

О.С. Щербак¹, О.В. Бляшенко², В.М. Серватюк³, О.І. Сошинський¹, Р.І. Шевченко¹

¹Національний університет цивільного захисту України, Україна

²Міністерство оборони України, Україна

³Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Україна

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ УРАЖЕНЬ КОНСТРУКЦІЙ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання у сфері цивільного захисту, а саме аналізу методів дослідження термічних уражень конструкцій внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, маючи за мету подальшу розробку моделі запобігання надзвичайних ситуацій терористичного характеру на об'єктах критичної інфраструктури України.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, об'єкт критичної інфраструктури, термічне ураження.

Постановка проблеми

У результаті горіння, що відбуває у наслідок надзвичайної ситуації пов'язаної з пожежею, матеріали, конструкції, устаткування й окремі предмети, що опинились в зоні дії високої температури, перетерплюють різні руйнування, деформації або знищуються цілком - згорають.

Як правило, руйнування відбувається нерівномірно і цією обставиною часто користуються при установленні осередку надзвичайної ситуації пов'язаної з пожежею. 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 приведе до великих руйнувань, це може викликати і розвиток більш високої температури у осередку надзвичайної ситуації пов'язаної з пожежею, 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 надзвичайної ситуації пов'язаної з надзвичайної ситуації пов'язаної з пожежею, у тому числі й у осередку.

Руйнування, що відбуваються під час надзвичайної ситуації пов'язаної з пожежею, залежать не тільки від тривалості горіння, але і від цілого ряду інших факторів і умов, з якими зв'язаний

розвиток надзвичайної ситуації пов'язаної з пожежею, і, насамперед, від температурного режиму в зоні горіння. Розвиток же температури зв'язаний, звичайно, не тільки з фактором часу. Температура на окремих ділянках надзвичайної ситуації пов'язаної з пожежею 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 ліквідації надзвичайної ситуації пов'язаної з пожежею. Усе це буде визначати умови і причини кількаретового вигорання, утворення місцевих осередків горіння або окремих, краще збережених ділянок у зоні надзвичайної ситуації пов'язаної з пожежею.

Аналіз останніх досліджень

Аналіз сучасних публікацій за напрямком дослідження свідчить про наступне. Так в роботі [1] автори розглядають статистичні дані про великі пожежі в містах, представляючи детальний перелік причин виникнення пожеж, тип пошкодження конструкцій та інфраструктури із залізобетону, а також представляють експериментальний підхід до вивчення вогнестійкості різних конструкційних компонентів разом із роллю чисельного моделювання для надання більш детальної інформації щодо кількісного визначення температури та полів теплового потоку з наданням уточнених моделей для оцінки пошкоджень, спричинених пожежею, у конструкціях із залізобетону. В роботі [2] автори розглядають вплив екстремальних термічних умов на будівлі в залежності від типу їх конструкції, які виникають під час лісових пожеж на практичному прикладі великої лісової пожежі, яка відбулася у Греції у липні 2018 року. Автори провели аналіз

фактичного пошкодження будівель та надали вказівки для запобігання, мінімізації, або зменшенню рівня шкоди будівлям від негативного впливу лісових пожеж. У статті [3] автори розглядають питання впливу умов експлуатації на функціональну надійність систем пожежної сигналізації (СПС) при прояві негативних умов на споруди критичної інфраструктури.

В результаті проведеного дослідження [4] автори надали алгоритм моделювання поведінки залізобетонних конструкцій при термічних навантаженнях, заснований на поєднанні термічного та структурного аналізів, з використанням характеристик: провідність, питома теплоємність, співвідношення напруга-деформація та теплове розширення та структурних реакції під час фаз нагрівання відповідно до Євро-кодів 1 та 2. Авторами статті [5] представлено критичний огляд поточних заходів протипожежного захисту та їх застосовність для вирішення поточних проблем, пов'язаних із пожежною небезпекою в будівлях.

У статті [6] представлено огляд стійкості міської інфраструктури до пожежної катастрофи. Переглядаються визначення стійкості та кількісні рамки, встановлені для інших небезпек, таких як землетруси, представлені особливості конструктивної пожежної інженерії та показано, як основи стійкості можуть бути застосовані до пожежної небезпеки.

Результати перевірки пошкоджень бетонних конструкцій після пожежі надаються у роботі [7], де в рамках дослідницької програми Департаменту транспорту Массачусетс (MassDOT) авторами проведено прикладні дослідження з питань існуючих процедур і літератури щодо оцінки тунелів після пожежі.

У статті [8] сформована проблема пожежі на критично важливих транспортних інфраструктурах, таких як мости шляхопроводи та тунелі, наведені масштаби пожежної проблеми, а також нещодавнє збільшення пожежних проблем на мостах і тунелях.

У дослідженнях [9,10] було проведено випробування на нагрівання бетону та неруйнівне випробування для оцінки температури нагріву бетону, що постраждав від вогню, та використання методу визначення температури нагріву. На основі отриманих результатів запропоновано алгоритм адаптивної нейронечіткої системи логічного висновку.

Втім у наведених роботах [1-10] не надані дієві рекомендації з організації та проведення заходів в визначення осередків надзвичайних ситуацій та пожеж, що у подальшому унеможливило створення механізмів їх різнобічного аналізу та запобігання.

Таким чином, на сьогодні залишається не вирішеним науковим завданням у сфері цивільного захисту ефективне визначення осередків

надзвичайних ситуацій внаслідок пожежі, якому повинен передувати поглиблений аналіз методів дослідження термічних уражень конструкцій внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури, маючи за подальшу мету розробку моделі запобігання надзвичайних ситуацій внаслідок пожежі терористичного характеру на об'єктах критичної інфраструктури України.

Мета. Аналіз методів дослідження термічних уражень будівельних конструкцій в наслідок надзвичайних ситуацій, пов'язаних з пожежею. Для вирішення поставленої мети необхідно:

1. Провести порівняльний аналіз методів дослідження термічних уражень будівельних конструкцій різного типу.

2. Визначити переваги та перспективи застосування методу виміру електричного опору.

Основний матеріал

Методи дослідження та аналізу неорганічних будівельних матеріалів та залізобетонних конструкцій

До неорганічних в'язучих речовин відносять матеріали, котрі за умови додавання води утворюють пластичне тісто, здатне в результаті фізико-хімічних процесів з часом тверднути, переходячи в твердий каменеподібний стан. В'язучі речовини використовують для виготовлення бетонів, будівельних розчинів, а також штучних кам'яних матеріалів та виробів. Неорганічні в'язучі речовини, що застосовуються в звичайному будівництві, діляться на повітряні та гідравлічні. Повітряні в'язучі здатні тверднути й зберігати свою міцність лише на повітрі (повітряне вапно, гіпс). Гідравлічні в'язучі здатні тверднути і зберігати міцність не лише на повітрі, але й у воді (портландцемент, інші види цементів). Під дією високої температури (520-580⁰C) на твердий вапняний розчин відбувається дегідратація хімічно зв'язаної води з Ca(OH) і дисоціація CaCO₃, за рахунок чого знижується його міцність. Дисоціація вуглекислого кальцію інтенсивно відбувається під час нагрівання до 900⁰C та вище. Окис кальцію, що утворюється, схильний до вторинної гідратації, яка супроводжується збільшенням об'єму та руйнуванням твердого вапняного розчину, в результаті чого він втрачає свою міцність. Аналогічно до вапняного розчину відбуваються зміни в гіпсі: значна втрата міцності з руйнуванням структури в результаті дегідратації при 400⁰C. Нагрівання до 700⁰C призводить до повної втрати міцності. Хімічні перетворення силікатів в цементах обумовлюють схожі зміни стану цементного каменю під впливом високих температур. Проведені експерименти та дослідження зразків матеріалів на основі в'язучих методом ІЧ-

спектроскопії, за результатами яких підтверджена можливість оцінки ступеня термічної дії на ці матеріали. При візуальному огляді будь-яких конструкцій з неорганічних будівельних матеріалів слід відмічати зони за копчення та зони вигорання кіптяви. Неорганічні будівельні матеріали можна розділити на дві групи - виготовлені випалювальним методом та виготовлені іншими методами. Матеріали, що виконані випалювальним методом (червона цегла, стеклоблоки, керамічна плитка), пройшли високотемпературну обробку (випалення) у процесі виготовлення та при повторному нагріванні у ході пожежі практично не змінюють свого складу, структури та властивостей. Тому визначення та описування їх стану зазвичай не має особливого значення для дослідження пожежі. Лише різке охолодження та механічний вплив при гасінні пожежі може привести до розтріскування вказаних виробів або руйнування конструкцій з них. Тому при дослідженні пожежі бажано отримати від керівника гасіння пожежі відомості про напрям подачі стовлів та руйнування конструкцій під час ліквідації пожежі [1]. Матеріали, виконані іншими методами, по типу застосованого зв'язувального матеріалу можна умовно поділити на три підгрупи: матеріали на основі цементу, вапна, гіпсу. Під час пожежі, при нагріванні від 150-200°C та вище відбувається руйнування бетону та залізобетону. Чим вище температура та тривалість нагрівання – тим більша руйнація. Це відбувається за рахунок поступової дегідратації (видалення фізично, а потім і хімічно зв'язаної води) цементного каменя, нерівномірного теплового розширення окремих інгредієнтів, що входять до складу бетону, та деяких інших процесів. При огляді конструкцій з бетону та залізобетону слід відмічати та фіксувати наявність слідів накладення кіптяви й зон вигорання кіптяви місцезнаходження, форму та розміри зон на яких маються розтріскування бетону (мікротріщини починають утворюватися за температури 300-400°C, при 500°C, тріщини збільшуються настільки, що їх можна побачити неозброєним оком (ширина тріщин не менше – 0,1мм), при 600-800°C – ширина розкриття тріщин 0,5–1,0мм); місцезнаходження, форму та розміри зон на яких мається відшарування захисного шару бетону (внаслідок нагріву до 700-800°C утворюються візуально помітні руйнування на бетоні, зокрема, відшарування захисного шару на конструкціях з залізобетону).

У разі необхідності уточнення причини руйнування конкретного скла, його слід вилучити для експертного дослідження. На уламках скла утворюються радіальні та концентричні тріщини та інші характерні руйнування, рельєф граней яких дозволяє визначити з якого боку нанесли удар по скла або надавили на нього, чи мало місце

механічний вплив, тиск вибуху або руйнування внаслідок температурного впливу. Підлягає вилученню також скло від лампочок розжарювання в разі їх можливої причетності до виникнення пожежі.

Методи дослідження та аналізу металевих конструкцій

Наслідки теплового впливу під час пожежі на метали (сплави) та конструкції з них можна розділити на п'ять основних груп, умовно розташувати (виходячи з температури утворення) у наступній послідовності:

- деформація;
- утворення окислів на поверхнях;
- структурні зміни, що супроводжуються зміною фізико-хімічних та механічних властивостей;
- розчинення металу у металі;
- горіння металу (сплаву).

Результати проходження цих процесів при огляді місця пожежі можна досліджувати візуально. Металоконструкції та їх окремі елементи деформуються, як правило, у бік найбільшого нагріву. Це властиво не тільки металам, а й більшості інших матеріалів, наприклад склу величина деформації конструкції повинна бути пропорційна температурі та тривалості нагріву. Тому, здавалося б, на місці пожежі найбільш «гарячою» зоною можна сміло вважати ту, в якій металоконструкція має найбільшу деформацію. Однак не все так просто і найбільша деформація відбувається не завжди там, де мала місце найбільша температура, найбільш інтенсивний та тривалий нагрів. Вона може бути і там, де конструктивний елемент несе більш високе навантаження або на нього діє найбільший момент вигинання. Так, наприклад, якщо сталеві балки перекриття має найбільшу деформацію посередині прольоту, то це абсолютно не означає, що саме у цьому місці був найбільш інтенсивний нагрів – саме тут на балку діє найбільший момент вигину. А такі деформації типові для більшості приміщень, незалежно від місця розташування у них первинного вогнища пожежі.

Наявність ознак мінливості на сталевих виробках та їх локалізація бажано зафіксувати при огляді місця пожежі. Хоча при пошуках первинного вогнища пожежі така інформація рідко приходить у нагоді, але вона може знадобитися при визначенні джерела запалювання, пов'язаного із тертям, локальним прогріванням у технологічних устаткуваннях, двигунах і т.ін. Після нагрівання сталевих конструкцій вище 500°C на них з'являються кольори жару: темно-коричневий (530°C), червоний (550°C), темно-червоний (700°C), вишнево-червоний (900°C),

яскраво-вишневий (1000°C), темно-оранжевий (1100°C), світло-оранжевий (1200°C), білий (1300°C), яскраво-білий (1400°C), сліпучо-білий (1500°C). Високотемпературний окисел – окалина, утворюється на сталі звичайної якості (за час нагріву, характерний для середньої пожежі) при температурі 700°C та вище. Зростання товщини окалини відбувається за параболічним законом – чим більша температура та тривалість нагріву, тим вона товще. Низькотемпературна окалина (700- 750°C) зазвичай має рижуватий відтінок і достатньо тонка. Окалина, що утворюється при 900-1000°C і вище – товста і чорна. Якщо окисел на поверхні сталевих конструкцій рихлий та рудий – це, скоріш за все, зовсім не окалина, а звичайна іржа. При огляді місця події, за можливості, потрібно фіксувати колір окалини на різних ділянках сталевих конструкцій.

Наявність локальних зон розплавлення (проплавлення) металу. Корисну інформацію про температурні режими у різних зонах пожежі можна отримати завдяки виявленню місць розплавлення тих чи інших металів, сплавів, а також скла та деяких інших матеріалів. Необхідно звертати увагу та фіксувати місця розплавлення алюмінію та його сплавів (температура плавлення 600-660°C), бронзи (880-1040°C), міді (1050°C), сталі (1300-1400°C).

Магнітний метод полягає у вимірюванні струму розмагнічування на однотипових металевих виробках. Під час цього оцінюється і порівнюється між собою ступінь розвитку дорекристалізаційних та рекристалізаційних процесів в сталевих виробках, які знаходились у зоні впливу високих температур в умовах пожежі. За відносними показниками коерцитивної сили можна робити висновки щодо розташування осередку пожежі. Коерцитивна сила (величина напруженості магнітного поля, за якої дорівнює нулю намагнічення матеріалу, що вимірюється по петлі гістерезису) і відповідна їй величина струму розмагнічення є найбільш структурочутливими магнітними характеристиками матеріалу. Наряду з цим для холоднотягнутих сталей характерним є зменшення значень коерцитивної сили, тоді як для гарячекатаних сталей ці значення під впливом вищих температур зростають.

Отримання достовірного результату під час вимірювання залишкового намагнічення залежить від якості зачищення металу перед встановленням магнітного перетворювача: поверхня повинна зачищуватися скребком до легкого сріблястого блиску. Час температурного впливу практично не відображається на показниках коерцитивної сили. Охолодження металевих зразків як у повітрі, так і струменями розпиленої води відбуваються на показниках коерцитивної сили майже однаково і водночас впливають на них набагато менше, ніж охолодження суцільними водяними струменями.

Коерцитиметри КРМ-Ц відрегульовані за контрольними металевими зразками, тому показники, отримані за допомогою різних приладів, матимуть різні значення. Враховуючи цю обставину, а також неможливість ідентифікації марок сталі металевих елементів і конструкцій та величину температурного впливу на них в результаті пожежі, при визначенні осередку пожежі необхідно брати до уваги відносність значень цих показників, співставляючи їх із зовнішніми ознаками прояву температурної дії на метал.

У зв'язку з наявністю різних залежностей зміни коерцитивної сили від температури для різних марок сталей, магнітний метод може застосовуватись в якості інструментального підтвердження версій про особливості виникнення та розвитку пожежі. Наряду з цим необхідно визначати характер зміни коерцитивної сили досліджуваних металевих предметів і конструкцій з урахуванням непрямих ознак температурного впливу на них та значення вихідного показника на неуражених металевих елементах.

Метод визначення величини та тривалості температурної дії за коерцитивною силою має свої недоліки, які обумовлені:

- відсутністю первинної інформації про марку сталі та характер залежності коерцитивної сили від температури, яку необхідно визначити в ході вимірювань, порівнюючи зі значеннями залишкової намагніченості аналогічних неушкоджених елементів та враховуючи непрямі ознаки температурного впливу;

- відносністю показників коерцитивної сили, оскільки вони не свідчать про величину температурного впливу під час пожежі, а лише дають відповідь, де цей вплив був більший або менший.

У цілому ж метод може використовуватись для дослідження сталевих конструкцій та предметів з метою підтвердження особливостей виникнення та розвитку пожеж за непрямыми ознаками температурного впливу. До його переваг слід віднести можливість проведення експрес тестів, що дозволяє отримувати результати вже в ході огляду місця пожежі.

Методи дослідження та аналізу обгорілих залишків лакофарбових покриттів

Лакофарбові покриття близькі по природі до полімерних матеріалів. Як відомо, зазвичай фарба складається з трьох компонентів – плівкоутворювача; наповнювачів, пігментів; розчинника.

Плівкоутворювач – це зазвичай органічний, синтетичний полімерний матеріал, що утворює плівку при висиханні фарби. Природні плівкоутворювачі (зокрема натуральна оліфа –

льняне масло) використовуються все рідше. Пігменти (барвники) надають фарбі необхідний колір. У фарбах та емалях на основі органічних розчинників застосовують в основному неорганічні пігменти (окисли металів), рідше використовують органічні пігменти (в основному для створення червоного та синього кольорів). Наповнювачі у фарбах теж в основному неорганічної природи. Особливо багато наповнювача – крейди, у воднодисперсійних фарбах. Існує багато підходів до класифікації полімерних матеріалів. За природою походження всі полімери поділяються на: природні полімери (сюди входить целюлоза - компонент деревини, розглянутої в попередньому розділі), штучні полімери, отримані з природних шляхом різних хімічних перетворень. Так, з целюлози шляхом нітрування (обробкою азотною кислотою) можна отримати нітроцелюлозу, а застосувавши реакцію ацетилювання (тобто обробку оцтовою кислотою) отримують ацетатне волокно, синтетичні полімери.

По типу використаного розчинника фарби діляться на дві великі групи:

- фарби (емалі, лаки) на основі органічних розчинників;

- воднодисперсні фарби (мають собою дисперсію – наявність дрібніших частинок фарби у воді).

Перетворення лакофарбового покриття при нагріванні. Лакофарбове покриття, що утворилося після нанесення фарби (емалі) та її висиханні, має собою сполучення плівкоутворювача та пігменту, наповнювача; розчинник по мірі висихання фарби випаровується. Коли на пожежі покриття починає нагріватися, його органічна складова (у першу чергу це плівкоутворювач) піддається термічній деструкції. Ззовні це проявляється у тому, що покриття спочатку темнішає. Далі при температурі 200-400°C відбувається його обуглення (карбонізація), у найменш термостійких нітроцелюлозних покриттях цей процес починається при 150°C. При температурі 400°C поступово вигорає вугільний залишок, що утворився при карбонізації плівкоутворювача. При підвищенні температури до 500°C цей процес практично завершується. Якщо пігмент у фарбі органічний, то вигорає і він. Неорганічний пігмент або продукт його розкладу зазвичай залишається. У лаковому покритті пігмент і наповнювач відсутні, тому воно вигорає повністю. Відповідно процесам, що відбуваються змінюється і те головне, що вдається оцінити при візуальному огляді обгорілого лакофарбового покриття – колір покриття.

При огляді місця пожежі слід фіксувати (опис у протоколі огляду, фото або відео зйомка):

- потемніння шару фарби;

- обуглювання шару фарби;

- повне або часткове вигорання шару фарби;

- колір лакофарбового покриття у різних зонах місця пожежі.

Крім того необхідно найпростішим способом (зіскобом) оцінити його фізико-механічні властивості у тих самих зонах (при повному вигоранні плівкоутворювача воно буде легко відшаровуватися, «сипатися»). Методика розрахована на дослідження найбільш широко використовуваних типів лакофарбових покриттів (ЛФП) - олійних, алкідних (пентафталевих, гліфталевих), нітроцелюлозних, їх композицій, а також основних різновидів покриттів з водоемульсійних фарб. ЛФП деструкують за температур нижче 600-700 °С. Помітне зменшення маси плівкоутворювача до 10-12% відбувається у нітроцелюлозних покриттях за умови ізотермічного нагрівання вже при 150 °С, у ПФ і МА покриттях - за температури 200 °С. У водоемульсійних покриттях (вінілацетатних, акрилатних, латексних) помітне зменшення органічної маси до 20% має місце при 250-300 °С. Вона послідовно зменшується із збільшенням температури та тривалості нагрівання [2]. Органічна складова даних покриттів практично вигорає при 500 °С і в інтервалі температур 500-700 °С зменшення маси покриттів практично не спостерігається. Однак за температури 700-800 °С і вище починається процес розкладання карбонатів кальцію (крейди), які входять до рецептури. Це обумовлює додаткову втрату маси. Протікання вказаних вище процесів призводить до послідовного зниження в пробах ЛФП вмісту термолабільних компонентів і, відповідно, збільшення зольності обугленого залишку фарби. Залежність величини зольності проб від температури та тривалості їх піролізу у різних пробах дає можливість виявляти зони термічних пошкоджень пофарбованих конструкцій.

Процес термічного розпаду ЛФП обумовлює не лише кількісні, але й якісні зміни в плівкоутворювачі. Окремі фрагменти його структури відрізняються за термостабільністю й розкладаються з різною швидкістю в різних температурних інтервалах. Крім цього на певних етапах піролізу утворюються, а потім вигоряють карбонізовані структури. Ці зміни функціонального складу ЛФП під впливом температури найкраще фіксуються методом ІЧ-спектроскопії.

Метод ІЧ-спектроскопії дозволяє за отриманими ІЧ-спектрами встановити орієнтовний тип покриття, розрахувати спектральні коефіцієнти, величину спектрального критерію та побудувати зони термічних пошкоджень. Даний метод дозволяє

досить точно визначати діапазон температур, які діяли на ЛФП.

Методи дослідження та аналізу полімерних конструкційних та будівельних матеріалів

Полімерні матеріали, що застосовуються у будівництві, а також для виготовлення корпусів побутової та оргтехніки, інших виробів, можна розділити на два класи – термопластичні матеріали (термопласти) та термореактивні матеріали (реактопласти). Термопласти – це матеріали, що здатні розм'якшуватися при нагріванні та переходити у пластичний стан, не зазнаючи при цьому руйнування, термічної деструкції. До таких матеріалів належать, зокрема: поліетилен, полівінілхлорид, поліметілметакрілат (органічне скло), поліаміди (капрон), та ін. Під час пожежі термопласти розм'якшуються, плавляться, течуть, горять. Це сприяє утворенню вторинних вогнищ пожежі. Прикладом такого роду може бути поведінка проводів з поліетиленовим або полівінілхлоридним ізоляційним покриттям. При нагріванні проводу така ізоляція плавиться, стікає, жили проводу оголюються, відбувається коротке замикання так під час пожежі можуть виникнути так звані вторинні короткі замикання. Іншим прикладом розповсюдження пожежі у приміщенні, де на стінах або на стелі встановлені люмінесцентні світильники з екранами з оргстекла – гарячі конвекційні потоки від вогнища пожежі, що здіймаються до стелі, здатні прогріти люмінесцентні світильники до такого ступеню, що екрани почнуть плавитися, оргстекло потече униз на підлогу, і таким чином у приміщенні можуть виникнути множинні вогнища (осередки) пожежі. Якщо при огляді місця пожежі виявляються сліди розтікання термопласту, то можна зробити висновок, що температура нагріву у даній зоні була більше за температуру розм'якшення даного полімеру або полімерної композиції.

Термореактивні полімерні матеріали не здатні переходити у пластичний стан без руйнування своєї структури. Відбувається це тому [1], що на відміну від термопластів, реактопласти мають зазвичай не лінійну, ланцюгову структуру полімеру, а розгалужену, просторово зшиту. Типовими представниками термореактивних полімерних матеріалів є гума, фенолформальдегідні пластмаси. До них також відноситься природний полімер – деревина. Реактопласти при нагріванні під час пожежі розпадаються з виділенням газоподібних продуктів піролізу та утворенням твердого вуглистого залишку, здатного до тління. Деформації, розплавлення, обуглення, часткове або повне вигорання коксового залишку полімерних матеріалів у тих чи інших зонах пожежі повинні виявлятися і

фіксуватися при огляді місця пожежі. Так, наприклад, деформації та оплавлення корпусів побутової техніки, виготовлених з полістиролу та інших термопластів, пластмасових деталей електричних вимикачів, розеток, світильників – одна з перших ознак направленості теплового впливу.

Під час розвинутої пожежі такі ознаки безпосередньо у зоні горіння не зберігаються, але вони зберігаються поза нею - у зоні теплового впливу та на межі зони задимлення, і як ознаки направленості теплового впливу повинні бути зафіксовані. Варто звернути увагу і на стан полімерної ізоляції електричних проводів, на ділянках, де вона збереглася. Переважне оплавлення та обуглення ізоляції по зовнішній поверхні, як правило, є наслідком термічного впливу пожежі. У той же час, обуглення та оплавлення ізоляції з середини, з боку жили – важлива ознака нагріву жили струмами короткого замикання або перевантаження. Спінені полімерні матеріали, зазвичай, горять дуже інтенсивно і у ряді випадків не залишають обуглених залишків. Від деяких полімерів, (наприклад – пінополіуретану) після пожежі можуть залишитися маленькі калюжі рідких продуктів деполімерізації. Щоб відрізнити їх від залишків ініціаторів горіння, потрібно відібрати пробу даної речовини та надіслати її для дослідження до лабораторії. Як відмічалось, розплавлятися та стікати можуть і термопластичні полімери. Калюжі таких полімерів, що розтеклися, зазвичай, згорають, але після пожежі може бути виявлено їх слід на підлозі або інших поверхнях у вигляді зон локального обуглення по формі потоків, калюж у формі плям. Їх можна прийняти за сліди горючих рідин, що були використані для підпалу. Щоб уникнути цього, також треба зробити відбір зразків і направити їх на дослідження. Полімери, що містять в основному ланцюзі атоми кисню - різні поліефіри, використовуються в якості лаків і фарб. Полімери з атомами сірки в головній ланцюга - тіоколи, використовуються як герметики. Серед з продуктів термічного розкладання містяться високотоксичні сірковмісні речовини. Високу пожежну небезпеку становлять азотовмісні полімери, оскільки в продуктах їх розпаду містяться оксиди азоту, що є сильними окиснювачем. Навпаки, фосфоровмісткі полімери - це речовини, що застосовуються для зменшення горючості. А ось полімери, в ланцюзі яких знаходяться атоми заліза - фероцен є потужними каталізаторами горіння.

Основними критеріями класифікації полімерних матеріалів з точки зору пожежно-технічної експертизи є показники їх ставлення до нагрівання. При цьому розрізняють такі показники як теплостійкість і термостійкість. Під теплостійкістю розуміють здатність збереження при нагріванні

фізичних властивостей матеріалу. Термостійкі (або термостабільні) називають здатність до збереження хімічного складу. Кількісним параметром термостійкості є показник - температура початку розкладання - T_n . Він залежить від умов нагріву, зокрема, від темпу нагріву. У ізотермічних умовах (при нульовому темпі нагріву) критеріями температури початку розкладання можуть бути різні показники: величина певного загального обсягу газу, що виділяється або обсягу якого-небудь конкретного газу для даного виду полімеру, втрата певної частки маси, зміна кольору. Скажімо, $T_{0,01}$ - це значення температури початку розкладання, встановлювана за умовою втрати маси на 0,01%.

Методи дослідження та аналізу обвуглених залишків дерев'яних конструкцій

Ураження деревини на пожежі виникають внаслідок її термічного розпаду під впливом зовнішнього тепла [3]. Результатом термічного розпаду деревини являється її обвуглення. При цьому виділяються газоподібні горючі продукти термічного розпаду, які, при досягненні їх певної концентрації у повітрі, здатні займатися та забезпечувати полум'яне горіння над поверхнею деревини. Вугільний шар, що утворюється, також здатний частково або повністю вигорати. Перші ознаки термічного розпаду деревини – потемнення її поверхні, з'являються при температурі вище 110°C . Активне тління деревини починається при температурі порядку 300°C , самозаймання деревини відбувається за температури близько 400°C . Глибина обвуглення деревини послідовно зростає із збільшенням температури та тривалістю піролізу (тління). Тому вимірювання глибини обвуглення може застосовуватися для фіксації і оцінювання зміни ступеню термічного ураження по довжині та висоті конструкції, визначення направленості теплового впливу. Зовнішній вигляд вугілля надає певну інформацію про умови, в яких він утворився:

- вугілля легке, рихле, з крупними тріщинами зазвичай утворюється при інтенсивному полум'яному горінні;

- вугілля щільне, важке, іноді із коричнюватим відтінком і навіть із збереженням текстури деревини (малюнок рокових кілець) утворюється при низькотемпературному піролізі, коли процес обвуглення відбувається повільно і летучі продукти горіння виділяються виходячи через дрібні щілини та не розрихлюючи вугілля.

Суть методу визначення електроопору вугілля постійному струму з допомогою стандартного вимірювального приладу полягає у вимірюванні його значення під тиском до 40 кг/см^2 , створеним

мікропресом, в межах $1-10^{8-10}$ Ом. Розрахунки параметрів горіння проводять за формулами. В відмічено, що дані щодо тривалості горіння суттєво занижені. Дослідження дозволили удосконалити математичний апарат методики, після чого зменшилась похибка підрахунків температури та тривалості її впливу на дерев'яні конструкції. Дана методика є найбільш доступною та результативною. Для визначення параметрів обвуглення деревини необхідно здійснити вимірювання геометричних розмірів початкової товщини конструкції у напрямку теплової дії (H) на вцілілих елементах; відповідного розміру після припинення горіння у місці відбору проби (H_T); товщини обвугленого шару (h_3). Різниця між початковою товщиною конструкції і товщиною її вцілілого перерізу визначає втрату перерізу (h_B). Товщина обвугленого шару та втрата перерізу в сумі складають h - загальну глибину обвуглення деревини (рис. 1).

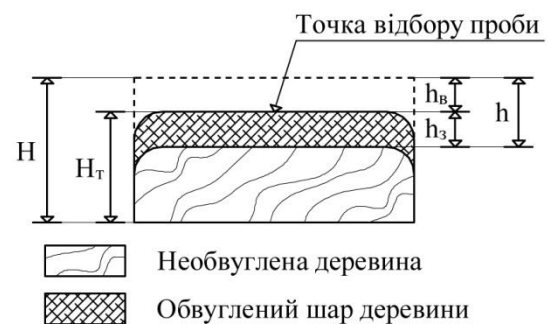


Рис. 1. Геометричні розміри дерев'яної конструкції, що характеризують параметри обвуглення деревини

з урахуванням глибини обвуглення та електричного опору шару вугілля товщиною 1-3 мм у місці відбору проби визначають параметри обвуглення. При оцінюванні результатів слід робити поправки на умови газового обміну під час горіння і те, що, коли глибина обвуглення менша за 2 мм, похибки розрахованих значень можуть значно зростати. Слід також враховувати, що коли розрахункове значення температури менше за 230°C , то ймовірно, що обвуглений шар деревини утворений у результаті тління. Метод визначення вмісту летких речовин полягає у встановленні співвідношення маси летких речовин, які виділяються протягом 7 хвилин під час витримки тигля з наважкою вугілля за температури $800 \pm 5^{\circ}\text{C}$ в муфельній печі, до маси цієї наважки. Параметри горіння розраховуються за існуючими формулами. Методика придатна до застосування, коли залишковий відсотковий вміст летких речовин у досліджуваному вугіллі менше 50%. Метод елементного аналізу полягає у визначенні вмісту вуглецю та водню у вугіллі шляхом спалювання його наважки у кварцевій пробірці, встановленій в трубку, через яку

безперервно пропускають кисень. Компоненти повного згоряння вугілля поглинаються ангідроном та аскаритом. У зв'язку з недостатнім збігом результатів паралельних визначень вуглецю та водню у вугіллі необхідно здійснювати не менше 4-5 визначень для усереднення отриманих даних. Метод вимагає значних затрат часу - до 8 годин на аналіз 3-5 паралельних проб. За отриманими результатами аналізів розраховують температуру та тривалість горіння деревини в точці відбору проби. Елементний аналіз можна проводити на "Приладі для мікрОВизначення вуглецю (водню)", а також на автоматичних аналізаторах цих елементів [4].

Таким чином, методи вимірювання електроопору, визначення вмісту летких речовин та елементного аналізу можна віднести до кількісних, оскільки в результаті їх застосування можна отримати певні значення параметрів горіння. Метод вимірювання електроопору виявився найбільш точним та зручним у практичному застосуванні [27].

Переваги та перспективи застосування методу виміру електричного опору

Визначення електроопору проводиться за тією самою, що й дослідження обвуглених залишків деревини, за допомогою комплексу, що складається з пресу, прессформи та мегаомметра. Даний метод застосовується тільки для матеріалів, що утворюють, як деревина, твердий вуглистый залишок при піролізі, і не застосовується, наприклад, для деяких сортів пінополіуретанів. Електроопір також є функцією температури та тривалості піролізу [5,6] (як і у деревини, вплив температури при цьому переважно), і ця обставина дозволяє використовувати електроопір як дуже чутливий та зручний критерій для оцінки ступеня термічних уражень полімерних матеріалів на місці пожежі. Крім того, величину електроопору проби можна, при необхідності, використовувати для визначення температури, при якій відбувалася карбонізація матеріалу. Для виявлення зон термічних уражень полімерного матеріалу - покриття підлоги, стін відбирають проби поверхневого шару карбонізованого матеріалу, сушать їх, подрібнюють та визначають величину питомого електроопору. Отримані результати завдають плану місця пожежі та будують зони термічних поразок. Щоб визначити не просто ступінь термічного ураження, а температуру, при якій карбонізувався вилучений з місця пожежі полімерний матеріал, необхідно взяти зразок такого ж матеріалу, що не зазнав термічного впливу, його окремі навішування нагріти в лабораторних умовах при різних температурах, після чого досліджувати отримані проби і побудувати графік залежності електроопору обвуглених залишків даного матеріалу від температури піролізу. Подібний графік показано на (Рис. 2).

Цей графік можна використовувати як калібрувальний для визначення температури карбонізації вилучених із місця пожежі проб. Наприклад, якщо привезена з місця пожежі проба карбонізованого ПВХ лінолеуму має питомий опір електроенергії $P=lgR=5$, то за графіком на рис. 2. можна встановити, що температура, за якої відбувалася карбонізація даної ділянки лінолеуму на пожежі, становила близько 500 °С.

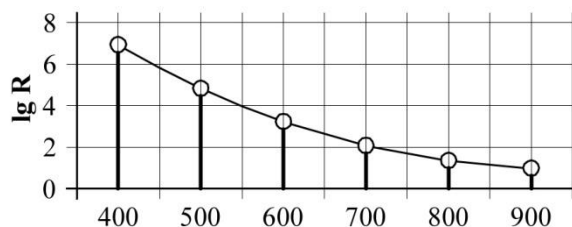


Рис. 2. Залежність питомого електроопору карбонізованих залишків від температури піролізу

Дані дослідження можна провести на більшості поверхонь безпосередньо на місці пожежі з наявністю кіптяви. Виключенням стають лише металічні та пошкоджені поверхні у наслідок неможливості вимірювання достовірних значень електричного опору.

Висновки

На сьогоднішній день існує ряд фізико-хімічних методів, за допомогою яких можна вірогідно визначити ознаки осередку й установити причини виникнення пожеж. Майже усі вони ґрунтуються на можливості реєструвати структурні перетворення, що відбуваються під впливом високих температур і безпосередньо полум'я на пожежах.

Проблема отримання об'єктивних даних, необхідних встановлення осередку пожежі та шляхів поширення горіння, залишається вкрай актуальною, особливо у випадках, коли неможливо дослідити предмети речової обстановки через їх руйнування і видалення з місця пожежі. Відкладення кіптяви на конструкціях та предметах присутні практично на будь-якій пожежі – як у зоні горіння, так і в зоні задимлення. Ця обставина дозволяє розглядати кіптяву як перспективний об'єкт експертного дослідження. В даний час кіптяга вкрай обмежено використовується як об'єкт дослідження і відповідно джерела криміналістично значущої інформації про пожежу. Фахівцями робилися 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 та не етильованих нафтопродуктів шляхом виявлення їх мікрокількостей, сорбованих частинками сажі. Завдання визначення умов горіння у

різних зонах пожежі та виявлення осередкових ознак пожежі у своїй не ставилися і вирішувалися. Аналіз електричного опору шару кіптяви дозволяє досліджувати закопчення безпосередньо на місці пожежі і, таким чином, виявляти шляхи поширення основних конвективних потоків та осередкову зону.

Література

1. A. Ibrahimbegovic, A. Boukertous, L. Davenne, M. Muhasilovic, J. Duhovnik & A. Pokrklic *Fire Induced Damage in Structures and Infrastructure: Analysis, Testing and Modeling January 2009 NATO. Security through Science Series C: Environmental Security. In book: Damage Assessment and Reconstruction after War or Natural Disaster (pp.309-329) DOI:10.1007/978-90-481-2386-5_12*
2. *Assessing Structural Damage after a Severe Wildfire: A Case Study*
Department of Civil Engineering, University of Peloponnese; 26334 Patras, Greece
Author to whom correspondence should be addressed. *Buildings* 2019, 9(7), 171; <https://doi.org/10.3390/buildings9070171>
3. *Operational Analysis of Fire Alarm Systems with a Focused, Dispersed and Mixed Structure in Critical Infrastructure Buildings* by Krzysztof Jakubowski, Jacek Paś, Stanisław Duer and Jarosław Bugaj *Energies* 2021, 14(23), 7893; <https://doi.org/10.3390/en14237893>
4. *Investigation of Fire Effects on Reinforced Concrete Members via Finite Element Analysis* Betül Aliş, Casim Yazici, and Fatih Mehmet Özkal* *ACS Omega* 2022, 7, 30, 26881–26893. July 20, 2022 <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03414>
5. *Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety* Venkatesh Kodur, Puneet Kumar, Muhammad Masood Rafi. *PSU Research Review*. ISSN: 2399-1747
6. *Procedia Engineering 161 (2016) p1801 -1805. World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium 2016, WMCAUS 2016. Urban Infrastructure Resilience to Fire Disaster: An Overview.* Thomas Gemaya*, Serdar Selametb, Nicola Tondinic, Negar Elhami Khorasanid
7. *Post-Fire Damage Inspection of Concrete Structures.* Simos Gerasimidis, Scott Civjan
University of Massachusetts Amherst
https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/59901/dot_59901_DS1.pdf
8. Venkatesh KODUR, M. Z. NASER. *Fire hazard in transportation infrastructure: Review, assessment, and mitigation strategies.* *Front. Struct. Civ. Eng.*, 2021, 15(1): 46–60 <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0676-6>
9. *Estimation of Heating Temperature for Fire-Damaged Concrete Structures Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*
Hyun Kang 1 , Hae-Chang Cho 2 , Seung-Ho Choi 2 , Inwook Heo 2 , Heung-Youl Kim 1 and Kang Su Kim
doi: 10.3390/ma12233964
10. *Cities, Settlements and Key Infrastructure.* David Dodman (Jamaica/UK), Bronwyn Hayward (New Zealand), Mark Pelling (UK) doi:10.1017/9781009325844.008
11. *Дослідження механізмів термічної карбонізації хлорвмісних карбоцепних полімерів / В. І. Касаточкін, А.Б. Берлін та ін: Изв. АН СРСР. Серія хімічна, 1965. – № 6. – С. 1003-1009.*
12. Демідов П.Г., Шандиба В.А., Щеглов П.П. *Горіння та властивості горючих речовин. - М: Хімія, 1981. - 263 с.*
13. Кисліцин О.М. *Дослідження хімізму терморозпаду компонентів деревини: Дис.... д-ра хім. наук / ЦНДЛХІ. - Горький, 1973. -214 с.*
14. Демідов П.Г., Саушев В.С. *Горіння та властивості горючих речовин: Навч. посібник. - М: ВІПТШ МВС СРСР, 1975.-279 с.*
15. Чешко І.Д. *Технічні засади розслідування пожеж: Метод, посібник. - М: ВНДІПО, 2002. - 330 с.*
16. Хван С.А. *Дослідження фізико-хімічних властивостей деревного диму / Праці ВНІРО: Зб. ст. – 1970. – LXXIII. -С. 102-121.*
17. *Небезпека продуктів горіння полімерних матеріалів/Д.Х. Кулев: Огляд інформ. Сер. Пожежна безпека. - М.: ВНДІПО, 1983. - 23 с.*

References

1. Ibrahimbegovic, A., Boukertous, 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: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: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: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: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: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: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
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: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:10.3390/ma12233964
10. Dodman, D., Hayward. B., & Pelling M., (2022). *Cities, Settlements and Key Infrastructure.* DOI:10.1017/9781009325844.008
11. Kasatochkin V., Berlin A. and others (1965) *Research on mechanisms of thermal carbonization of chlorine-containing carbochain polymers.* *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Chemical series*, No. 6. P. 1003-1009.
12. Demidov P.G., Shandyba V.A., Shcheglov P.P. (1981) *Combustion and properties of combustible substances. - М: Chemistry, 263 p.*
13. Kislitsyn O.M. (1973) *Research on the chemistry of the thermal decomposition of wood components: Diss... Dr. Chem. of Sciences / TsNDLHI. - Gorky, 214 p.*
14. Demidov P.G., Saushev B.C. (1975) *Combustion and properties of combustible substances: Teaching. manual. - М: VIPTSH of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 279 p.*

15. Cheshko I.D. (2002) Technical principles of fire investigation: Method, manual. - M: VNDIPO, 330 p.
16. Hwang E.A. (1970) Study of the physical and chemical properties of wood smoke / Proceedings of VNIRO: Collection. Art. LXXIII. -WITH. 102-121.
17. Kulev D.Kh. (1983) Danger of combustion products of polymeric materials. Review. information Ser. Fire Security. - M.: VNDIPO, 23 p.

Рецензент: доктор технічних наук, професор О.С. Басманов, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

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

Автор: БЛЯШЕНКО Олег Вікторович
доктор технічних наук
Міністерство оборони України
E-mail - blyashenko@meta.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1500-0487>

Автор: СЕРВАТЮК Василь Миколайович
доктор військових наук, професор
Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського
E-mail - servatiuk1@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1500-0487>

Автор: СОШИНСЬКИЙ Олександр Ігорович
кандидат наук з мистецтвознавства
Науковий відділ з проблем цивільного захисту і техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру
Національний університет цивільного захисту України
E-mail - soshinsky@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7921-1294>

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
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9634-6943>

ANALYSIS OF RESEARCH METHODS OF THERMAL DAMAGE TO STRUCTURES DUE TO FIRE AT CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

O. Shcherbak¹, O. Blyashenko², V. Servatyuk³, O. Soshinsky¹, R. Shevchenko¹

¹National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²Ministry of Defence of Ukraine, Ukraine

³The National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Ukraine

The work is devoted to the solution of an actual scientific task in the field of civil protection, namely, the analysis of methods of researching thermal damage to structures due to fire at critical infrastructure facilities, with the aim of further developing a model for preventing terrorist emergencies at critical infrastructure facilities of Ukraine.

This work is a continuation of the cycle of previous works on the development of structural, logical and mathematical models for managing an emergency situation of a terrorist nature at an object of the critical infrastructure of Ukraine, which is protected, which are intended for the development and constant implementation of procedures of an organizational and technical nature that ensure the safety of the object.

Further research will be directed to the development of appropriate mathematical models and conducting field experiments, performed using a specially designed laboratory facility to determine the reliability of the latter, comparing theoretical and practical results.

Today, there are a number of physical and chemical methods that can be used to reliably determine the signs of a fire and establish the causes of fires. Almost all of them are based on the ability to register structural transformations that occur under the influence of high temperatures and directly from the flames of fires.

The problem of obtaining objective data, necessary to establish the center of the fire and the ways of the spread of combustion, remains extremely relevant, especially in cases where it is impossible to examine the objects of the physical environment due to their destruction and removal from the fire site.

The task of determining the burning conditions in different fire zones and identifying the focal signs of a fire in yours were not set and solved. The analysis of the electrical resistance of the soot layer makes it possible to investigate the sooting of the place at the site of the fire and, thus, to identify the ways of propagation of the main convective flows and the focal zone.

Keywords: emergency, critical infrastructure object, thermal damage.