

УДК 621.03

- Б. Б. Поспєлов, д.т.н., професор, провідн. н.с. (ORCID 0000-0002-0957-3839)*
Є. О. Рибка, д.т.н., ст. дослідник, заст. нач. центру – нач. відділу (ORCID 0000-0002-5396-5151)
М. О. Самойлов, ад'юнкт ад'юнктури (ORCID 0000-0002-8924-7944)
Ю. С. Безугла, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-4022-2807)
О. А. Яценко, к.е.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0001-7129-389X)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ФАКТОРІВ СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЗАГОРЯННЯХ У ПРИМІЩЕННЯХ

Наведені результати експериментального дослідження динаміки небезпечних факторів повітряного середовища при загоряннях у приміщеннях об'єктів. Встановлено, що інформативною ознакою для раннього виявлення загорянь є ступінь взаємної (парної) кореляції флуктуацій факторів середовища при нульовому лазі. Отримано, що для тестових матеріалів загоряння у вигляді спирту, паперу та деревини коефіцієнт парної кореляції близький до одиниці, а для текстилю – до мінус одиниці. Експериментально встановлено, що при наявності загорянь у приміщенні в досліджуваному середовищі відбувається групування розподілених локальних станів, характер яких залежить від матеріалу загоряння. Відмічається, що саме характер групування може бути також застосований в якості інформаційної ознаки раннього виявлення загорянь в приміщеннях та розпізнавання типу матеріалу, що загоряється. Встановлено, що загоряння призводять до деякого збільшення постійної часу флуктуацій досліджуваних факторів середовища. При цьому, показник загорянь виявляється недостатньо чутливим для використання в якості ознаки раннього виявлення загорянь. Більш інформативною ознакою у рамках кореляційно підходу слід вважати ступінь взаємної (парної) кореляції флуктуацій факторів середовища при нульовому лазі. Встановлено, що у випадку загоряння спирту додатковою ознакою може бути взаємна кореляція диму та температури при 20 лазі. Експериментально підтверджено, що для розглянутих горючих матеріалів ефективною ознакою раннього загоряння є коефіцієнт парної кореляції чадного газу та температури при нульовому лазі. Результати дослідження динаміки рекурентності природних станів небезпечних факторів середовища свідчать про переваги міри рекурентності станів в порівнянні з кореляціями щодо раннього виявлення загорянь матеріалів у приміщеннях об'єктів. Експериментально встановлено, що запропонована міра поточної рекурентності станів може бути надійною ознакою щодо виявлення ранніх загорянь в приміщеннях та використана з метою підвищення ефективності різних технічних засобів та систем захисту приміщень від пожеж та вибухів.

Ключові слова: пожежа, динаміка, кореляції небезпечних факторів, стан повітряного середовища, рекурентна діаграма, міра рекурентності станів

1. Вступ

Відомо, що пожежі на об'єктах завдають значної шкоди природі та суспільству і є джерелами виникнення багатьох надзвичайних ситуацій (НС). При пожежах гинуть і травмуються люди, знищуються матеріальні та духовні цінності, погіршується якість середовища проживання і т. д. Світовий досвід в сфері захисту від НС свідчить про те, що витрати на заходи щодо запобігання НС виявляються значно нижчими витрат на подолання збитків. Запобігання НС зазвичай реалізується завчасним проведенням комплексу превентивних заходів. Головні з них спрямовані на недопущення виникнення НС, збереження умов життєдіяльності людей, а також зменшення шкоди навколишньому природному середовищу. Однак, процеси в техногенній сфері (об'єкти енергетики, промисловості, транспорту та ін.) неминуче призводять до ризику виникнення НС внаслідок пожеж (вибухів). При цьому, джерелом будь-якої пожежі служить загоряння речовини чи матеріалу. Світова статистика свідчить про те, що велика частина пожеж припадає на приміщення (понад 39%), а загибель людей від пожеж в приміщеннях становить понад 80%. Тому, запобігання виникненню пожеж в приміщеннях є однією з голо-

вних та пріоритетних проблем будь-якої держави. З метою недопущення пожеж у приміщеннях об'єктів, перш за все, необхідно надійно виявляти загоряння на ранньому етапі до моменту некерованого їх розвитку – виникнення пожежі. Труднощі такого виявлення полягають в незначних змінах даних про небезпечні фактори повітряного середовища, що реєструються пожежними сповіщувачами. При цьому, динаміка небезпечних факторів повітряного середовища на ранньому етапі має складний та нестаціонарний характер і додатково маскується випадковими неконтрольованими збуреннями у середовищі приміщень. У зв'язку із вище зазначеним, експериментальні дослідження динаміки небезпечних факторів газового середовища в приміщеннях об'єктів на етапі раннього загоряння матеріалів є актуальним.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Експериментальне вивчення процесу виникнення пожежі для різних приміщень та матеріалів розглянуто в [1–3]. Відзначається, що процес розвитку загорянь у пожежі в приміщеннях носить істотно невизначений та нестаціонарний характер, що залежить від безлічі параметрів як самого приміщення, так і його пожежного навантаження. Слід зауважити, що в [4, 5] та інших відомих роботах досліджується тільки динаміка основних параметрів середовища переважно у вигляді температури і концентрації продуктів горіння різних матеріалів. При цьому, через складну та нестаціонарну динаміку параметрів середовища інші характеристики не розглядаються.

Підвищенню ефективності теплових пожежних сповіщувачів щодо виявлення пожежі в приміщеннях в реальних умовах присвячена робота [6]. Однак, динаміка небезпечних факторів повітряного середовища в приміщеннях об'єктів на етапі раннього загоряння горючих матеріалів не розглядається. Питанню створення самоналаштуваних пожежних сповіщувачів присвячені роботи [7, 8]. При цьому, в [6–8] враховується лише непередбачуваний нестаціонарний характер динаміки відповідних параметрів газового середовища. Інші, важливі на ранньому етапі загорянь, характеристики динаміки, наприклад кореляції флуктуацій динаміки або рекурентності станів та їх прирощень при цьому не розглядаються.

Останнім часом, для раннього виявлення загорянь в приміщеннях використовується динаміка концентрації оксиду карбону (CO). Тому, сенсори CO найчастіше входять до складу різних типів інноваційних пожежних сповіщувачів у якості одного з каналів отримання інформації про загоряння [9–11]. Відмічається, що важливу роль для раннього виявлення загорянь відіграє також динаміка концентрації диму в середовищі приміщень під час виникнення пожежі [12]. Однак, використання такої динаміки пов'язано з високою частотою помилкового виявлення загорянь.

В [13] досліджуються крос-кореляція динаміки концентрації CO та диму під час вогневих експериментів у приміщеннях. Показано, що використання крос-кореляції CO та диму дозволяє надійно виявляти загоряння для тестових осередків EN 54 [14, 15]. Експериментальному дослідженню застосування вказаної крос-кореляції при наявності збурень присвячена робота [16]. Показано, що, комбінуючи дані про динаміку концентрації CO та диму, вдається надійно виявляти більшість різновидів осередків загорянь в умовах збурень повітряного середовища. При цьому, отримані результати обмежуються дослідженнями крос-кореляції динаміки концентрації CO та диму. Важливі кореляції флуктуацій динаміки концентрації CO, диму та інших небезпечних факторів в приміщенні при загорянні не розглядаються.

Важливою областю приміщення, з точки зору раннього виявлення пожежі, є

зона стельового струменя, в якій виникають характерні нестационарні зміни параметрів середовища [17]. У [18] представлені результати дослідження динаміки автокореляцій та парних кореляцій параметрів середовища в стельовій зоні моделюючої камери при загорянні спирту, паперу, деревини та текстилю. Показано, що дійовою ознакою раннього виявлення загорянь може служити ступінь парної кореляції флуктуацій параметрів повітряного середовища для нульового лагу. Відзначається, що наявність загорянь на заданому інтервалі аналізу викликає незначне збільшення постійної часу флуктуацій досліджуваних параметрів середовища в порівнянні з інтервалом відсутності загоряння. Однак, постійна часу флуктуацій володіє низькою чутливістю щодо виявлення загоряння на ранній стадії розвитку пожежі. При цьому, важливі для раннього виявлення загорянь кореляції флуктуацій або інші показники флуктуацій середовища не досліджуються.

Результати експериментального дослідження флуктуацій параметрів газового середовища при загоряннях представлені в [19]. У цій роботі запропоновано нетрадиційний підхід до оцінки динаміки небезпечних факторів середовища заснований на поточній віконній оцінці лагових кореляцій Пірсона. Відмічається, що стійкою ознакою раннього виявлення загорянь, є кореляції нестационарних флуктуацій температури, концентрації CO та щільності диму газового середовища в приміщеннях. Інші показники динаміки стану середовища не досліджуються та не розглядаються.

Таким чином, аналіз літературних даних свідчить про те, що в даний час відсутні дослідження кореляції флуктуацій динаміки основних небезпечних факторів та стану газового середовища при ранньому займанні матеріалів в приміщеннях об'єктів. Такі дослідження вкрай важливі при розробці нових технологій виявлення раннього загоряння матеріалів в приміщеннях з метою недопущення пожежі. Тому, важливою та невирішеною частиною проблеми захисту приміщень від пожеж слід вважати експериментальне дослідження саме динаміки кореляцій флуктуацій основних параметрів та рекурентності природних станів небезпечних факторів газового середовища на ранніх стадіях загоряння в приміщеннях об'єктів.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження параметрів динаміки небезпечних факторів газового середовища на ранніх стадіях загоряння в приміщеннях об'єктів на основі експериментальних даних.

Для досягнення мети роботи сформульовано наступні завдання:

- дослідити динаміку кореляцій основних небезпечних факторів газового середовища приміщень на ранніх стадіях загоряння матеріалів;
- дослідити динаміку рекурентності природних станів небезпечних факторів газового середовища на ранніх стадіях загоряння в приміщеннях.

4. Дослідження динаміки кореляцій небезпечних факторів середовища при загорянні в приміщеннях

В загальному випадку аргументом міри автокореляцій та взаємних кореляцій є інтервал між двома значеннями одного або двох різних процесів. Дослідження динаміки автокореляцій та взаємних кореляцій небезпечних факторів газового середовища при ранніх загоряннях виконано для фіксованих інтервалів спостереження. При цьому, інтервали спостереження обиралися таким, щоб флуктуації небезпечних факторів стану середовища на цих інтервалах задовольняли ергоди-

чним властивостям. Кореляції визначались відповідними коефіцієнтами кореляції Пірсона щодо фіксованих інтервалів спостереження. Для кожного з інтервалів коефіцієнти Пірсона визначалися щодо заданого числа n дискретних відліків, зсунутих у часі. Коефіцієнти кореляції $r_{xy}(n)$ для двох довільних компонентів векторів даних X та Y на фіксованому інтервалі небезпечних факторів газового середовища при зсуванні на n відліків (лагів) визначалися у наступному вигляді:

$$r_{xy}(n) = \frac{\sum (x_j - \bar{x})(y_{j+n} - \bar{y}_n)}{\sqrt{\sum (x_j - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_{j+n} - \bar{y}_n)^2}}, \quad (1)$$

де \bar{x} – середнє значення компонента X середовища на фіксованому інтервалі спостереження; \bar{y}_n – середнє значення компонента Y середовища на фіксованому інтервалі спостереження, зсунутого на n відліків у часі. Варто відмітити, що кореляція (1) є лаговою та володіє найкращою інтерпретацією. Крім того (1) найкраще підходить для оцінки лінійного взаємозв'язку між двома довільними компонентами з розподілами Гауса. У випадку розподілу для одного або обох компонентів (1), що відрізняється від Гауса, вказана оцінка буде характеризувати ступінь їхнього лінійного зв'язку, але до неї вже не можна застосовувати відомі методи перевірки на значимість. Для автокореляцій щодо довільного компонента X у виразі (1) компонент Y замінюється компонентом X . При цьому, відомо, що статистична вірогідність кореляції (1) буде зберігатися для числа лагів, що не перевищують чверть від загального числа відліків на фіксованому інтервалі спостереження [20]. У зв'язку з відсутністю чіткої теорії щодо значень розглянутої кореляції, доцільно дотримуватися наступних рівнів: дуже слабка кореляція – (0–0,2); слабка кореляція – (0,2–0,5); середня кореляція – (0,5–0,7); висока кореляція – (0,7–0,9); дуже висока кореляція – (0,9–1).

Таким чином, запропонована кореляція (1) щодо фіксованих інтервалів дозволяє визначити чисельне значення автокореляцій і взаємних кореляцій небезпечних факторів середовища, що спостерігаються на різних фіксованих інтервалах спостереження, включаючи, наприклад, інтервали відсутності загоряння, його появи та подальшого розвитку горіння матеріалу.

Дослідження проводилися в спеціальній випробувальній камері, що імітує негерметичне приміщення об'єктів в разі загоряння та подальшому горінні тестових горючих матеріалів у вигляді спирту, паперу, деревини та текстилю [21]. Об'єм камери становив $0,524 \text{ м}^3$. У верхній частині камери, на висоті $0,84 \text{ м}$, розташовувалися чутливі сенсори, що реєструють небезпечні фізичні компоненти середовища при загорянні відповідних горючих матеріалів. При цьому, висота полум'я від осередку не перевищувала $0,2 \text{ м}$. Значення x_i небезпечних компонентів середовища в камері при загорянні матеріалів реєструвалися за допомогою теплового сенсора [22], оптичного сенсора щільності диму та сенсора оксиду вуглецю.

Дані у вигляді сигналів відповідних сенсорів реєструвалися в пам'яті персонального комп'ютера, а розроблене програмне забезпечення дозволяло здійснювати опитування відповідних сенсорів з різною дискретністю в часі. В експерименті опитування сенсорів здійснювалось з дискретністю, рівною $0,1 \text{ с}$. Примусовий підпал матеріалів проводився в момент часу, рівний приблизно 20 с , що відповідало дискретному відліку часу t_{200} .

Для дослідження динаміки небезпечних факторів середовища при загорянні обиралися два однакових інтервали тривалістю 200 відліків (20 с). Перший інтервал обирався в проміжку між 0-м та 200-м відліком та відповідав достовірній відсутності загоряння. Другий інтервал обирався в проміжку між 100-м та 300-м відліком і охоплював момент початку загоряння горючого матеріалу приблизно в середині інтервалу. Експериментальне дослідження динаміки основних небезпечних факторів при ранньому загорянні проводилося для кожного з горючих матеріалів у наступній послідовності: спирт, папір, деревина та текстиль. Реєстрація зазначених факторів середовища в камері для сеансу загоряння кожного з матеріалів здійснювалася протягом загального інтервалу спостереження, рівного 300 с. Після кожного сеансу загоряння матеріалів здійснювалася вентиляція камери протягом 10 хвилин з метою відновлення параметрів середовища в камері до стану, близького до вихідного.

В якості ілюстрації на рис. 1 в різних масштабах координат наведені результати дослідження динаміки небезпечних факторів середовища (T – температури, °C; CO – концентрації чадного газу, $\times 10^{-4}\%$; і D – щільності диму, дБ/м) у камері при загорянні спирту для двох інтервалів аналізу тривалістю по 20 с [20]. При цьому перший інтервал (рис. 1, а) відповідає відсутності загоряння в камері, а другий (рис. 1, б) – наявності загоряння спирту.

Точки на рис. 1 відповідають дискретним станам динаміки досліджуваних небезпечних факторів середовища на відповідних інтервалах спостереження. Колір точок визначає відносний рівень небезпечного фактору. При цьому, мінімальний рівень відповідає фіолетовому кольору, а максимальний рівень – червоному кольору. Аналогічні результати мали місце також у випадках загоряння паперу, деревини та текстилю.

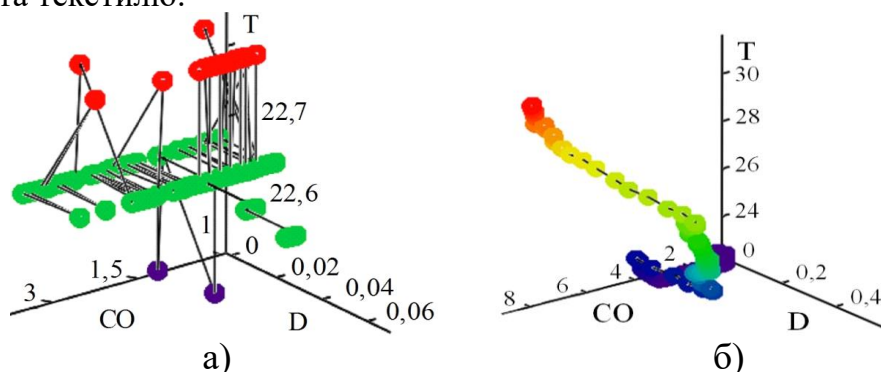


Рис. 1. Динаміка небезпечних факторів стану газового середовища в камері для двох тестових інтервалів аналізу: а – відсутність загоряння; б – наявність загоряння спирту

Із аналізу даних на рис. 1 випливає, що динаміка основних небезпечних факторів стану середовища в камері до загоряння матеріалів є локально-неоднорідною. Ця динаміка характеризується випадковими переходами між локальними станами в розглянутому просторі небезпечних факторів. При цьому, загоряння призводять до появи групування випадкових локальних станів середовища, які мали місце до загоряння. Це означає, що таке перетворення станів газового середовища може бути використано в якості інформаційної ознаки раннього виявлення загорянь у негерметичних приміщеннях. Таким чином, при появі загоряння початковий стійкий стан середовища порушується, що призводить до зміни характеру флуктуацій небезпечних факторів та всієї динаміки станів середовища. При цьому, характер флуктуацій небезпечних факторів станів середовища при ранніх загоряннях будуть відображатися в їх автокореляціях та взаємних кореляціях.

Експериментальне дослідження автокореляцій та взаємних кореляцій флуктуацій небезпечних факторів середовища здійснювалось для різних лагів n . Для одержання статистично достовірної оцінки кореляції визначалися для лагів, що не перевищували 50. Експериментальні функції автокореляції флуктуацій середньої об'ємної температури, щільності диму та концентрації СО середовища в камері наведені на рис. 2–5.

На рис. 2–5 через KT_n , KD_n та KCO_n позначені відповідно функції кореляції флуктуацій середньої об'ємної температури, щільності диму та концентрації СО, а через CDT_n , $CCOT_n$ і $CCOD_n$ парні взаємні кореляційні функції флуктуацій середньої об'ємної температури та щільності диму, концентрації СО та середньої об'ємної температури, концентрації СО і щільності диму відповідно.

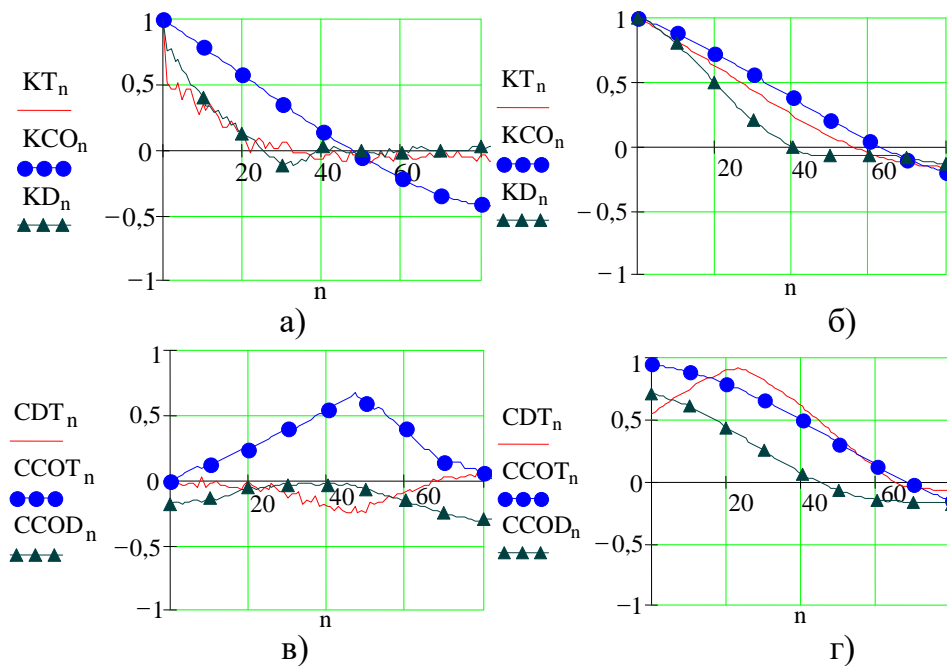


Рис. 2. Кореляційні функції флуктуацій досліджуваних факторів середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а, в – відсутності загоряння; б, г – наявності загоряння спирту

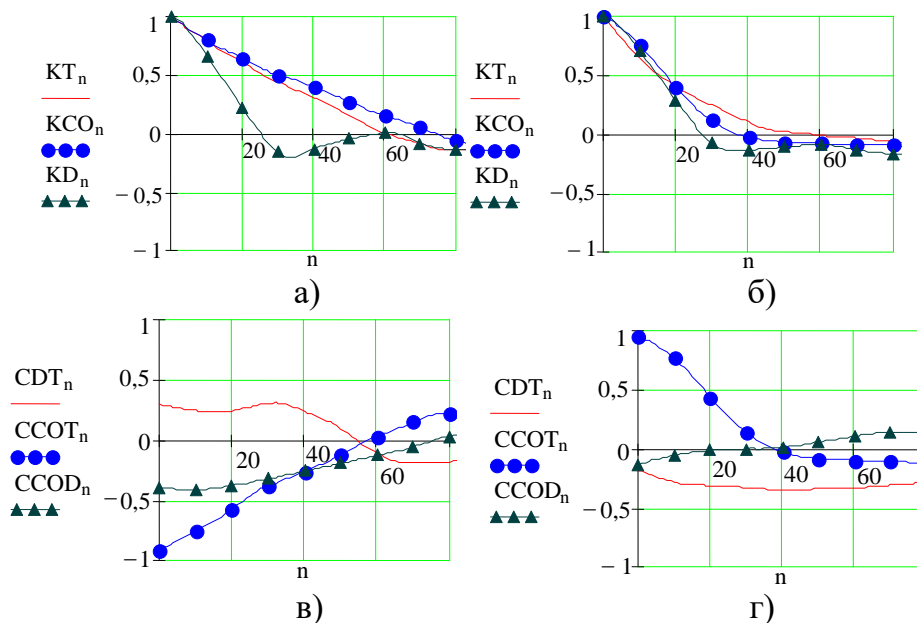


Рис. 3. Кореляційні функції флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а, в – відсутності загоряння; б, г – наявності загоряння паперу

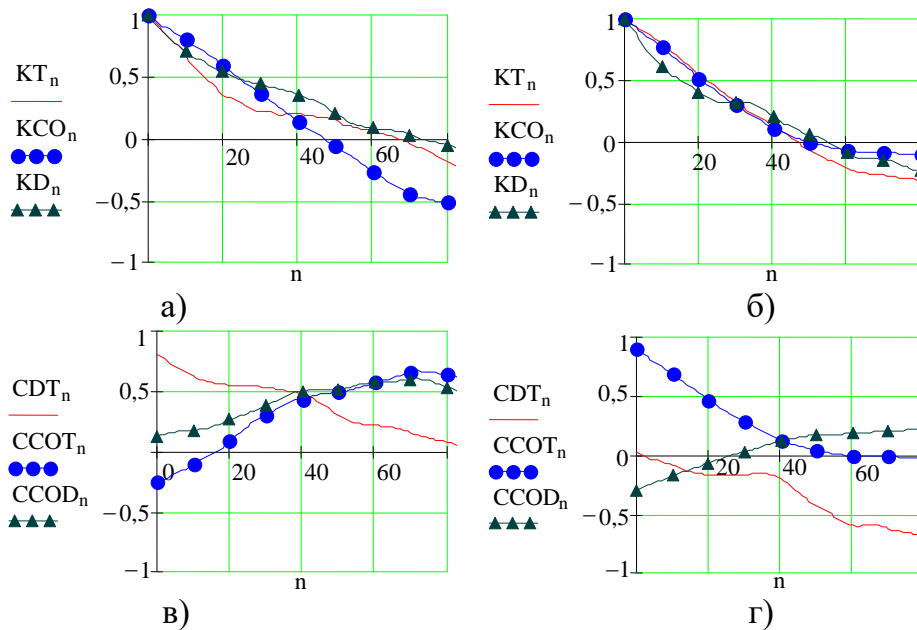


Рис. 4. Кореляційні функції флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а, в – відсутності загоряння; б, г – наявності загоряння деревини

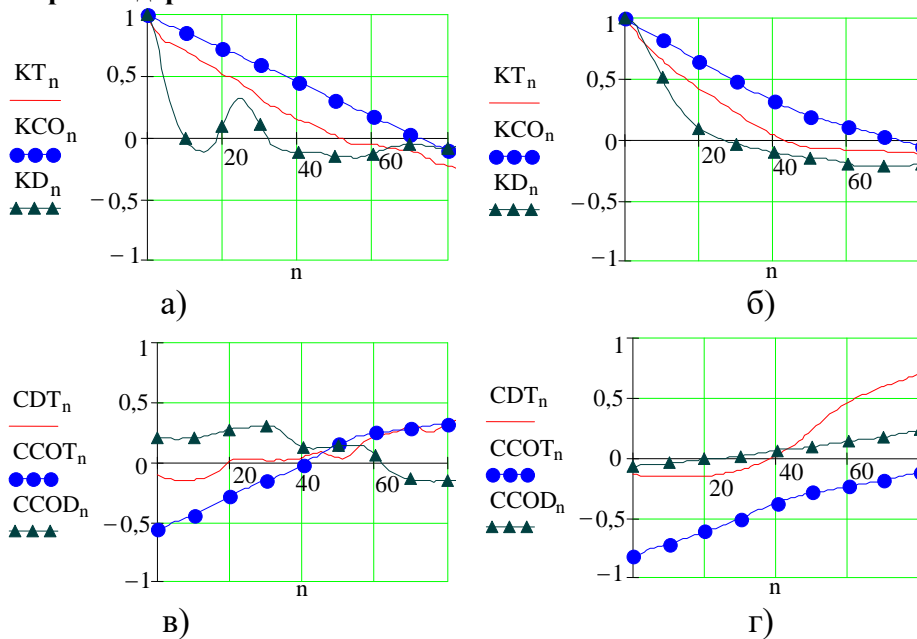


Рис. 5. Кореляційні функції флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів середовища в камері для двох інтервалів аналізу: а, в – відсутності загоряння; б, г – наявності загоряння тканини

Аналіз експериментальних залежностей на рис. 2–5 свідчить про те, що на інтервалі відсутності загорянь, функції кореляції флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів газового середовища, виявляються подібними. Це підтверджує висновок про динамічну стійкість станів газового середовища. Ступінь взаємних кореляцій флуктуацій розглянутих небезпечних факторів середовища в середньому оцінюється як слабка або дуже слабка. За винятком загоряння спирту. У цьому разі ступінь взаємної кореляції концентрації CO та температури середовища при нульовому лазі оцінюється як дуже висока та негативна. Аналіз кореляційних функцій показує, що найбільш тісний зв'язок між флуктуаціями для кожного з небезпечних факторів має місце при нульовому лазі. Це означає, що флуктуації кожного з факторів випадкові

та не мають циклів. При цьому, зі збільшенням величини лага ступінь зв'язку флуктуацій відповідних факторів середовища зменшується. Динаміка флуктуацій небезпечних факторів середовища, що характеризується їх постійною часу, чисельно дорівнює часовому лагу, при якому автокореляція стає близькою до нуля.

Наявність загорянь матеріалів у камері призводить до деякого збільшення постійної часу флуктуацій досліджуваних небезпечних факторів середовища. Однак, дана ознака виявляється недостатньо чутливою та надійною щодо раннього виявлення загорянь у приміщеннях об'єктів. Більш інформативною ознакою при цьому є ступінь взаємної кореляції флуктуацій небезпечних факторів газового середовища (рис. 2–5) при нульовому лазі. Встановлено, що у випадку загоряння спирту додатковою інформативною ознакою може бути величина взаємної кореляції флуктуацій щільності диму та середньої об'ємної температури (рис. 2 г) щодо 20 лага (наявність циклічних коливань із періодом 2 с). Для всіх тестових горючих матеріалів більш ефективною ознакою раннього виявлення загорянь є коефіцієнт взаємної кореляції флуктуацій концентрації CO та середньої об'ємної температури при нульовому лазі. При цьому для спирту, паперу та деревини коефіцієнт взаємної кореляції характеризує високий ступінь позитивної кореляції, а щодо текстилю теж високий ступінь, але негативної кореляції.

Таким чином, експериментальне дослідження (рис. 2–5) у цілому підтверджує наявність впливу ранніх загорянь на стан небезпечних факторів середовища у приміщеннях. Найбільш чутливими до загорянь є флуктуації небезпечних факторів. Тому подальше дослідження було направлено на властивості поточних прирощень станів небезпечних факторів повітряного середовища у приміщеннях.

5. Дослідження рекурентності прирощень станів небезпечних факторів при загоряння в приміщеннях

Небезпечні фактори стану повітряного середовища вимірювалися в дискретні моменти часу і з інтервалом $\Delta t=0,1$ секунда протягом 300 с. У ході експериментального дослідження дискретні моменти часу і на інтервалі спостереження 300 с нумерувалися від 0 до N. Таким чином, стан повітряного середовища в момент і визначався вектором $z(t_i)$ у трьохвимірному просторі. Для кожного дискретного моменту і вектора $z(t_i)=z_i$ станів газового середовища визначалася величина прирощення $x_i=z_i-z_{i+1}$ між поточним і та наступним і+1 станами цього вектора. Так величина x_i описувала реальну динаміку вектора прирощень станів середовища у приміщенні (рис. 6, а).

Відомо, що дослідження властивостей широкого кола складних динамічних систем виконують на основі RP [23]. Однак відомі методи обчислення RP не є оперативними та виявляються недостатньо чутливими до змін динаміки прирощень станів середовища при загораннях у приміщеннях. Це обмежує можливості застосування відомого методу RP щодо дослідження динаміки прирощень станів x_i середовища при загораннях. З метою усунення зазначених обмежень запропоновано модифікувати метод обчислення RP [24] відповідно до співвідношення:

$$\text{TRP}_{i,j}^{m,r} = \text{if}(i \neq j \mid j \leq i, R^{m,r}_{i,j}, 0), \quad (2)$$

де $H(r - \|x_i - x_j\|) = R^{m,r}_{i,j}$ визначає відомий метод обчислення RP для усіх $x_i \in \Omega^m$ у просторі Ω^m розмірності m та $i, j = 1, 2, \dots, N$ [24].

Вираз (2) визначає запроповану модифікацію обчислення РР щодо прирощень станів середовища в реальному часі спостереження. На підставі (2) запропоновано поточну міру РС прирощення станів повітряного середовища при загорянні в приміщеннях, що визначається у вигляді:

$$M_2(i,r) = \frac{1}{i+1} \sum_{k=0}^i TRP_{i,k}^{m,r} . \quad (3)$$

Міра (3) реалізується схемою на рис. 6, б та чисельно характеризує РС прирощення небезпечних факторів повітряного середовища в приміщеннях для поточного дискретного моменту часу i з урахуванням розміру r околиці рекурентності станів x_i . Ця міра дозволяє досліджувати в реальному часі особливості динаміки рекурентності прирощення станів небезпечних факторів газового середовища, що є характерними для стійких станів та станів втрати цієї стійкості.

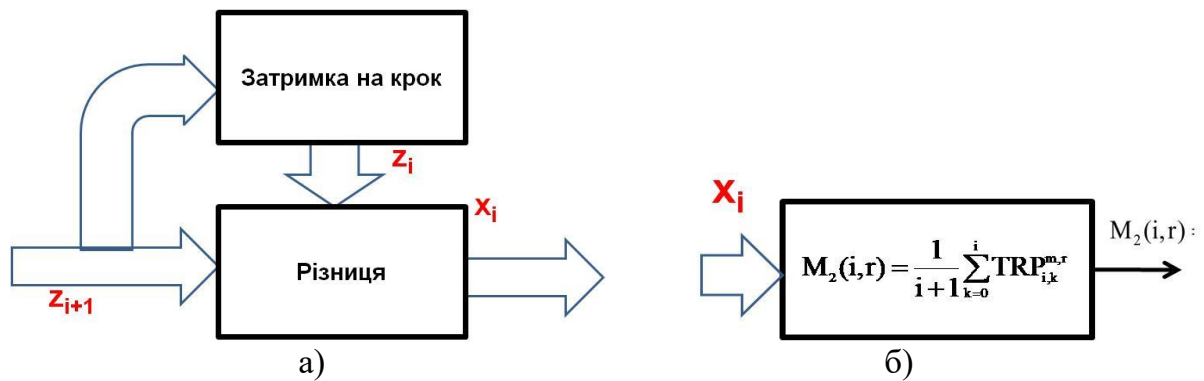


Рис. 6. Схеми обчислення прирощень станів та РС у дослідженнях

У якості ілюстрації на рис. 7 наведені поточні рекурентні діаграми вектору прирощень станів середовища у випробувальній камері при загоряннях спирту та паперу.

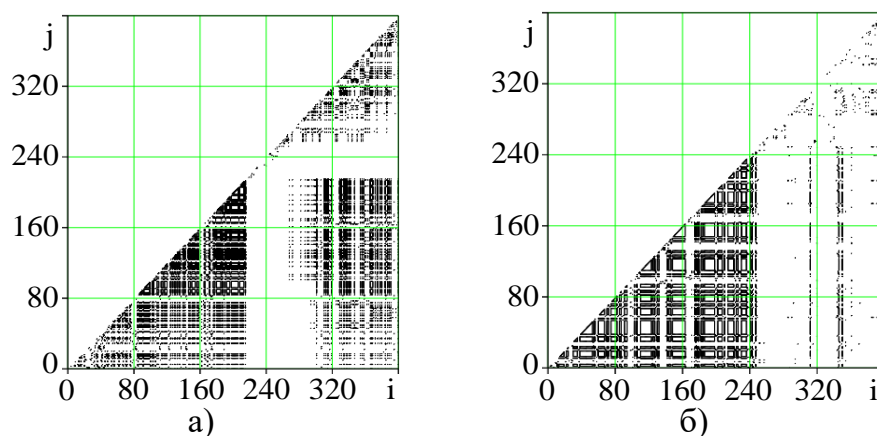


Рис. 7. Поточні рекурентні діаграми вектору прирощень станів середовища у випробувальній камері при загоряннях: а – спирту; б – паперу

Результати дослідження динаміки оцінки імовірності РС (3) щодо поточного вектору прирощень станів середовища при загорянні спирту та паперу в камері у випадку $\varepsilon=0,01$ ілюструються на рис. 8.

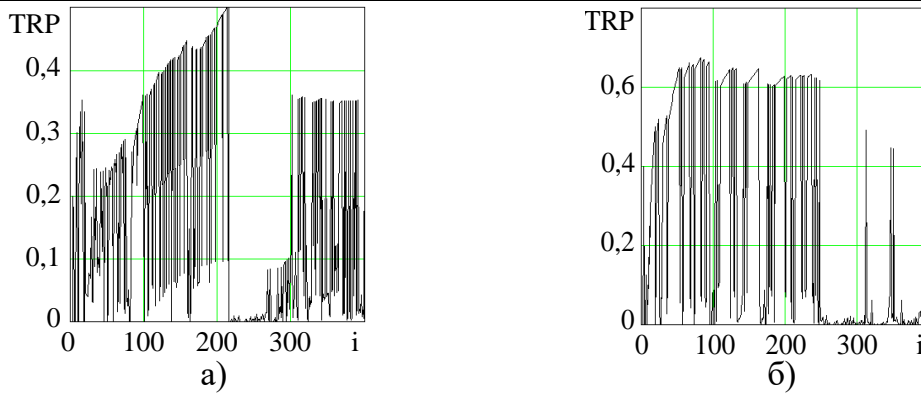


Рис. 8. Динаміка РС щодо вектору прирощень станів середовища при загорянні матеріалів у випробувальній камері: а – спирт; б – папір

Аналогічні результати мали місце і для загорянь деревини та тканини.

6. Обговорення отриманих результатів

З аналізу даних на рис. 1 випливає, що динаміка факторів стану середовища в камері до загоряння матеріалів є локально-неоднорідною і розподіленою в просторі факторів з випадковими переходами між локальними станами. При наявності загорянь на заданому інтервалі в досліджуваному середовищі спостерігається групування розподілених локальних станів середовища. Випадковий характер групування станів середовища зберігається, хоча динаміка групування станів носить різний характер для спирту та паперу. Аналогічні результати характерні для диму і СО. В цілому поява загоряння матеріалу призводить до відповідної трансформації вихідної динаміки факторів стану середовища. Це означає, що зазначена трансформація може бути використана в якості інформаційної ознаки раннього загоряння в негерметичних приміщеннях об'єктів. При цьому, за характером динаміки стану середовища можливо в принципі здійснювати розпізнавання типу займання матеріалу в приміщенні. Поясненням цього може бути різний складний характер фізичних перетворень в газовому середовищі при впливі тепла, диму та чадного газу від осередку загоряння матеріалу. При цьому, до загоряння в газовому середовищі мають місце малі випадкові флуктуації розглянутих факторів.

Аналіз даних на рис. 2–5 свідчить про те, що на інтервалі аналізу, що відповідає відсутності загоряння, динаміка досліджуваних факторів середовища виявляється приблизно однаковою. Це відповідає відносній стабільності розглянутих факторів середовища. Ступінь взаємних парних кореляцій досліджуваних факторів при цьому оцінюється в середньому як слабка або дуже слабка. Ступінь взаємної кореляції СО та температури при нульовому лазі оцінюється як дуже висока та негативна.

Аналіз автокореляцій показує, що найбільш тісний зв'язок між значеннями кожного з факторів має місце при нульовому лазі. Це означає, що кожен з факторів є випадковим та не має циклів та трендів. При цьому зі збільшенням величини лага ступінь зв'язку значень відповідного фактора середовища зменшується. Динаміка досліджуваних флуктуацій чинників визначається їх постійної часу, яка чисельно дорівнює тимчасовому лагу, при якому автокореляція близька до нуля. Результати експерименту свідчать про те, що наявність загорянь викликає деяке збільшення постійної часу флуктуацій досліджуваних факторів середовища. Однак, цей показник загорянь виявляється недостатньо чутливим для його використання в якості ознаки для надійного раннього виявлення загорянь в приміщеннях.

Більш інформативною ознакою раннього виявлення загорянь є ступінь взаємної (парної) кореляції флуктуацій факторів середовища (рис. 2–5) при нульово-

му лазі. Обумовлене це випадковим характером розвитку змін розглянутих факторів середовища при загорянні матеріалів. При цьому встановлено, що в разі загоряння спирту додатковою ознакою загоряння може бути взаємна кореляція концентрацій диму та температури (рис. 2, г) для 20 лагу (циклічних коливань з періодом 2 с). За результатами досліджень кореляцій можна зробити висновок про те, що для всіх типів тестових горючих матеріалів ефективною ознакою раннього виявлення загоряння є коефіцієнт парної кореляції CO та температури при нульовому лазі. При цьому, для спирту, паперу та деревини зазначений коефіцієнт парної кореляції характеризує дуже високий ступінь позитивної кореляції, а для текстилю дуже високий ступінь негативної кореляції.

Із аналізу експериментальних RP на рис. 7 видно, що динаміка вектору прирощень станів середовища у випадку загоряння спирту та паперу у випробувальній камері виявляється різною. До моменту загоряння динаміка вектору прирощень станів виявляється схожою та характеризується різкою зміною стійкості протягом достатньо коротких інтервалів часу. Такі зміни характерні для умов динамічної рівноваги прирощень станів середовища при відсутності загорянь в приміщенні. Деякі відмінності в RP на цьому інтервалі (приблизно до 240 відліку) пояснюються тим, що загоряння паперу відбувалося після загоряння спирту з подальшою вентиляцією камери. Однак схожий характер діаграм до загоряння свідчить про достатній ступінь вентиляції камери та встановлення динамічної рівноваги прирощень станів. Білі області на поточних RP свідчать про відсутність рекурентності щодо вектору прирощень станів середовища [24]. Ці області характеризують властивості щодо втрати стійкості станів середовища та відповідають початку загоряння спирту та паперу. Подальша динаміка вектору прирощень станів середовища має не випадковий, а хаотичний характер, пов'язаний з нестійкістю станів середовища. При цьому на рис. 7 чітко відображаються області появи загорянь (області білих точок на поточних RP).

Тому поточні RP щодо вектору прирощень станів середовища в цілому дозволяють виявляти раннє загоряння. Трикутні форми поточних RP на рис. 7 на відміну від традиційних прямокутних обумовлені тим, що вони обчислюються в реальному часі спостереження. Тому трикутне відображення RP є оперативною формою подання RP. Використання таких RP для обчислення запропонованої поточної міри PC щодо вектору прирощень станів середовища (3), що чисельно дорівнює поточній оцінці імовірності їхньої повторюваності (рис. 8). Це свідчить про можливість використання запропонованої поточної міри RP та міри PC щодо виявлення ранніх загорянь у приміщеннях об'єктів.

6. Висновки

1. Експериментально встановлено, що при наявності загорянь в досліджуваному середовищі відбувається групування розподілених локальних станів середовища, характер якого залежить від матеріалу загоряння. Відмічається, що саме характер групування може бути використаний в якості інформаційної ознаки щодо раннього виявлення загорянь в негерметичних приміщеннях та розпізнавання типу матеріалу, що загоряється. Встановлено, що поява загорянь викликає деяке збільшення постійної часу флуктуацій досліджуваних факторів газового середовища. Однак, цей показник загорянь виявляється недостатньо чутливим для його використання в якості ознаки раннього виявлення загорянь. Більш інформативною ознакою раннього виявлення загорянь слід вважати ступінь взаємної (парної) кореляції флуктуацій факторів середовища при нульовому лазі. У випадку заго-

ряння спирту додатковою ознакою може бути взаємна кореляція диму та температури при 20 лазі. Експериментально встановлено, що для горючих матеріалів у вигляді спирту, паперу, деревини та текстилю ефективною ознакою раннього загоряння є коефіцієнт парної кореляції СО та температури при нульовому лазі. Одержано, що для спирту, паперу та деревини парний коефіцієнт кореляції близький до одиниці, а для текстилю – до мінус одиниці.

2. Результати дослідження динаміки рекурентності прирощень станів небезпечних факторів середовища на ранніх стадіях загоряння в приміщеннях свідчать про переваги міри РС в порівнянні з кореляціями раннього виявлення загорянь матеріалів у приміщеннях об'єктів. Експериментально встановлено, що запропонована міра поточної РС може бути надійною ознакою виявлення ранніх загорянь в приміщеннях та використана з метою підвищення ефективності різних технічних засобів та систем захисту приміщень від пожеж та вибухів.

Література

1. Poulsen A., Jomaas G. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings // *Fire Technology*. 2012. № 48. P. 419–439.
2. Wu, Y. Harada T. Study on the Burning Behaviour of Plantation Wood // *Scientia Silvae Sinicae*. 2004. №40. P. 131.
3. Zhang D., Xue W. Effect of Heat Radiation on Combustion Heat Release Rate of Larch // *Journal of West China Forestry Science*. 2010. №39. 148.
4. Ji J., Yang L., Fan W. Experimental Study on Effects of Burning Behaviours of Materials Caused by External Heat Radiation // *Journal of Combustion Science and Technology*. 2003. №9. P. 139.
5. Peng X., Liu S., Lu G. Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials // *Journal of Chongqing University*. 2005. №28. P. 122.
6. Andronov V., Pospelov B., Rybka E. Increase of accuracy of definition of temperature by sensors of fire alarms in real conditions of fire on objects // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. V. 4 (82). №5. P. 38–44. <https://doi:10.15587/1729-4061.2016.75063>
7. Andronov V., Pospelov B., Rybka E. Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 2. Issue 9 (86). P. 32–37. <https://doi:10.15587/1729-4061.2017.96694>
8. Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 4. Issue 9 (88). P. 53–59. <https://doi:10.15587/1729-4061.2017.108448>
9. Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by self-adjusting fire detectors / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 5/9 (89). P. 43–48. <https://doi:10.15587/1729-4061.2017.110092>
10. Shi M., Bermak A., Chandrasekaran S., Amira A., Brahim-Belhouari S. A committee machine gas identification system based on dynamically reconfigurable FPGA // *IEEE Sens. J*. 2008. №8. P. 403–414.
11. Skinner A. J., Lambert M. F. Using smart sensor strings for continuous monitoring of temperature stratification in large water bodies // *IEEE Sensors J*. 2006. №6. P. 1473–1481.
12. Cheon J., Lee J., Lee I., Chae Y., Yoo Y., Han G. A single-chip CMOS smoke and temperature sensor for an intelligent fire detector // *IEEE Sens. J*. 2009. №9. P. 914–920.
13. Aspey R.A., Brazier K.J., Spencer J.W. Multiwavelength sensing of smoke using a polychromatic LED: Mie extinction characterization using HLS analysis // *IEEE Sens. J*. 2005. №5. P. 1050–1056.

14. Heskestad G., Newman J. S. Fire Detection Using Cross-Correlations of Sensor Signals // Fire Safety J. 1992. V. 18. №4. P. 355–374.

15. BS EN 54-30:2015 Fire detection and fire alarm systems. Part 30: Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of carbon monoxide and heat sensors.

16. BS EN 54-31:2014 Fire detection and fire alarm system. Part 31: Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of smoke, carbon monoxide and optionally heat sensors.

17. Gottuk D. T., Wright M. T., Wong J. T., Pham H. V., Rose-Pehrsson S. L., Hart S., Hammond M., Williams F. W., Tatem P. A., Street T. T. Prototype Early Warning Fire Detection Systems: Test Series 4 Results // NRL/MR/6180-02-8602, Naval Research Laboratory, February 15, 2002.

18. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide / National Institute of Standards and Technology. 2016. V. 3. 6 th ed.

19. Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Popov V., Romin A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. V. 1 (91). №10. P. 50–55. [https://doi: 10.15587/1729-4061.2018.122419](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122419)

20. Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises / Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S., Shcherbak S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. V. 6 (90). №10. P. 50–56. [https://doi: 10.15587/1729-4061.2017.117789](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117789)

21. Meleshchenko R. G. System analysis of prevention of man-made emergency situations in consequence of fire in the premises of the object // ScienceRise. 2020. Issue 1 (66). P. 38–46. [https://doi: 10.21303/2313-8416.2020.001150](https://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001150)

22. Meleschenko R. G., Dureev V. O. Mathematical model of thermal fire detector with the thermistor // Проблеми пожеарної безпеки: Сборник научних трудов. Харків: НУГЗУ. Вип. 44. 2018. С. 89–92.

23. The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out / Semko A., Rusanova O., Kazak O., Beskrovnyaya M., Vinogradov S., Gricina I. // The International Journal of Multiphysics. 2015. V. 9. Issue 1. P. 9–20. [doi: https://doi.org/10.1260/1750-9548.9.1.9](https://doi.org/10.1260/1750-9548.9.1.9)

24. Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. V. 4 (88). № 9. P. 53–59. [doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108448](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108448)

B. Pospelov, DSc, Professor, Chief Researcher

E. Rybka, DSc, Senior Researcher, Deputy Head of the Center – Head of Department

M. Samoylov, Adjunct

Y. Bezuhla, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

O. Yashchenko, PhD, Associate Professor, Deputy Head of Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DYNAMICS OF DANGEROUS FACTORS OF THE ENVIRONMENT DURING COMBUSTION IN THE PREMISES

The results of experimental research of dynamics of dangerous factors of air environment at fires in premises of objects are resulted. It is established that the degree of mutual (pair) correlation of fluctuations of environmental factors at zero manhole is an informative sign for early detection of fires. It is obtained that for test materials of ignition in the form of alcohol, paper and wood the pair correlation coefficient is close to unity, and for textiles - to minus unity. It is experimentally established that in the presence of fires in the room in the studied environment there is a grouping of distributed local states, Civil Security. DOI: 10.52363/2524-0226-2021-33-4

the nature of which depends on the material of ignition. It is noted that the nature of the grouping can also be used as an information sign of early detection of fires in the premises and the recognition of the type of flammable material. It is established that fires lead to some increase in the time constant of fluctuations of the studied environmental factors. However, the rate of fires is not sensitive enough to use as a sign of early detection of fires. A more informative feature in the framework of the correlation approach should be considered the degree of mutual (pair) correlation of fluctuations of environmental factors at zero manhole. It is established that in the case of alcohol ignition, an additional sign may be the mutual correlation of smoke and temperature at 20 laz. It is experimentally confirmed that for the considered combustible materials an effective sign of early ignition is the coefficient of pair correlation of carbon monoxide and temperature at zero manhole. The results of the study of the dynamics of recurrence of increments of dangerous environmental factors indicate the advantages of the degree of recurrence of states in comparison with the correlations for early detection of material fires in the premises. It has been experimentally established that the proposed measure of the current recurrence of conditions can be a reliable sign for the detection of early fires in the premises and used to increase the effectiveness of various technical means and systems for protection of premises from fires and explosions.

Keywords: fire, dynamics, correlations of dangerous factors, state of air environment, recurrence diagram, measure of recurrence of states

References

1. Poulsen, A., Jomaas, G. (2012). Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings. *Fire Technology*, 48, 419–439.
2. Wu, Y., Harada, T. (2004). Study on the Burning Behaviour of Plantation Wood. *Scientia Silvae Sinicae*, 40, 131.
3. Zhang, D., Xue, W. (2010). Effect of Heat Radiation on Combustion Heat Release Rate of Larch. *Journal of West China Forestry Science*, 39, 148.
4. Ji, J., Yang, L., Fan, W. (2003). Experimental Study on Effects of Burning Behaviours of Materials Caused by External Heat Radiation. *Journal of Combustion Science and Technology*, 9, 139.
5. Peng, X., Liu, S., Lu, G. (2005). Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. *Journal of Chongqing University*, 28, 122.
6. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E. (2016). Increase of accuracy of definition of temperature by sensors of fire alarms in real conditions of fire on objects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/5 (82), 38–44. <https://doi:10.15587/1729-4061.2016.75063>
7. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E. (2017). Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (86)), 32–37. <https://doi:10.15587/1729-4061.2017.96694>
8. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (88)), 53–59. <https://doi:10.15587/1729-4061.2017.108448>
9. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by self-adjusting fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/9 (89), 43–48. <https://doi:10.15587/1729-4061.2017.110092>
10. Shi, M., Bermak, A., Chandrasekaran, S., Amira, A., Brahim-Belhouari, S. (2008). A committee machine gas identification system based on dynamically reconfigurable FPGA. *IEEE Sens J.*, 8, 403–414.
11. Skinner, A. J., Lambert, M. F. (2006). Using smart sensor strings for continuous monitoring of temperature stratification in large water bodies. *IEEE Sensors J.*, 6, 1473–1481.
12. Cheon, J., Lee, J., Lee, I., Chae, Y., Yoo, Y., Han, G. (2009). A single-chip CMOS smoke and temperature sensor for an intelligent fire detector. *IEEE Sens. J.*, 9, 914–920.

13. Aspey, R. A., Brazier, K. J., Spencer, J. W. (2005). Multiwavelength sensing of smoke using a polychromatic LED: Mie extinction characterization using HLS analysis. *IEEE Sens J.*, 5, 1050–1056.
14. Heskestad, G., Newman, J. S. (1992). Fire Detection Using Cross-Correlations of Sensor Signals. *Fire Safety J.*, 18/4, 355–374.
15. BS EN 54-30:2015 Fire detection and fire alarm systems. – Part 30: Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of carbon monoxide and heat sensors.
16. BS EN 54-31:2014 Fire detection and fire alarm system. – Part 31: Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of smoke, carbon monoxide and optionally heat sensors.
17. Gottuk, D. T., Wright, M. T., Wong, J. T., Pham, H. V., Rose-Pehrsson, S. L., Hart, S., Hammond, M., Williams, F. W., Tatem, P. A., Street, T. T. (2002). Prototype Early Warning Fire Detection Systems: Test Series 4 Results, NRL/MR/6180-02-8602, Washington, DC, Naval Research Laboratory.
18. McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. (2016). Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, V. 3, 6th ed. National Institute of Standards and Technology.
19. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Popov, V., Romin, A. (2018). Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (91)), 50–55. <https://doi:10.15587/1729-4061.2018.122419>
20. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S., Shcherbak, S. (2017). Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (90)), 50–56. <https://doi:10.15587/1729-4061.2017.117789>
21. Meleshchenko, R. G. (2020). System analysis of prevention of man-made emergency situations in consequence of fire in the premises of the object. *ScienceRise*, 1 (66), 38–46. <https://doi:10.21303/2313-8416.2020.001150>
22. Meleschenko, R. G., Dureev, V. O. (2018). Mathematical model of thermal fire detector with the thermistor // *Problemy pozharnoy bezopasnosti*, 44, 89–92.
23. Semko, A., Rusanova, O., Kazak, O., Beskrovnaya, M., Vinogradov, S., Gricina, I. (2015). The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. *The International Journal of Multiphysics*, 9, 1, 9–20. doi: <https://doi.org/10.1260/1750-9548.9.1.9>
24. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (88)), 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108448>

Надійшла до редколегії: 02.03.2021

Прийнята до друку: 05.04.2021