджень будівельних конструкцій на основі отриманих температурних характеристик та аналізу можливих ризиків втрати несучої здатності можна віднести: максимальна температура та її розподіл по конструкціях; швидкість зміни температури; тривалість впливу високих температур; фізико-хімічні властивості матеріалів; візуальні та інструментальні зміни в конструкціях; аналіз втрати несучої здатності; прогнозування подальшого розвитку пошкоджень; оцінка ризиків виникнення вторинних пошкоджень.

5. Впровадження тепловізійного моніторингу у практику пожежної безпеки об'єктів критичної інфраструктури є ефективним заходом для запобігання пожежам і своєчасного виявлення ризиків. Рекомендації включають використання високоточних тепловізорів, інтеграцію систем моніторингу з іншими системами безпеки, а також навчання персоналу правильній інтерпретації даних.

Методика оперативного оцінювання пошкоджень будівельних конструкцій після надзвичайних подій включає етапи: підготовка до вимірювання, збирання вхідних даних, тепловізійне вимірювання, аналіз температурних характеристик, оцінка ступеня пошкоджень та визначення ризиків, а також прийняття рішень щодо необхідних заходів. Така методика дозволить швидко і точно оцінити стан конструкцій і вжити необхідних заходів для запобігання подальшим пошкодженням чи руйнуванням об'єкта.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kim, H., Lamichhane, N., Kim, C., & Shrestha, R. (2023). Innovations in building diagnostics and condition monitoring: A comprehensive review of infrared thermography applications. *Buildings*, 13(11), 2829.

2. Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring. *Sensors*, 23(4), 2204.

3. Sabato, A., Puliti, M., & Niezrecki, C. (2020, April). Combined infrared imaging and structure from motion approach for building thermal energy efficiency and damage assessment. In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems XIV* (Vol. 11381, pp. 243–251).
4. Gade, R., & Moeslund, T. B. (2014). Thermal cameras and applications: a survey. *Machine vision and applications*, 25, 245–262.
5. Azimi, M., Eslamlou, A. D., & Pekcan, G. (2020). Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: State-of-the-art review. *Sensors*, 20(10), 2778.
6. Моделювання нестационарного прогріву вогнезахищених залізобетонних колон / Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Рашкевич Н.В., Юрченко С. // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, 2022. – № 2(14). – С. 87–98.
7. Моделювання процесу теплопровідності двовимірного тришарового середовища / Риндюк С. В., Риндюк В. І., Міщук Т. І. // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: науково-технічний збірник. Вінниця, 2008. – № 5. – С. 99–103.
8. Оцінювання вогнестійкості будівлі із вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій / Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Рашкевич Н.В., Тараненко І.С. // Комунальне господарство міст, 2023. – Том 3, вип. 177. – С. 134–141.
9. Вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки / Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Рашкевич Н.В., Майборода Р.І. // Проблеми надзвичайних ситуацій, 2022. – № 2(36). – С. 102–122.
10. Дослідження впливу чинників на вогнестійкість перегородок із сендвіч-панелей / Данченко Ю.М., Качкар Є.В., Рашкевич Н.В. // Комунальне господарство міст, 2023. – Том 1, вип. 175. – С. 145–150.
11. Вогнестійкість вогнезахищених сталевих конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів / Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Рашкевич Н.В., Рудаков С.В., Томенко В.І., Юрченко С.П. // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 282–292.
12. Моделювання вогнезахисту світлопрозорих фасадних конструкцій з влаштуванням зрошувачів / Майборода Р.І., Рашкевич Н.В., Отрош Ю.А., Балдук П.Г. // Механіка та математичні методи. – Одеса: ОДАБА, 2024. – Том VI. – № 2. – С. 160–174. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-160-174>
13. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій: монографія. Нуянзін О.М., Некора О.В., Поздєєв С.В., Сідней С.О., Тищенко Є.О., Шкарабура М.Г. – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2015. –120 с.
14. Соколовський Я. Математичне моделювання двовимірного в'язкопружного стану деревини у процесі сушіння / Соколовський Я., Дендюк М. // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології, 2008. – Вип. 7. – С. 69–78.
15. Боднар Ю. Огляд праць стосовно застосування методу R-функцій у механіці деформівного твердого тіла / Боднар Ю. // Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво, 2018. – № 19. – С. 5–9.
16. Banerjee, D. K. (2021). A review of models for heat transfer in steel and concrete members during fire. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 126, 126030.
17. Sulthana, S. F., Wise, C. T. A., Ravikumar, C. V., Anbazhagan, R., Idayachandran, G., & Pau, G. (2023). Review study on recent developments in fire sensing methods. *Ieee Access*, 11, 90269–90282.

REFERENCES

1. Kim, H., Lamichhane, N., Kim, C., & Shrestha, R. (2023). Innovations in building diagnostics and condition monitoring: A comprehensive review of infrared thermography applications. *Buildings*, 13(11), 2829.

2. Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring. *Sensors*, 23(4), 2204.
3. Sabato, A., Puliti, M., & Niezrecki, C. (2020, April). Combined infrared imaging and structure from motion approach for building thermal energy efficiency and damage assessment. In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems XIV* (Vol. 11381, pp. 243–251).
4. Gade, R., & Moeslund, T. B. (2014). Thermal cameras and applications: a survey. *Machine vision and applications*, 25, 245–262.
5. Azimi, M., Eslamlou, A. D., & Pekcan, G. (2020). Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: State-of-the-art review. *Sensors*, 20(10), 2778.
6. Kovalov A.I., Purdenko R.R., Otrosh Yu.A., Tomenko V.I., Rashkevych N.V., Yurchenko S. Modeliuvannia nestatsionarnoho prohrivu vohnezakhyshchenykh zalizobetonnykh kolon. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. № 2(14) 2022. S. 87–98.
7. Ryndiuk S. V., Ryndiuk V. I., Mishchuk T. I. Modeliuvannia protsesu teploprovodnosti dvovymirnoho trysharovoho seredovyscha. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi : nauko-tekhnichniy zbirnyk*. Vinnytsia, 2008. № 5. S. 99–103.
8. Otrosh Yu.A., Kovalov A.I., Rashkevych N.V., Taranenko I.S. Otsiniuvannia vohnestiikosti budivli iz vohnezakhyshchenykh zalizobetonnykh budivelnykh konstruktsii. *Komunalne hospodarstvo mist*. 2023. Tom 3, vyp. 177. S. 134–141.
9. Otrosh Yu.A., Kovalov A.I., Purdenko R.R., Rashkevych N.V., Maiboroda R.I. Vohnestiikisti vohnezakhyshchenykh zalizobetonnykh konstruktsii dlia pidvyshchennia rivnia pozhezhnoi bezpeky. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*. № 2(36). 2022. S. 102–122.
10. Danchenko Yu.M., Kachkar Ye.V., Rashkevych N.V. Doslidzhennia vplyvu chynnykiv na vohnestiikist perehorodok iz sendvich-panelei. *Komunalne hospodarstvo mist*. 2023. Tom 1, vyp. 175. S. 145–150.
11. Kovalov A.I., Otrosh Yu.A., Rashkevych N.V., Rudakov S.V., Tomenko V.I., Iurchenko S.P. Vohnestiikist vohnezakhyshchenykh stalevykh konstruktsii dlia pidvyshchennia rivnia pozhezhnoi bezpeky ob'ektiv. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*. 2023. № 1(37). S. 282–292.
12. Maiboroda R.I., Rashkevych N.V., Otrosh Yu.A., Balduk P.H. Modeliuvannia vohnezakhystu svitloprozorykh fasadnykh konstruktsii z vlashtuvanniam zroshuvachiv. *Mekhanika ta matematychni metody*. Odesa : ODABA, 2024. Tom VI. № 2. 160-174. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-160-174>
13. Metody matematychnoho modeliuvannia teplovykh protsesiv pry vyprobuivanniakh na vohnestiikist zalizobetonnykh budivelnykh konstruktsii: monohrafiia. Nuianzin O.M., Nekora O.V., Pozdieiev S.V., Sidnei S.O., Tyshchenko Ye.O., Shkarabura M.H. Cherkasy: ChIPB im. Heroiv Chornobylia NUTsZ Ukrainy, 2015. 120 s.
14. Sokolovskyi Ya., Dendiuk M. Matematychno modeliuvannia dvovymirnoho viazkopruzhnoho stanu derevyny u protsesi sushinnia. *Fizyko-matematychno modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii*. 2008. Vyp. 7. S. 69–78.
16. Banerjee, D. K. (2021). A review of models for heat transfer in steel and concrete members during fire. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 126, 126030.
17. Sulthana, S. F., Wise, C. T. A., Ravikumar, C. V., Anbazhagan, R., Idayachandran, G., & Pau, G. (2023). Review study on recent developments in fire sensing methods. *Ieee Access*, 11, 90269–90282.

Nina RASHKEVICH¹, PhD

Roman SHEVCHENKO¹, Doctor of Technical Sciences, Professor

Kateryna KARPENKO¹

Olga SHEVCHENKO¹, Candidate of Technical Science

Ivan RUSHCHAK¹

Oleksandr DMYTRIENKO²

¹*National University of Civil Protection of Ukraine*

²*State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*

METHODOLOGY FOR RAPID ASSESSMENT OF DAMAGE TO BUILDING STRUCTURES DUE TO EMERGENCY EVENTS

The article proposes an algorithm for analyzing the temperature distribution on the surface of building structures, which takes into account spatial and temporal parameters of thermal impact. The main stages of the algorithm include input data collection, pre-processing, temperature distribution modeling, spatial and temporal analysis, interpretation of results and making appropriate decisions.

The possibilities of non-contact temperature measurement methods, such as thermal imaging, which allow for effective identification of fire centers, are described.

The criteria for assessing the degree of damage to building structures based on the obtained temperature characteristics are considered, including the maximum temperature, its distribution across structures, the rate of temperature change, the duration of exposure to high temperatures, the physicochemical properties of materials, as well as visual and instrumental changes. The main parameters for predicting the further development of damage and assessing the risks of secondary damage are determined.

The prospects for implementing thermal imaging monitoring in the field of fire safety of critical infrastructure facilities are outlined.

The proposed methodology for rapid assessment of damage to building structures after emergency events includes preparation for measurements, collection of input data, conducting thermal imaging surveys, analyzing temperature characteristics, assessing the extent of damage and identifying risks, and making decisions on further measures. The use of this methodology will contribute to a quick and accurate determination of the condition of structures and will prevent their further destruction.

Keywords: *thermal imaging measurement, damage assessment, monitoring, fire, physicochemical properties.*