

УДК 621.03

Б. Б. Поспелов, д.т.н., професор, провідн. н.с. (ORCID 0000-0002-0957-3839)

Р. Г. Мелещенко, д.т.н., професор, доц. каф. (ORCID 0000-0001-5411-2030)

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)

А. С. Мельниченко, PhD, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-7229-6926)

М. О. Самойлов, викл. каф. (ORCID 0000-0002-8924-7944)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

БІКОГЕРЕНТНІСТЬ ДИНАМІКИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЗАГОРЯННЯХ МАТЕРІАЛІВ

Об'єктом дослідження є бікогерентність динаміки небезпечних параметрів газового середовища при загоряннях матеріалів у приміщеннях. Частина проблеми, що вирішувалась, полягала у виявленні особливостей бікогерентності динаміки небезпечних параметрів газового середовища при відсутності та появі загорянь в приміщеннях. Результати досліджень свідчать про те, що характер динаміки досліджуваних небезпечних параметрів газового середовища за відсутності та наявності загоряння матеріалів суттєво відрізняється від розподілу Гауса. Встановлено, що бікогерентність на відміну від традиційного спектра динаміки небезпечних параметрів газового середовища, володіє значно більшими інформаційними особливостями та може бути використана для раннього виявлення загорянь. Встановлено, що інформаційними особливостями бікогерентності динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища є конфігурація, число та положення обмежених областей, що відповідають повній когерентності або повної протилежної когерентності, а також типу частотних триплетів, що є характерними для таких обмежених областей. Крім того особливістю бікогерентності динаміки небезпечних параметрів газового середовища є також наявність великих областей з характерними близькими до нульового рівня запропонованої міри бікогерентності. Наявність таких областей в діаграмах бікогерентності свідчить про втрату когерентності для відповідної множини триплетів. За результатами експерименту встановлено, що така особливість бікогерентності характерна для динаміки чадного газу при загорянні спирту та деревини, а також для динаміки температури при загорянні спирту, паперу та текстилю. На практиці новизна та оригінальність отриманих результатів дослідження, пов'язана з можливістю використання бікогерентності динаміки небезпечних параметрів газового середовища для виявлення загорянь з метою недопущення пожеж в приміщеннях.

Ключові слова: загоряння матеріалів, газове середовище приміщень, небезпечні параметри пожежі, бікогерентність, динаміка небезпечних параметрів

1. Вступ

Безпечне функціонування різноманітних об'єктів є одним із важливих завдань для будь-якої держави [1]. Небезпека функціонування об'єктів виникає у випадку появи різного роду небезпечних подій [2]. Небезпечні події є характерними для більшості об'єктів технічної, екологічної та соціальної сфери [3, 4]. Найбільш поширеною небезпечною подією, що виникає на об'єктах, є пожежа в приміщенні (ПП) [5]. Зазвичай пожежа спричиняє значну шкоду людині [6, 7], об'єктам [8] та навколишньому середовищу [9, 10]. Тому головним у безпечному функціонуванні об'єктів в першу чергу є недопущення ПП. У зв'язку з цим запобігання виникненню ПП об'єктів є актуальною проблемою на сучасному етапі розвитку країн світу.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [11] відмічається, що небезпечне функціонування об'єктів слід пов'язувати з недопущенням ПП за рахунок раннього виявлення загорянь в приміщеннях. При цьому в [12] акцент робиться на важливості для раннього виявлення загорянь урахування особливостей динаміки небезпечних параметрів газового середо-

вища (ГС) приміщень при появі загорянь. Такі особливості динаміки небезпечних параметрів ГС обмежуються дослідженнями тільки в часовій області [12]. Частотна область для цього не використовувалася. Наприклад, відома адаптивна технологія [13] обмежуються лише урахуванням особливостей динаміки енергетичних характеристик небезпечних параметрів в часовій області. Крім того передові технології, що реалізовані в стандартах EN і ISO [14–16] також обмежуються тільки часовою областю. Дослідженню динаміки швидкості виділення тепла за різної інтенсивності горіння деревини присвячена робота [17]. Однак у [17] дослідження обмежуються лише середньою часовою динамікою швидкістю виділення тепла в залежності від середньої інтенсивності горіння. Аналогічні дослідження для органічного скла та кипарису виконані в [18]. При цьому в [17, 18] відсутні дослідження спектральних особливостей другого та третього порядку щодо динаміки небезпечних параметрів ГС при горінні матеріалів. Різноманіття та складність реальних умов у приміщеннях потребують для виявлення особливостей динаміки небезпечних параметрів ГС застосування нових підходів. У зв'язку з цим актуальними стають дослідження особливостей динаміки небезпечних параметрів ГС на основі сучасних технологій в частотній та часовій областях. Наприклад, у роботах [19–22] досліджуються нові технології виявлення ранніх загорянь, які використовують різні показники фрактальності небезпечних параметрів ГС приміщень. Так у роботі [19] використовується кореляційна розмірність щодо вектору стану небезпечних параметрів ГС. Застосування для виявлення ранніх загорянь рекурентних діаграм для динаміки концентрації чадного газу у приміщеннях розглядається в [20]. Міри рекурентності вектора стану ГС щодо короткострокового прогнозу ПП розглядається у [21]. Модифікована модель Брауна для прогнозування ПП описується у [22]. Технологія використання адаптивних рекурентних діаграм розглянута в [23]. Застосування технології рекурентних діаграм для оперативного виявлення небезпечних станів ГС наведено у [24]. Розвиток традиційної кореляційної технології оперативного виявлення рекурентних станів ГС розглянуто у [25]. Застосування методу структури для виявлення небезпечних станів ГС розглянуто в [26]. Однак результати досліджень, що представлені в [19–26], обмежуються розглядом лише часової області. При цьому важливі для виявлення ранніх загорянь особливості поточної динаміки небезпечних параметрів ГС при загоряннях у спектральній області в наведених роботах не досліджуються. В роботі [27] вперше досліджуються миттєві амплітудні та фазові частотні спектри динаміки небезпечних параметрів ГС приміщень при загоряннях. Зазначається, що миттєві амплітудні частотні спектри виявляються малоінформативними для виявлення ранніх загорянь. Слід зазначити, що такий висновок в [27] зроблено на основі результатів амплітудних частотних спектрів другого порядку, які не враховують спектральний зв'язок між іншими частотними складовими, що є характерними для нелінійних перетворень. Амплітудні та фазові біспектри, що здатні виявляти нелінійні перетворення в [27] не досліджуються. Результати дослідження взаємних зв'язків між поточними значеннями небезпечних параметрів ГС при загоряннях наведено у [28]. Однак представлені результати обмежуються лише кореляційними зв'язками в часовій області, що дозволяють виявляти тільки лінійний тип зв'язку. Спектральні характеристики порядку вище другого, що дозволяють виявляти інші типи зв'язків, при цьому не розглядаються та не досліджуються.

Таким чином, виконаний аналіз свідчить про те, що недостатньо дослідженими є особливості динаміки небезпечних параметрів ГС при загоряннях у приміщеннях у частотній області у вигляді спектрів вищого порядку. По-перше це стосується дослідження фазових спектрів третього порядку – бікогерентності. У

зв'язку з цим важливою та невирішеною частиною проблеми, що розглядається, є дослідження особливостей бікогерентності динаміки основних небезпечних параметрів ГС при загоряннях у приміщеннях.

3. Мета та завдання дослідження

Мета роботи – виконати дослідження особливостей бікогерентності динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища при загоряннях у приміщеннях, які дозволять використовувати виявлені особливості бікогерентності для раннього виявлення загорянь та подальшого попередження виникнення пожеж у приміщеннях.

Для досягнення мети роботи поставлено завдання:

- обґрунтувати методику визначення бікогерентності динаміки для довільного небезпечного параметра газового середовища, що спостерігається на довільному фіксованому інтервалі часу;
- виявити особливості бікогерентності експериментальної динаміки для небезпечних параметрів газового середовища на інтервалах відсутності та появи загоряння тестових матеріалів у лабораторній камері.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є бікогерентність динаміки небезпечних параметрів ГС при загоряннях матеріалів. Робоча гіпотеза полягає у відмінностей бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС при загоряннях. Виявлення таких відмінностей дозволить їх використання для виявлення появи З, які є джерелами ПП. Прийняті припущення та спрощення визначаються в тому, що динаміка небезпечних параметрів ГС при загоряннях у приміщеннях та у лабораторній камері подібна [29]. Лабораторна камера дозволяє відтворювати експериментальну динаміку небезпечних параметрів ГС подібну стельовій ділянці у негерметичних приміщеннях при загоряннях. В якості тестових матеріалів загоряння використовувалися спирт, папір, деревина та текстиль. У якості небезпечних параметрів ГС в камері розглядалися температура, щільність диму та концентрація чадного газу (ЧГ). Вимірювання температури проводилися тепловим датчиком ТПТ-4 (Україна), щільності диму – оптичним датчиком диму ДИП-3.2 (Україна) та концентрації ЧГ – датчиком Discovery (Швейцарія). Результати вимірювань датчиками зберігалися в пам'яті комп'ютера. Спеціальне програмне забезпечення дозволяло опитувати датчики з довільним інтервалом часу. Однак у експерименті опитування відповідних датчиків здійснювалось дискретно з інтервалом 0,1 с. При цьому примусовий підпал тестових матеріалів проводився в дискретний момент 230, що відповідає 23 секунді з початку вимірювання. Дослідження особливостей бікогерентності динаміки вимірюваних небезпечних параметрів ГС в камері виконувалося для двох однакових за тривалістю інтервалів часу, що визначалися 10 с. Перший інтервал вибирався у проміжку між 100-м та 200-м дискретними вимірами та відповідав достовірній відсутності загоряння. Другий інтервал вибирався в проміжку між 200-м та 300-м дискретними вимірами та охоплював момент часу примусового підпалу (початку загоряння) відповідного матеріалу. Дослідження проводилося послідовно для кожного з тестових матеріалів: спирт, папір, деревина та текстиль. Для відновлення початкового стану ГС камери перед кожним підпалом тестового матеріалу призволилась природна вентиляція камери протягом 5 хвилин.

5. Результати дослідження бікогерентності динаміки небезпечних параметрів газового середовища при загорянні

5.1. Обґрунтування методики визначення бікогерентності динаміки довільного небезпечного параметра газового середовища

Біспектри є одним із відносно нових інструментів виявлення та ідентифікації нелінійних властивостей різних процесів [30]. Наприклад, застосування біспектру для виявлення загорянь електрообладнання розглядається у [31]. Зазначається, що виявленню загорянь електрообладнання перешкоджає наявність випадкових шумів з розподілом гаусу, які важко усунути як перешкоду. У [32] наголошується, що біспектр є потужним інструментом виявлення особливостей процесів, які відрізняються від гаусу. Біспектри надають більше корисної інформації у порівнянні з класичним спектром потужності. Оцінка $B(f_1, f_2)$ біспектру, слідуючи [33], визначатиметься як

$$B(f_1, f_2; T) = X(f_1; T)X(f_2; T)X^*(f_1 + f_2; T), \quad (1)$$

де $B(f_1, f_2; T)$ – функція змінних f_1 та f_2 , що мають сенс відповідних частотних індексів; $X(f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp(-j2\pi f k / N)$, $(0 \leq k \leq N-1)$ – перетворення Фур'є для довільного частотного індексу f $(0 \leq f \leq N-1)$ та заданої дискретної множини $\{x(k)\}$ значень досліджуваного небезпечного параметру ГС; $*$ – оператор комплексного сполучення. При цьому довільному частотному індексу f відповідає величина частоти f/T Гц, де величина T визначається інтервалом щодо заданої дискретної множини $\{x(k)\}$ в секундах. Оцінка біспектру, що визначається (1), є комплексною величиною. Це означає, що замість (1) можна розглядати відповідні оцінки дійсної $\text{Re}[B(f_1, f_2; T)]$ та мнімої $\text{Im}[B(f_1, f_2; T)]$ частини біспектру. Для дослідження бікогерентності динаміки для вільного небезпечного параметра ГС на довільному інтервалі тривалістю T пропонується використовувати оцінку $\varphi(f_1, f_2; T)$ бікогерентності, яка визначається у вигляді:

$$\varphi(f_1, f_2; T) = \arctg\{\text{Im}[B(f_1, f_2; T)] / \text{Re}[B(f_1, f_2; T)]\}. \quad (2)$$

Оцінка (2) є незручною для подальшого дослідження. Тому пропонується бікогерентність (2) оцінювати величиною

$$C_{bis2}(f_1, f_2; T) = \cos[\varphi(f_1, f_2; T)]. \quad (3)$$

Відповідно до (3) оцінка бікогерентності $C_{bis2}(f_1, f_2; T)$ на довільному інтервалі тривалістю T задовольняє нерівність $-1 \leq C_{bis2}(f_1, f_2; T) \leq 1$. Це означає, що значення оцінки (3), які дорівнюють одиниці, визначають повну когерентність, а які дорівнюють мінус одиниці – повну протилежну когерентність відповідних частотних складових. При цьому значення оцінки (3), що дорівнюють нулю будуть визначати відсутність когерентності для відповідних частотних складових. Проміжні значення оцінки (3) будуть визначати різний рівень когерентності для відповідних частотних складових. Слід зауважити, що точність оцінки (3) визначається точністю оцінки спектру $X(f)$, яка залежить від тривалості інтервалу дискретної множини $\{x(k)\}$. Згідно [34], зі збільшенням цієї тривалості точність оцінки спектру $X(f)$ зростає. У роботах [35, 36] показано, що в загальному випадку для великих значень N оцінки реальної та мнімої частин біспектру (1) виявляються асимптотичні незміщеними та заможними.

Таким чином, запропонована оцінка (3) дозволяє досліджувати особливості бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС на інтервалах відсутності та наявності загорянь. Це дозволяє досягти основної поставленої мети дослідження.

5.2. Оцінка амплітудних біспектрів динаміки параметрів газового середовища при загорянні матеріалів

Дослідження виконувалось на основі аналізу позитивних значень оцінки (2), на основі обчислення оцінки (3) на інтервалах достовірної відсутності та появи загоряння тестових матеріалів у лабораторній камері. На рис. 1 наведено діаграми однакових рівнів бікогерентності динаміки концентрації чадного газу ГС у камері на інтервалах відсутності та появи загорянь для відповідних тестових матеріалів.

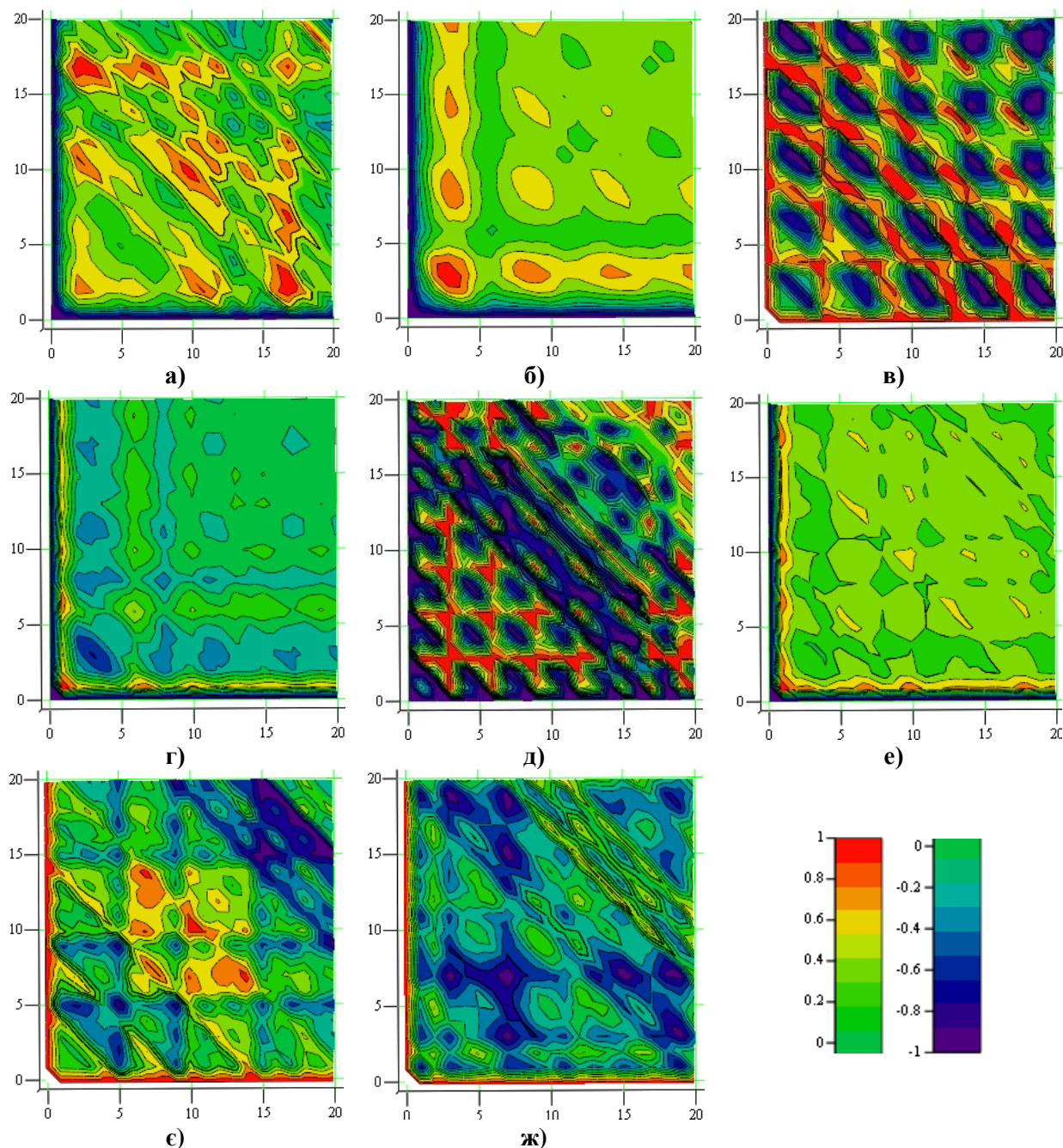


Рис. 1. Діаграми однакових рівнів бікогерентності динаміки концентрації чадного газу в газовому середовищі камери на інтервалах відсутності та появи загорянь для відповідних тестових матеріалів: а, в, д, є – відсутність загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно; б, г, е, ж – поява загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно

Аналогічні діаграми бікогерентності динаміки щільності диму ГС у лабораторній камері на інтервалах відсутності та появи загоряння тестових матеріалів наведено на рис. 2.

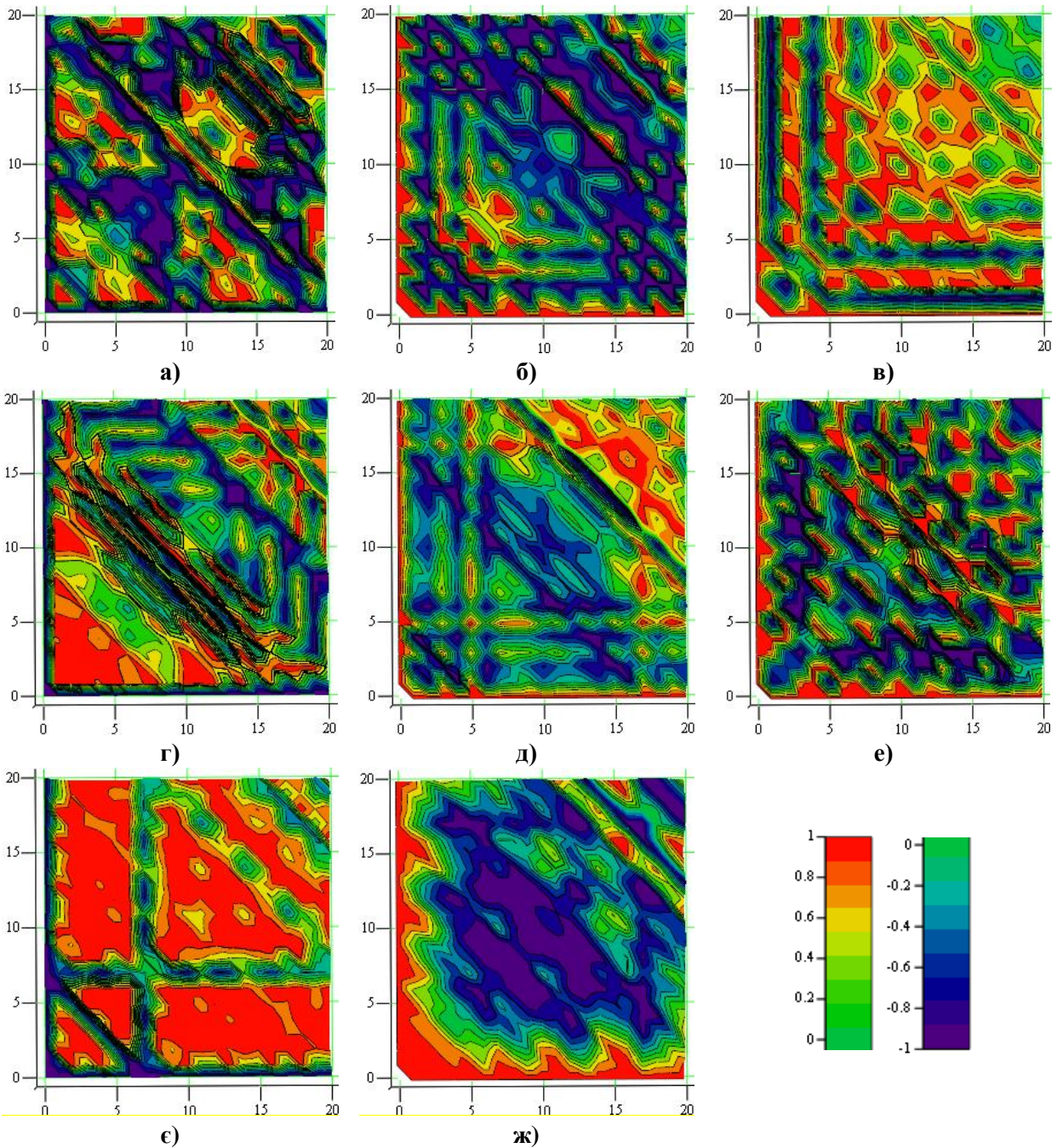


Рис. 2. Діаграми однакових рівнів бікогерентності динаміки щільності диму в газовому середовищі лабораторної камери на інтервалах відсутності та появи загорянь для відповідних тестових матеріалів: а, в, д, е – відсутність загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно; б, г, е, ж – поява загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно

Діаграми бікогерентності динаміки температури ГС у камері на інтервалах відсутності та появи загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю наведено на рис. 3.

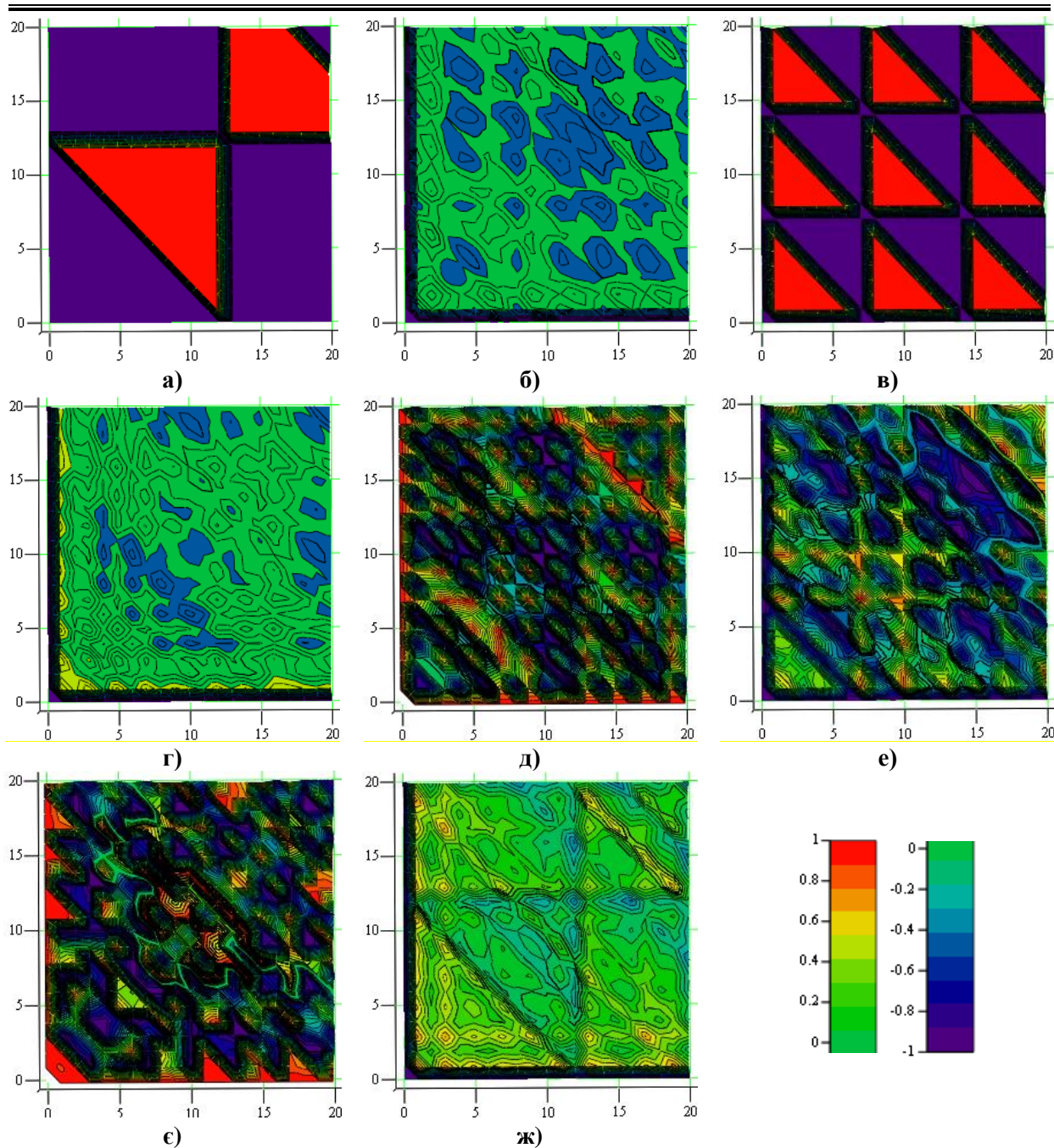


Рис. 3. Діаграми однакових рівнів бікогерентності динаміки температури газового середовища в лабораторній камері на інтервалах відсутності та появи загорянь для відповідних тестових матеріалів: а, в, д, є – відсутність загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно; б, г, е, ж – поява загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно

Таким чином, наведені на рис. 1 – 3 експериментальні діаграми бікогерентності, ілюструють особливості динаміки концентрації чадного газу, щільності диму та температури ГС в камері на інтервалах відсутності та появи загорянь тестових матеріалів у вигляді спирту, паперу, деревини та текстилю, які є характерними для більшості типів приміщень об'єктів.

6. Обговорення результатів дослідження бікогерентності динаміки небезпечних параметрів середовища при загоряннях

Із діаграм на рис. 1–3 слідує, що динаміка концентрації чадного газу, щільності диму та температури ГС у лабораторній камері на інтервалах відсутності та появи

загоряння тестових матеріалів є нелінійною. Тому усі відомі результати, що одержані в припущенні лінійності динаміки небезпечних параметрів ГС, є дуже грубими. Крім того припущення щодо лінійності зміни небезпечних параметрів ГС на початку загоряння матеріалів є також не дійсним. Це означає, що всі моделі прогнозування пожеж в розглянутому сенсі є помилковими. З урахуванням цього потрібна суттєва корекція відповідних стандартів в сфері пожежної безпеки приміщень та систем пожежної автоматики. Одержані результати свідчать також про те, що різні матеріали неоднаково впливають на динаміку бікогерентності небезпечних параметрів ГС. Конфігурація, число та положення областей бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС, що мають червоний колір характеризують наявність когерентності між довільною парою частотних складових, що визначаються частотними індексами f_1 і f_2 , та третьою частотою, яка відповідає частотному індексу f_1+f_2 . Такий набір трьох частот, що відповідає трьом частотним індексам f_1, f_2 та f_1+f_2 прийнято називати триплетом. Тому динаміка небезпечних параметрів ГС, як до так і після загоряння матеріалів характеризується особливостями конфігурації, числом та положенням областей, що відповідають різним триплетам (червоний колір діаграм на рис. 1–3). Важливими областями наведених діаграм є також конфігурація, число та положення областей, що мають фіолетовий колір. Для таких областей має місце протилежна когерентність відповідних триплетів. Це означає, що особливостями бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС слід вважати конфігурацію, число та положення областей на діаграмах, що мають червоний та фіолетовий колір. Крім того до особливостей бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС можна віднести також її загальний рівень (наявність великих областей, що мають зелений колір). Для областей, що мають зелений колір, характерна втрата когерентності для відповідних триплетів. Наприклад, це характерно для динаміки чадного газу при загорянні спирту (рис. 1 б) та деревини (рис. 1 е). Зелений колір характерний також для бікогерентності динаміки температури при загорянні спирту (рис. 3 б), паперу (рис. 3 г) та текстилю (рис. 3 з).

Таким чином, встановлені особливості бікогерентності динаміки досліджуваних небезпечних параметрів ГС в лабораторній камері при загорянні тестових матеріалів можуть бути використані для виявлення ранніх загорянь та попередження виникнення пожежі в приміщеннях об'єктів. Одержані результати експериментальних досліджень свідчать, що статистика динаміки небезпечних параметрів ГС в камері на інтервалах відсутності та наявності загорянь тестових матеріалів відрізняється від гауса. Це означає, що ефективне виявлення небезпечних змін у динаміці небезпечних параметрів ГС, що спричиняються загоряннями матеріалів, потребує використання бікогерентності. Однак використання бікогерентності для фіксованого інтервалу вимірювань не дозволяють отримати інформацію саме про момент часу виникнення загоряння, що є важливим практичним показником виявлення ранніх загорянь. При цьому момент загоряння на основі бікогерентності буде визначатися лише з точністю часового положення вимірюваного інтервалу часу. Крім того точність обчислення бікогерентності залежатиме переважно від тривалості інтервалу та частоти дискретизації вимірювань. Чим більша тривалість цього інтервалу, тим точніше обчислення спектру Фур'є та бікогерентності динаміки небезпечного параметра ГС. У дослідженні інтервал вимірювання визначався 100 дискретними значеннями небезпечного параметра з інтервалом 0,1 секунда. Це означає, що тривалість інтервалу спостереження дорівнювала 10 секундам. Тому наведені результати дозволяють виявляти момент загоряння лише з точністю, що визначається даним інтервалом спо-

стереження. Для цього інтервалу роздільна частотна здатність становить 0,1 Гц. Перевага дослідження полягає в новизні та оригінальності результатів, пов'язаних з використанням бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС та можливості їх використання для виявлення ранніх загорянь з метою недопущення ПП. До обмежень дослідження можна віднести те, що результати одержані на основі експериментальних вимірів динаміки небезпечних параметрів ГС у лабораторній камері. Вони не є остаточними, а лише вказують головний напрямок та перспективність їх подальшого розвитку. Разом з тим отримані результати потребують додаткової перевірки вогневими випробуваннями в реальних умовах.

7. Висновки

1. Обґрунтовано методику визначення бікогерентності динаміки для довільного небезпечного параметра газового середовища, що спостерігається на вільному фіксованому інтервалі часу. Дана методика відрізняється більшою практичною зручністю щодо дослідження особливостей бікогерентності динаміки небезпечного параметра газового середовища. Це стало можливим завдяки обчисленню замість самої бікогерентності косинуса від неї. При цьому всі рівні досліджуваної бікогерентності обмежуються значеннями від одиниці до мінус одиниці. Така методика дозволяє досліджувати особливості взаємозв'язків між довільними частотними триплетами у спектрі динаміки небезпечних параметрів газового середовища для довільних інтервалів на основі аналізу відповідних діаграм бікогерентності в обмеженому інтервалі значень між одиницею та мінус одиницею при загоряннях різних типів матеріалів у приміщеннях об'єктів.

2. Досліджено особливості бікогерентності динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища на прикладі загоряння тестових матеріалів у лабораторній камері. Результати досліджень свідчать про те, що характер динаміки досліджуваних небезпечних параметрів газового середовища за відсутності та наявності загоряння матеріалів суттєво відрізняється від розподілу гауса. Встановлено, що бікогерентність на відміну від традиційного спектра динаміки небезпечних параметрів газового середовища, володіє значно більшими інформаційними особливостями, що можуть бути використаними для надійного раннього виявлення загорянь у приміщеннях. Встановлено, що інформаційними особливостями бікогерентності динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища є конфігурація, число та положення областей, що відповідають повній когерентності або повній протилежній когерентності, а також типу частотних триплетів, що є характерними до таких областей. Крім того особливістю бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС є також наявність великих областей з характерними до близьких до нульових рівнів. Наявність таких областей в діаграмах бікогерентності свідчить про втрату когерентності для відповідної множини триплетів. За результатами експерименту встановлено, що така особливість бікогерентності характерна для динаміки чадного газу при загорянні спирту та деревини, а також для динаміки температури при загорянні спирту, паперу та текстилю.

Література

1. Vambol S., Vambol V., Bogdanov I., Suchikova Y., Rashkevich N. Research of the influence of decomposition of wastes of polymers with nano inclusions on the atmosphere. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 6/10(90). P. 57–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118213>

2. Andronov V., Pospelov B., Rybka E., Skliarov S. Examining the learning fire detectors under real conditions of application. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 3/9(87). P. 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101985>
3. Mygalenko K., Nuyanzin V., Zemlianskyi A., Dominik A., Pozdieiev S. Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V. 1/10(91). P. 31–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121727>
4. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Taraduda D., Sobyňa V., Sokolov D., Dement M., Hurkovskyi V., Nikolaiev K., Yatsyshyn T., Dimitriieva D. Physical features of pollutants spread in the air during the emergency at NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*. 2019. V. 4/84. 11. doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).11)
5. Kovalov A., Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*. 2018. V. 60. №00003. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>
6. Reproduced with permission from fire loss in the United States during 2019. National Fire Protection Association. 2020. 11 p. URL: www.nfpa.org
7. Ragimov S., Sobyňa V., Vambol S., Vambol V., Feshchenko A., Zakora A., Strejekurov E., Shalomov V. Physical modelling of changes in the energy impact on a worker taking into account high-temperature radiation. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2018. V. 91. №1. P. 27–33. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.9654>
8. Otrosh Yu., Semkiv O., Rybka E., Kovalov A. About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 708. №1. 012065. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012065>
9. Vambol S., Vambol V., Kondratenko O., Suchikova Y., Hurenko O. Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arranging the system of pollutant neutralization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 3/10(87). P. 63–73. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102314>
10. Kustov M. V., Kalugin V. D., Tutunik V. V., Tarakhno E. V. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2019. №1. P. 92–99. doi: <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99>
11. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al.; Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. (Eds.) Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. 2021. 180 p. doi: <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>
12. Development of the method of operational forecasting of fire in the premises of objects under real conditions / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Samoilo M., Krainiukov O., Biryukov I., Butenko T., Bezuhla Yu., Karpets K., Kochanov E. // *Eastern-European Journal of Enterprise*. 2021. V. 2/10(110). P. 43–50. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.226692>
13. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by self-adjusting fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 5/9(89). P. 43–48. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110092>
14. 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. doi: <https://doi.org/10.3403/30266860u>

15. 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. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6d78459f-6378-4845-bf94-3e52a88692df/en-54-31-2014>

16. ISO 7240-8:2014 Fire detection and alarm systems – Part 8: Point-type fire detectors using a carbon monoxide sensor in combination with a heat sensor.

17. 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.

18. Peng X., Liu S., Lu G. Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. *Journal of Chongqing University*. 2005. №28. P. 122.

19. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S. Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V. 5/10(95). P. 25–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142995>

20. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych, P. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. V. 3/9(93). P. 34–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133127>

21. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Krainiukov O., Biryukov I., Butenko T., Yashchenko O., Bezuhla Yu., Karpets K., Vasylychenko R. Short-term fire forecast based on air state gain recurrency and zero-order Brown model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. V. 3/10(111). P. 27–33. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233606>

22. Pospelov B., Rybka E., Krainiukov O., Yashchenko O., Bezuhla Y., Bielai S., Kochanov E., Hryshko S., Poltavski E., Nepsha O. Short-term forecast of fire in the premises based on modification of the Brown's zero-order model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. V. 4/10 (112). P. 52–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238555>

23. Pospelov B., Rybka E., Togobytska V., Meleshchenko R., Danchenko Yu. Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. V. 4/10(100). P. 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176579>

24. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. V. 1/10 (97). P. 29–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155027>

25. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Karpets K., Pirohov O., Semenyshyna I., Kapitan R., Promska A., Horbov O. Development of the correlation method for operative detection of recurrent states. *Eastern-European Journal of Enterprise*. 2019. V. 6/4 (102). P. 39–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.187252>

26. Sadkovyi V., Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Rud A., Karpets K., Bezuhla Yu. Construction of a method for detecting arbitrary hazard pollutants in the atmospheric air based on the structural function of the current pollutant concentrations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. V. 6/10 (108). P. 14–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218714>

27. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Bezuhla Y., Liashevskaya O., Butenko T.,
civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2021-34-21

Darmofal E., Hryshko S., Kozynska I., Bielashov Y. Empirical cumulative distribution function of the characteristic sign of the gas environment during fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. V. 4/10 (118). P. 60–66. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263194>

28. 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, 2002.

29. Полстянкін Р. М. Стохастическіє моделі небезпечних факторів і параметрів очага загорання в приміщеннях. *Проблеми пожежної безпеки*. 2015. Вип. 38. С. 130–135. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2015_38_24

30. Saeed M., Alfatih S. Nonlinearity detection in hydraulic machines utilizing bispectral analysis. *TJ Mechanical engineering and machinery*. 2013. P. 13–21.

31. Yang K., Zhang R., Chen S., Zhang F., Yang J., Zhang X. Series arc fault detection algorithm based on autoregressive bispectrum analysis. *Algorithms*. 2015. V. 8. P. 929–950. doi: <https://doi.org/10.3390/a8040929>

32. Yang B., Wang M., Zan T., Gao X., Gao P. Application of bispectrum diagonal slice feature analysis in tool wear states monitoring. *Research Square*. 2021. doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-775113/v1>

33. Cui L., Xu H., Ge J., Cao M., Xu Y., Xu W., Sumarac D. Use of bispectrum analysis to inspect the non-linear dynamic characteristics of beam-type structures containing a breathing crack. *Sensors*. 2021. V. 21. 1177. doi: <https://doi.org/10.3390/s21041177>

34. Max J. *Principes generaux et methods classiques*. Tome 1. Paris New York Barsegone Milan Mexico Rio de Janeiro. 1981. P. 311.

35. Mohankumar K. Implementation of an underwater target classifier using higher order spectral features. *Cochin*. 2015. Available at: <https://dyuthi.cusat.ac.in/xmlui/bitstream/handle/purl/5368/T-2396.pdf?sequence=1>

36. Nikias C. L., Raghuvеer M. R. Bispectral Estimation: a Digital Signal Processing Framework. *Proc. IEEE*. 1987. V. 75. №7. P. 869–891. doi: <https://doi.org/10.1109/proc.1987.13824>

B. Pospelov, DSc, Professor, Chief Researcher

R. Meleschenko, DSc, Professor, Associate Professor of the Department

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

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

A. Melnychenko, PhD, Senior Lecturer of the Department

M. Samoilov, Lecturer of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

BIHOHERENTYTY OF THE DYNAMICS OF DANGEROUS PARAMETERS OF THE GAS ENVIRONMENT DURING IGNITION OF MATERIALS

The object of the study is the bicoherence of the dynamics of dangerous parameters of the gas environment during the ignition of materials in the premises. Part of the problem that was solved consists in identifying the features of the bicoherence of the dynamics of dangerous parameters of the gas environment in the absence and occurrence of fires in the premises. The results of the research indicate that the nature of the dynamics of the studied hazardous parameters of the gas environment in the absence and presence of material ignition is significantly different from the Gaussian distribution. It was found that bicoherence, in contrast to the traditional spectrum of the dynamics of dangerous parameters of the gas environment, has significantly greater informational features and can be used for early detection of fires. It was established that the information features of the bicoherence dynamics of the main hazardous parameters of the gas environment are the configuration, number and position of limited areas corresponding to full coherence or full opposite coherence, as well as the type of frequency triplets that are characteristic of such limited areas. In addition, a

feature of the bicoherence of the dynamics of hazardous parameters of the gas environment is also the presence of large areas with characteristics close to the zero level of the proposed measure of bicoherence. The presence of such regions in the bicoherence diagrams indicates the loss of coherence for the corresponding set of triplets. According to the results of the experiment, it was established that this feature of bicoherence is characteristic for the dynamics of carbon monoxide during the ignition of alcohol and wood, as well as for the dynamics of temperature during the ignition of alcohol, paper, and textiles. In practice, the novelty and originality of the obtained research results is related to the possibility of using the bicoherence of the dynamics of dangerous gas environment parameters to detect fires in order to prevent fires in premises.

Keywords: ignition of materials, gaseous environment of premises, dangerous fire parameters, bicoherence, dynamics of dangerous parameters

References

1. Vambol, S., Vambol, V., Bogdanov, I., Suchikova, Y., Rashkevich, N. (2017). Research of the influence of decomposition of wastes of polymers with nano inclusions on the atmosphere. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/10(90), 57–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118213>
2. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Examining the learning fire detectors under real conditions of application. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/9(87), 53–59. doi: [10.15587/1729-4061.2017.101985](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101985)
3. Mygalenko, K., Nuyanzin, V., Zemlianskyi, A., Dominik, A., Pozdieiev, S. (2018). Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10(91), 31–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121727>
4. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., Hurkovskyi, V., Nikolaiev, K., Yatsyshyn T., Dimitriieva, D. (2019). Physical features of pollutants spread in the air during the emergency at NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*, 4/84, 11. doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).11)
5. Kovalov, A., Otrosh, Y., Ostroverkh, O., Hrushovinchuk, O., Savchenko O. (2018). Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*, 60, 00003. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>
6. (2020). Reproduced with permission from fire loss in the United States during 2019. National Fire Protection Association, 11. URL: www.nfpa.org
7. Ragimov, S., Sobyna, V., Vambol, S., Vambol, V., Feshchenko, A., Zakora, A., Strejekurov, E., Shalomov, V. (2018). Physical modelling of changes in the energy impact on a worker taking into account high-temperature radiation. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 91, 1, 27–33. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.9654>
8. Otrosh, Yu., Semkiv, O., Rybka, E., Kovalov, A. (2019). About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 1, 012065. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012065>
9. Vambol, S., Vambol, V., Kondratenko, O., Suchikova, Y., Hurenko, O. (2017). Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arranging the system of pollutant neutralization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/10(87), 63–73. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102314>
10. Kustov, M. V., Kalugin, V. D., Tutunik, V. V., Tarakhno, E. V. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 1, 92–99. doi: <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99>

11. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al.; Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. (Eds.) (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 180. doi: <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>
12. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Samoilo, M., Krainiukov, O., Biryukov, I., Butenko, T., Bezuhla, Yu., Karpets, K., Kochanov, E. (2021). Development of the method of operational forecasting of fire in the premises of objects under real conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/10 (110), 43–50. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.226692>
13. 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. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.110092>
14. 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. doi: <https://doi.org/10.3403/30266860u>
15. 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. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6d78459f-6378-4845-bf94-3e52a88692df/en-54-31-2014>
16. ISO 7240-8:2014 Fire detection and alarm systems – Part 8: Point-type fire detectors using a carbon monoxide sensor in combination with a heat sensor.
17. 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.
18. Peng, X., Liu, S., Lu, G. (2005). Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. *Journal of Chongqing University*, 28, 122.
19. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S. (2018). Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/10(95), 25–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142995>
20. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P. (2018). Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise*, 3/9(93), 34–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133127>
21. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Krainiukov, O., Biryukov, I., Butenko, T., Yashchenko, O., Bezuhla, Yu., Karpets, K., Vasylichenko, R. (2021). Short-term fire forecast based on air state gain recurrency and zero-order Brown model. *Eastern-European Journal of Enterprise*, 3/10(111), 27–33. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233606>
22. Pospelov, B., Rybka, E., Krainiukov, O., Yashchenko, O., Bezuhla, Y., Bielai, S., Kochanov, E., Hryshko, S., Poltavski, E., Nepsha, O. (2021). Short-term forecast of fire in the premises based on modification of the Brown's zero-order model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/10 (112), 52–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238555>
23. Pospelov, B., Rybka, E., Togobytska, V., Meleshchenko, R., Danchenko, Yu. (2019). Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/10(100), 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176579>

24. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P., Gornostal, S. (2019). Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10 (97), 29–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155027>
25. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Krainiukov, O., Karpets, K., Pirohov, O., Semenyshyna, I., Kapitan, R., Promska, A., Horbov, O. (2019). Development of the correlation method for operative detection of recurrent states. *Eastern-European Journal of Enterprise*, 6/4 (102), 39–46. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.187252>
26. Sadkovyi V., Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Rud A., Karpets K., Bezuhla Yu. (2020). Construction of a method for detecting arbitrary hazard pollutants in the atmospheric air based on the structural function of the current pollutant concentrations. *Eastern-European Journal of Enterprise*, 6/10 (108), 14–22. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218714>
27. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Bezuhla, Y., Liashevskaya, O., Butenko, T., Darmofal, E., Hryshko, S., Kozynska, I., Bielashov, Y. (2022). Empirical cumulative distribution function of the characteristic sign of the gas environment during fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (118)), 60–66. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263194>
28. 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, Naval Research Laboratory.
29. Polstiankin, R. M., Pospelov, B. B. (2015). Stochastic models of hazardous factors and parameters of a fire in the premises. *Problemy pozharnoy bezopasnosti*, 38, 130–135. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2015_38_24
30. Saeed, M., Alfatih, S. (2013). Nonlinearity detection in hydraulic machines utilizing bispectral analysis. *TJ Mechanical engineering and machinery*, 13–21.
31. Yang, K., Zhang, R., Chen, S., Zhang, F., Yang, J., Zhang, X. (2015). Series Arc Fault Detection Algorithm Based on Autoregressive Bispectrum Analysis. *Algorithms*, 8, 929–950. doi: <https://doi.org/10.3390/a8040929>
32. Yang, B., Wang, M., Zan, T., Gao, X., (2021). Application of bispectrum diagonal slice feature analysis in tool wear states monitoring. *Research Square*. doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-775113/v1>
33. Cui, L., Xu, H., Ge, J., Cao, M., Xu, Y., Xu, W., Sumarac, D. (2021). Use of Bispectrum Analysis to Inspect the Non-Linear Dynamic Characteristics of Beam-Type Structures Containing a Breathing Crack. *Sensors*. V. 21. 1177. doi: <https://doi.org/10.3390/s21041177>
34. Max, J. (1981). *Principes generaux et methods classiques*. Tome 1. Paris New York Barselone Milan Mexico Rio de Janeiro, 311.
35. Mohankumar, K. (2015). Implementation of an underwater target classifier using higher order spectral features. *Cochin*. Available at: <https://dyuthi.cusat.ac.in/xmlui/bitstream/handle/purl/5368/T-2396.pdf?sequence=1>
36. Nikias, C. L., Raghuveer, M. R. (1987). Bispectrum estimation: A digital signal processing framework. *Proceedings of the IEEE*, 75 (7), 869–891. doi: <https://doi.org/10.1109/proc.1987.13824>

Надійшла до редколегії: 21.09.2023

Прийнята до друку: 26.10.2023