

УДК 621.03

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

Є. О. Рибка, д.т.н., професор, заст. нач. центру – нач. відділу (ORCID 0000-0002-5396-5151)

Р. Г. Мелешенко, 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)

П. Ю. Бородич, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-9933-8498)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ АМПЛІТУД БІСПЕКТРУ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЗАГОРЯННІ МАТЕРІАЛІВ

Проаналізовані та виявлені особливості амплітудних біспектрів динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища на інтервалах відсутності та появи загоряння матеріалів у приміщеннях. Проблема, що вирішувалась, полягає у виявленні загорянь в приміщеннях до появи пожежі. Результати досліджень в цілому свідчать про нелінійний характер динаміки небезпечних параметрів газового середовища до та після загоряння матеріалів. Встановлено, що амплітудний біспектр, на відміну від традиційного амплітудного спектру небезпечних параметрів газового середовища, містить інформацію для надійного виявлення загорянь. В якості такої інформації запропоновано використання величини позитивного динамічного діапазону щодо амплітуд біспектру. Встановлено, що при загорянні спирту позитивна динаміка амплітудного біспектру змінюється для всіх небезпечних параметрів газового середовища. При цьому суттєві зміни характерні для щільності диму (з 1 дБ до 30 дБ) та температури (з 1 дБ до 70 дБ). Динамічний діапазон амплітуд біспектру для концентрації чадного газу збільшується з 30 дБ до 70 дБ. Визначено, що загоряння паперу спричиняє зниження динамічного діапазону амплітуд біспектру для щільності диму з 40 дБ до 20 дБ. При цьому динамічний діапазон амплітуд біспектру для концентрації чадного газу та температури збільшується до 60 дБ. При загорянні деревини зростає динамічний діапазон амплітуд біспектру концентрації чадного газу від 40 дБ до 60 дБ, а температури – від 30 дБ до 40 дБ. Виявлено, що при загорянні текстилю діапазон динаміки амплітуд біспектру для температури збільшується від 10 дБ до 60 дБ. В цілому одержані результати свідчать про те, що динамічні характеристики амплітуд біспектру динаміки небезпечних параметрів газового середовища можуть розглядатися в якості ознак раннього виявлення загорянь у приміщеннях.

Ключові слова: стійкість об'єктів, небезпечні події, загоряння матеріалів, газове середовище, амплітудний біспектр, виявлення загорянь

1. Вступ

Безпека та стійкість функціонування різних об'єктів є важливими для будь-якої держави [1]. Зазвичай порушення стійкості функціонування об'єктів пов'язане з виникненням різного роду небезпечних подій [2]. Небезпечні події характерні більшості об'єктів технічної та екологічної сфери [3, 4]. Найбільш поширеними є небезпечними подіями, що пов'язані з пожежами в приміщеннях (ПП) об'єктів [5]. Це обумовлено значною шкодою здоров'ю людини [6, 7], об'єктам [8] та навколишньому середовищу [9, 10], що наноситься пожежами. Тому головним напрямком забезпечення безпеки та стійкості функціонування об'єктів слід вважати в першу чергу зниження шкоди здоров'ю та життю людини [11]. У зв'язку з цим проблема запобігання виникненню ПП об'єктів є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [12] наголошується, що одним із конструктивних підходів до забезпечення стійкості функціонування об'єктів слід вважати раннє виявлення ПП. При цьому [13] акцент робиться на особливостях динаміки небезпечних параметрів

газового середовища (ГС) при загоряннях. Однак особливості динаміки небезпечних параметрів ГС досліджуються тільки в часовій області [13]. Частотна область при цьому не використовується. Відома адаптивна технологія [14] також обмежується лише нестационарними за часом енергетичними характеристиками небезпечних параметрів. Передові технології, що реалізовані в стандартах EN і ISO [15–17] також обмежуються часовою областю. Відома також технологія виявлення ПП, що заснована на використанні датчиків диму [18]. При цьому маючи високу швидкість, ці датчики мають відносно низьку вартість. Однак такі датчики мають істотний недолік, що пов'язаний з помилковим виявленням ПП в залежності від температури оточуючого середовища [19]. Тому для підвищення ефективності виявлення ранніх загорянь (РЗ) застосовуються комбіновані датчики, до складу яких зазвичай входять датчики чадного газу [20] та датчик температури [21]. Це обумовлює використання в нових технологіях декількох датчиків для виявлення сукупності заданих небезпечних параметрів [22]. Дослідженню залежності швидкості виділення тепла при різній інтенсивності горіння деревини присвячена робота [23]. Однак у [23] дослідження обмежуються лише визначенням залежності між середньою швидкістю виділення тепла та середньою інтенсивністю горіння. Аналогічні дослідження стосовно органічного скла та кипарису наведені в [24]. При цьому в [23, 24] не досліджуються особливості спектральних особливостей другого та третього порядку щодо особливостей зміни у часі небезпечних параметрів ГС. Різноманіття та складність реальної динаміки небезпечних параметрів ГС приміщень потребують застосування нових підходів до виявлення її особливостей. У зв'язку з цим актуальними стають дослідження особливостей поточної зміни небезпечних параметрів ГС на основі застосування сучасних технологій в частотній та часовій областях, що використовуються в інших сферах. Так у роботах [25–28] розглядаються нові технології виявлення РЗ, що засновані на показниках фрактальності небезпечних параметрів ГС приміщень. Наприклад, в [25] використовується кореляційна розмірність вектору стану небезпечних параметрів ГС. Застосування рекурентних діаграм щодо зміни концентрації чадного газу для виявлення РЗ у приміщеннях розглядається в [26]. Міри рекурентності вектора стану ГС щодо короткострокового прогнозу ПП розглядається у [27]. Модифікована модель Брауна щодо прогнозування ПП описується у [28]. Технологія адаптивних рекурентних діаграм розглянута в [29]. Застосування технології рекурентних діаграм для оперативного виявлення небезпечних станів ГС наведено у [30]. Розвиток кореляційної технології щодо оперативного виявлення рекурентних станів ГС розглянуто у [31]. Використанню структурного методу виявлення небезпечних станів ГС присвячена робота [32]. Однак результати дослідження у зазначених вище роботах обмежуються розглядом небезпечних параметрів лише у часовій області. При цьому важливі особливості поточної динаміки небезпечних параметрів ГС при загоряннях у спектральній області в наведених роботах не досліджуються. В роботі [33] досліджуються миттєві амплітудні та фазові частотні спектри динаміки небезпечних параметрів ГС приміщень при загоряннях. Зазначається, що амплітудні частотні спектри виявляються малоінформативними для виявлення загорянь. Слід зазначити, що такий висновок в [33] зроблено на основі результатів амплітудних частотних спектрів другого порядку, які не враховують спектральний зв'язок між частотними складовими, характерний для нелінійних перетворень. Амплітудні та фазові біспектри, що здатні виявляти нелінійні перетворення не досліджуються. Результати експериментального дослідження взаємних зв'язків між небезпечними параметрами ГС при загоряннях наведено у [34]. Однак представ-

лені результати обмежуються кореляційними зв'язками в часовій області. При цьому кореляційні зв'язки враховують лише лінійний зв'язок. Спектральні характеристики вище другого порядку, що дозволяють враховувати інші типи зв'язків, при цьому не розглядаються та не досліджуються.

Таким чином, виконаний аналіз свідчить, що недостатньо дослідженими виявляються особливості амплітудних спектрів вищого порядку для динаміки небезпечних параметрів ГС при загоряннях у приміщеннях. По-перше це стосується дослідження біспектрів – спектрів третього порядку. У зв'язку з цим важливою і невирішеною частиною проблеми, що розглядається, є експериментальне дослідження особливостей амплітудних біспектрів для динаміки основних небезпечних параметрів ГС при загоряннях у приміщеннях.

3. Мета та завдання дослідження

Мета роботи – проаналізувати та виявити особливості амплітудних біспектрів динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища під час загоряння матеріалів у приміщеннях, які дозволять використовувати особливості амплітудних біспектрів для раннього виявлення загорянь та запобігання виникнення пожеж у приміщеннях.

Для досягнення мети роботи поставлено завдання:

- обґрунтувати дослідження амплітудного біспектру для довільного небезпечного параметра газового середовища для довільного заданого інтервалу часу при загорянні матеріалів;
- оцінити амплітудні біспектри небезпечних параметрів газового середовища на інтервалах відсутності та появи загоряння матеріалів.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є динаміка небезпечних параметрів ГС при загоряннях ГМ. Робоча гіпотеза полягає у наявності кореляції між спектральними складовими динаміки ГС при загоряннях ГМ. Виявлення таких кореляцій дозволить якісно виявляти РЗ, що є джерелами ПП. Прийняті припущення та спрощення визначаються в тому, що динаміка небезпечних параметрів ГС при загоряннях у приміщеннях подібна динаміки небезпечних параметрів ГС у лабораторній камері [35]. Лабораторна камера дозволяє моделювати експериментальну динаміку небезпечних параметрів ГС у стельовій області негерметичного приміщення при загоряннях. В експерименті як тестові матеріали використовувалися спирт, папір, деревина та текстиль. У якості небезпечних параметрів ГС в камері визначалися температура, щільність диму та концентрація чадного газу (ЧГ). Вимірювання температури проводилися тепловим датчиком ТПТ-4, щільності диму – оптичним датчиком диму ДИП-3.2, а концентрації ЧГ – датчиком Discovery. Результати вимірювання небезпечних параметрів ГС зберігалися в пам'яті комп'ютера. Спеціальне програмне забезпечення дозволяло опитувати вимірювальні датчики з довільним інтервалом часу. В експерименті опитування датчиків здійснювалось з інтервалом 0,1 с. Підпал тестових матеріалів у лабораторній камері проводився в момент часу $t = 200$. Дослідження особливостей амплітудного біспектру динаміки вимірюваних небезпечних параметрів ГС в камері виконувалося для двох різних і однакових за тривалістю інтервалів часу, які визначалися 100 відліками. Перший інтервал обирався у проміжку між 100-м та 200-м вимірами та відповідав достовірній відсутності загоряння (нормальні умови). Другий інтервал обирався в проміжку між 200-м та 300-м вимірами та охоплював момент часу початку загоряння відпо-

відного матеріалу в камері. Дослідження проводилося послідовно для кожного з тестових матеріалів у послідовності: спирт, папір, деревина та текстиль. Для відновлення небезпечних параметрів ГС камери перед кожним дослідженням загорання матеріалу здійснювалася природна вентиляція ГС камери протягом 5 хв.

5. Результати дослідження амплітудного біспектру динаміки параметрів газового середовища при загоранні

5.1. Обґрунтування дослідження амплітудного біспектру динаміки небезпечного параметра газового середовища

Біспектри є одним із відносно нових інструментів виявлення зв'язків частотних складових та ідентифікації нелінійних властивостей у різних процесах [36]. Застосування біспектру для виявлення загорянь електрообладнання розглядається у [37]. Зазначається, що виявленню загорянь електрообладнання перешкоджає наявність шумів гауса, які важко усунути як перешкоду. У [38] наголошується, що біспектр є потужним інструментом для аналізу особливостей процесів, розподіл яких відрізняються від гауса, та придушення процесів гауса. Біспектри надають більше корисної інформації порівняно з класичним спектром потужності. Оцінка $V(f_1, f_2)$ біспектру, відповідно до [39], визначатиметься як:

$$V(f_1, f_2) = X(f_1)X(f_2)X^*(f_1 + f_2), \quad (1)$$

де $V(f_1, f_2)$ – функція незалежних змінних f_1 та f_2 , що мають сенс відповідних частотних індексів; $X(f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp(-j2\pi f k / N)$, ($0 \leq k \leq N-1$) визначає перетворення Фур'є для довільного частотного індексу f ($0 \leq f \leq N-1$) та заданої дискретної множини $\{x(k)\}$ значень досліджуваного процесу; $*$ – означає оператор комплексного сполучення. При цьому довільному частотному індексу f відповідає величина частоти f/T Гц. Тут величина T визначається інтервалом заданої дискретної множини $\{x(k)\}$ в секундах. Оцінка біспектру, що визначається (1), є комплексною величиною. Це означає, що замість (1) можна розглядати відповідні оцінки амплітуди та фази біспектру. Для дослідження амплітудного біспектру для довільного інтервалу динаміки небезпечного параметра ГС пропонується використовувати оцінку, що визначається як:

$$AV(f_1, f_2) = 10 \lg(|X(f_1)X(f_2)X^*(f_1 + f_2)|), \quad (2)$$

де $AV(f_1, f_2)$ – функція змінних f_1 і f_2 , що визначає оцінку амплітудного біспектру для довільного небезпечного параметра ГС, що характеризується дискретною множиною $\{x(k)\}$ значень параметра на заданому інтервалі спостереження. Оцінка амплітудного біспектру (2) по суті є миттєвою для інтервалу, оскільки визначається конкретною дискретною множиною $\{x(k)\}$ значень небезпечного параметра ГС на заданому інтервалі. При цьому оцінка (2) вимірюється в дБ, що дозволяє здійснювати перехід від оцінки біспектру амплітуди до оцінки біспектру потужності. Точність оцінки (2) визначається точністю оцінки спектру $X(f)$, що визначається тривалістю інтервалу дискретної множини $\{x(k)\}$. Слідуючи [40], зі збільшенням цієї тривалості точність оцінки спектру $X(f)$ зростає. У роботах [41, 42] показано, що в загальному випадку для великих значень N оцінки реальної та мнимі частин біспектру (1) виявляються асимптотичні незміщеними та статичними. Запропоно-

вана оцінка (2) ґрунтується на використанні логарифмічної функції та дозволяє надати відповідну вагу різним амплітудам біспектру (1). Наприклад, для амплітуд, менших одиниці, оцінка (2) є негативною. Для амплітуд, що перевищують одиницю оцінка (2), є позитивною. Цільовим завданням дослідження є аналіз амплітуди біспектру динаміки небезпечних параметрів ГС на інтервалах відсутності та наявності загорянь. Тому можна обмежитися аналізом лише позитивних значень оцінки (2) для різних небезпечних параметрів ГС. При цьому негативні значення (2), що відповідають малим значенням амплітуди біспектру, можна знехтувати.

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

Дослідження виконувалось на основі аналізу позитивних значень оцінки (2) на інтервалах відсутності та наявності загоряння тестових матеріалів. При цьому в якості інтегральної ознаки для характеристики амплітудного біспектру використовувалась міра, яка визначалась динамічним діапазоном позитивних значень (2). На рис. 1 наведено діаграми динаміки позитивних значень амплітуди біспектру (дБ) для досліджуваних параметрів ГС на інтервалах відсутності загорянь відповідних матеріалів.

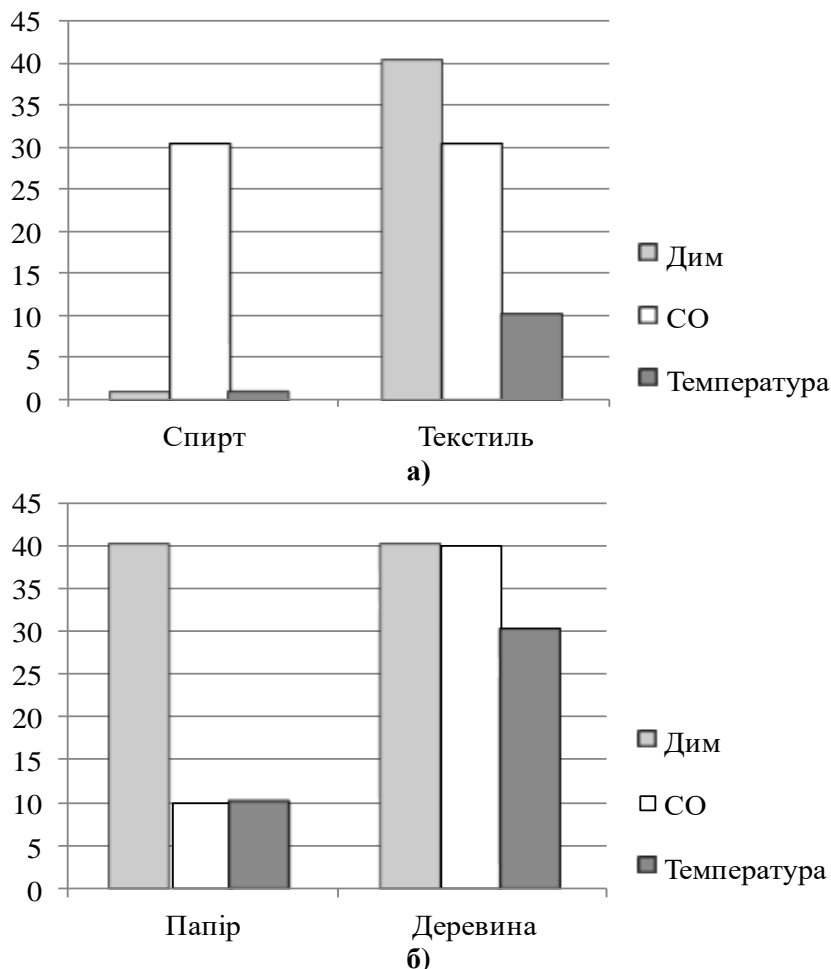


Рис. 1. Діаграми динаміки позитивних значень амплітуди біспектру небезпечних параметрів на інтервалах, що передують (відсутності) загорянням тестових матеріалів: а – спирт та текстиль; б – папір та деревина

Аналогічні діаграми на інтервалах загоряння тестових матеріалів наведено на рис. 2.

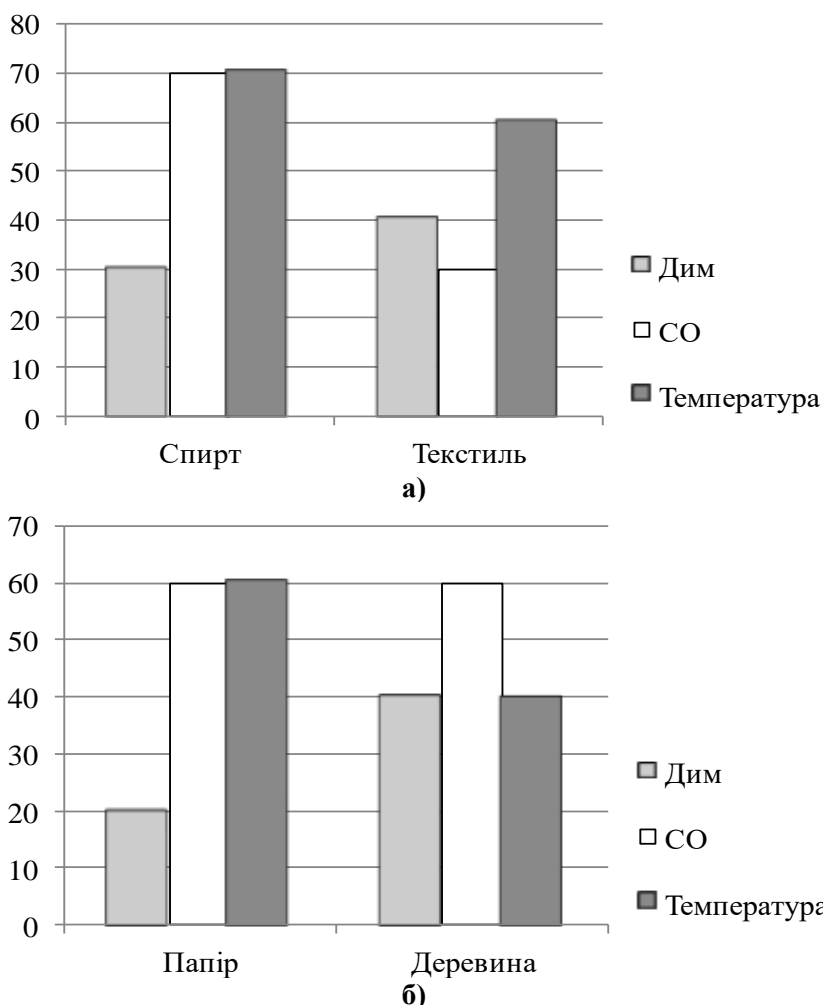


Рис. 2. Діаграми динаміки позитивних значень амплітуди біспектру небезпечних параметрів на інтервалах загоряння тестових матеріалів: а – спирт та текстиль; б – папір та деревина

Таким чином, наведені рис. 1 та рис. 2 діаграми, ілюструють особливості амплітудного біспектру для щільності диму, концентрації ЧГ та температури ГС в лабораторній камері на інтервалах відсутності та наявності загоряння тестових матеріалів.

6. Обговорення результатів дослідження амплітудного біспектру параметрів газового середовища при загорянні

Із діаграм на рис. 1 та рис. 2 слідує, що динаміка небезпечних параметрів ГС у лабораторній камері на інтервалах відсутності та наявності загорянь тестових ГМ у загальному випадку має статистику, що відрізняється від гауса. Діаграми, що наведені на рис. 1, свідчать про різний рівень позитивної динаміки амплітудного біспектру на інтервалах відсутності загорянь. Цей факт в цілому обумовлений особливостями проведення експерименту. По-перше, це стосується ухваленної черговісті підпалу тестових матеріалів. По-друге – застосуванням природної вентиляції лабораторній камері після кожного підпалу матеріалу та обмеженим часом вентиляції. При цьому обмежений час вентиляції, мабуть було недостатнім для повного відновлення вихідного стану ГС в камері. Природна вентиляція камери більшою мірою проявляється при відновленні вихідних значень небезпечних параметрів ГС після підпалу спирту, паперу та дерева. Наприклад, вихідний стан ГС до загоряння спирту характеризується позитивною динамікою амплітуд-

ного біспектру тільки для ЧГ, яка дорівнює 30 дБ. Після загоряння спирту та обмеженої в часі природної вентиляції камери стан ГС в камері перед підпалом паперу характеризується позитивною динамікою амплітудного біспектру для щільності диму, концентрації ЧГ та температури, що дорівнюють 40 дБ, 10 дБ і 10 дБ відповідно. Після загоряння паперу та вентиляції камери залишковий стан ГС, слідує даним на рис. 1, характеризується позитивною динамікою амплітудного біспектру для щільності диму, концентрації ЧГ та температури, яка становить 40 дБ, 40 дБ та 30 дБ відповідно. Це означає, що загоряння паперу в камері призводить до збільшення величини позитивної динаміки амплітудного біспектру концентрації ЧГ та температури до 40 дБ і 30 дБ відповідно. Після загоряння деревини та наступної вентиляції камери залишковий стан небезпечних параметрів ГС, характеризується зниженням позитивної динаміки амплітудного біспектру для концентрації ЧГ та температури, що становить 30 дБ та 10 дБ відповідно.

З даних на рис. 2 випливає, що динаміка небезпечних параметрів ГС в камері на інтервалах загоряння носить характер, що відрізняється від гауса. Наприклад, при загорянні спирту позитивна динаміка амплітудного біспектру змінюється для усіх небезпечних параметрів ГС. При цьому суттєві зміни мають місце для щільності диму (з 1 дБ до 30 дБ) та температури (з 1 дБ до 70 дБ). Динаміка амплітудного біспектру для концентрації ЧГ у разі загоряння спирту збільшується з 30 дБ до 70 дБ. Це означає, що загоряння спирту спричиняє суттєві нелінійні зміни у динаміці досліджуваних небезпечних параметрів ГС. При загорянні паперу, слідує з рис. 2, зменшується динаміка амплітудного біспектру щільності диму з 40 дБ до 20 дБ. При цьому динаміка амплітудного біспектру концентрації ЧГ та температури збільшується до 60 дБ. Це означає, що ознаками початку загоряння паперу може бути зазначений характер динаміки амплітудного біспектру. Загоряння деревини призводить до різної зміни вихідної динаміки небезпечних параметрів ГС. При цьому динаміка щільності диму майже не змінюється та характеризується величиною 40 дБ. Але динаміка концентрації ЧГ збільшується з 40 дБ до 60 дБ, а температури – з 30 дБ до 40 дБ. Це означає, що ознакою загоряння деревини може виступати збільшення динаміки амплітудного біспектру концентрації ЧГ. При загорянні текстилю динаміка щільності диму змінюється і визначається величиною 40 дБ. Динаміка концентрації ЧГ також не змінюється, але характеризується величиною 30 дБ. При цьому динаміка амплітудного біспектру температури збільшується від 10 дБ до 60 дБ. Це означає, що ознакою загоряння текстилю є збільшення динаміки амплітудного біспектру температури.

Отже, результати наведених на рис. 1, 2 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 виявлення небезпечних змін у динаміці небезпечних параметрів ГС викликаних загоряннями матеріалів потребує застосування методів спектрального аналізу третього (біспектру) та вищого порядку (поліспектру). Методи спектрального аналізу другого порядку при цьому виявляються недостатньо ефективними. В цьому сенсі використання амплітудного біспектру виявляється необхідним і виправданим. Однак умови використання амплітудного біспектру для фіксованого інтервалу вимірювань не дозволяють отримати інформацію про момент часу появи загоряння, що є важливим практичним показником щодо виявлення РЗ. При цьому момент загоряння на основі амплітудного біспектру буде визначатися лише з точністю часового положення вимірюваного інтервалу. Крім того точність обчислення амплітуд біспектру залежатиме переважно від тривалості інтервалу та

частоти дискретизації вимірювань. Чим більша тривалість цього інтервалу, тим точніше обчислення спектру Фур'є та амплітудного біспектру динаміки небезпечного параметра ГС. У дослідженні амплітудного біспектру інтервал визначався 100 відліками вимірювань даних. При цьому інтервал дискретизації становив 0,1 секунду. Тому одержані результати обмежуються інтервалом 10 секунд. Для цього інтервалу роздільна частотна здатність становить 0,1 Гц. Перевага дослідження полягає в новизні та оригінальності результатів, пов'язаних з використанням амплітудного біспектру динаміки небезпечних параметрів ГС та можливості його використання для виявлення РЗ з метою недопущення ПП. До обмежень дослідження можна віднести те, що результати експериментальних вимірів динаміки небезпечних параметрів ГС отримані лише у лабораторній камері. У зв'язку з цим отримані результати потребують додаткової перевірки вогневими випробуваннями з урахуванням реальних горючих матеріалів для конкретних приміщень будівель та споруд.

7. Висновки

1. Наведено обґрунтування дослідження амплітудного біспектру динаміки довільного небезпечного параметра газового середовища при загорянні матеріалів. Амплітудні значення біспектру для заданого інтервалу досліджуваного небезпечного параметра газового середовища пропонується логарифмувати та формувати на основі цих даних оцінки амплітудного біспектру. Це дозволяє досліджувати особливості амплітуд біспектру щодо динаміки небезпечних параметрів газового середовища для довільних інтервалів на основі аналізу динамічного діапазону амплітуд біспектру при загоряннях різних матеріалів.

2. Здійснена оцінка та виявлені особливості амплітудного біспектру 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 відрізняється від Гауса. Встановлено, що амплітуда біспектру, на відміну від амплітуди традиційного спектра небезпечних параметрів газового середовища, містить інформацію, достатню для надійного виявлення загорянь у приміщенні. У разі такої інформації використовується величина позитивного динамічного діапазону амплітуд біспектру на відповідному інтервалі спостереження. Встановлено, що при загорянні спирту позитивна динаміка амплітуд біспектру змінюється для усіх небезпечних параметрів газового середовища. Суттєві зміни характерні для щільності диму (1дБ–30дБ) та температури газового середовища (1дБ–70дБ). Динамічний діапазон амплітуд біспектру для концентрації чадного газу збільшується від 30 дБ до 70 дБ. Разом з цим виявлено, що загоряння паперу спричиняє зниження динамічного діапазону амплітуд біспектру для щільності диму з 40 дБ до 20 дБ. При цьому динамічний діапазон амплітуд біспектру для концентрації чадного газу та температури збільшується до 60 дБ. Загоряння деревини викликає зростання динамічного діапазону амплітуд біспектру для концентрації чадного газу з 40 дБ до 60 дБ, а температури – з 30 дБ до 40 дБ. При загорянні текстилю динамічний діапазон амплітуд біспектру для температури збільшується з 10 дБ до 60 дБ.

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. Vol. 6/10(90).

P. 57–64. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118213

2. Semko A., Rusanova O., Kazak O., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Gricina I. The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. *International Journal of Multiphysics*. 2015. Vol. 9. № 1. P. 9–20. doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9

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. Vol. 1/10(91). P. 31–37. doi: 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. Vol. 4/84. 11. doi: 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. Vol. 60. №00003. doi: 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. Vol. 91. № 1. P. 27–33. doi: 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. Vol. 708. №1. 012065. doi: 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. Vol. 3/10(87). P. 63–73. doi: 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: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

11. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Maksymenko N., Meleshchenko R., Bezuhla Yu., Hrachova I., Nesterenko R., Shumilova A. Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4/10(106). P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2020.210059

12. 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: 10.15587/978-617-7319-43-5

13. Development of the method of operational forecasting of fire in the premises of objects under real conditions / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Samoïlov M., Krainiukov O., Biryukov I., Butenko T., Bezuhla Yu., Karpets K., Kochanov E. *Eastern-European Journal of Enterprise*. 2021. Vol. 2/10(110). P. 43–50.

doi: 10.15587/1729-4061.2021.226692

14. 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. Vol. 5/9(89). P. 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2017.110092

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. doi: 10.3403/30266860u

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

17. 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.

18. 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. doi: 10.1109/jsen.2005.845207

19. Chen S. -J., Hovde D. C., Peterson K. A., Marshall A. W. Fire detection using smoke and gas sensors. *Fire Safety J.* 2007. № 42. P. 507–515. doi: 10.1016/j.firesaf.2007.01.006

20. 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. doi: 10.1109/jsen.2008.917124

21. Skinner A. J., Lambert M. F. Using smart sensor strings for continuous monitoring of temperature stratification in large water bodies. *IEEE Sensors Journal*. 2006. № 6. P. 1473–1481. doi: 10.1109/jsen.2006.881373

22. Cheon J., Lee J., Lee I., Chae Y., Yoo Y. A single-chip CMOS smoke and temperature sensor for an intelligent fire detector. *IEEE Sensors Journal*. 2009. № 9. P. 914–920. doi: 10.1109/jsen.2009.2024703

23. 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.

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

25. 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. Vol. 5/10(95). P. 25–30. doi: 10.15587/1729-4061.2018.142995

26. 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. Vol. 3/9(93). P. 34–40. doi: 10.15587/1729-4061.2018.133127

27. 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. Vol. 3/10(111). P. 27–33. doi: 10.15587/1729-4061.2021.233606

28. 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 civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-37-9

premises based on modification of the Brown's zero-order model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4/10(112). P. 52–58. doi: 10.15587/1729-4061.2021.238555

29. 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. Vol. 4/10(100). P. 22–29. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176579

30. 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. Vol. 1/10 (97). P. 29–35. doi: 10.15587/1729-4061.2019.155027

31. 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. Vol. 6/4(102). P. 39–46. doi: 10.15587/1729-4061.2019.187252

32. 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. Vol. 6/10(108). P. 14–22. doi: 10.15587/1729-4061.2020.218714

33. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Bezuhla Y., Liashevskaya O., Butenko T., 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. Vol. 4/10(118). P. 60–66. doi: 10.15587/1729-4061.2022.263194

34. 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.

35. Полстянkin P. M. Стохастические модели опасных факторов и параметров очага загорания в помещениях. *Проблемы пожарной безопасности*. 2015. Вып. 38. С. 130–135. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2015_38_24

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

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

38. 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: 10.21203/rs.3.rs-775113/v1

39. 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. Vol. 21. 1177. doi: 10.3390/s21041177

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

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

42. Nikias C. L., Raghuveer M. R. *Bispectral Estimation: a Digital Signal*

Processing Framework. Proc. IEEE. 1987. Vol. 75. № 7. P. 869–891.
doi: 10.1109/proc.1987.13824

B. Pospelov, DSc, Professor, Chief Researcher

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

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

P. Borodych, Associate Professor, Associate Professor of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

CHARACTERISTICS OF THE AMPLITUDE CHANGE OF THE BISPECTRUM OF THE PARAMETERS OF THE GAS ENVIRONMENT DURING IGNITION OF MATERIALS

The features of the amplitude bispectra of the dynamics of the main dangerous parameters of the gas medium at the intervals of the absence and appearance of ignition of materials in the premises were analyzed and revealed. The problem to be solved is the detection of fires in the premises before the fire appears. The results of the research in general indicate the non-linear nature of the dynamics of dangerous parameters of the gas environment before and after the ignition of the materials. It was established that the amplitude bispectrum, in contrast to the traditional amplitude spectrum of dangerous parameters of the gas environment, contains information for reliable detection of fires. As such information, it is proposed to use the value of the positive dynamic range in relation to the amplitudes of the bispectrum. It was established that when alcohol ignites, the positive dynamics of the amplitude bispectrum changes for all dangerous parameters of the gas environment. At the same time, significant changes are characteristic of smoke density (from 1 dB to 30 dB) and temperature (from 1 dB to 70 dB). The dynamic range of the bispectrum amplitudes for carbon monoxide concentration increases from 30 dB to 70 dB. It was determined that the ignition of paper causes a decrease in the dynamic range of the bispectrum amplitudes for smoke density from 40 dB to 20 dB. At the same time, the dynamic range of bispectrum amplitudes for carbon monoxide concentration and temperature increases to 60 dB. When wood catches fire, the dynamic range of amplitudes of the carbon monoxide concentration bispectrum increases from 40 dB to 60 dB, and the temperature increases from 30 dB to 40 dB. It was found that when textiles catch fire, the range of bispectrum amplitude dynamics for temperature increases from 10 dB to 60 dB. In general, the obtained results indicate that the dynamic characteristics of the amplitudes of the bispectrum of the dynamics of dangerous parameters of the gas environment can be considered as signs of early detection of fires in the premises.

Keywords: stability of objects, hazardous events, ignition of materials, gaseous environment, amplitude bispectrum, fire detection

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: 10.15587/1729-4061.2017.118213
2. 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. *International Journal of Multiphysics*, 9, 1, 9–20. doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9
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: 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: 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: 10.1051/e3sconf/20186000003
6. Reproduced with permission from fire loss in the United States during 2019. (2020). National Fire Protection Association. 11. Available at: 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: 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: 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: 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: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99
11. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Krainiukov, O., Maksymenko, N., Meleshchenko, R., Bezuhla, Yu., Hrachova, I., Nesterenko, R., Shumilova, A. (2020). Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/10(106), 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2020.210059
12. 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: 10.15587/978-617-7319-43-5
13. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Samoilov, 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: 10.15587/1729-4061.2021.226692
14. 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: 10.15587/1729-4061.2017.110092
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. doi: 10.3403/30266860u
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. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6d78459f-6378-4845-bf94-3e52a88692df/en-54-31-2014>

17. 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.

18. 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. doi: 10.1109/jsen.2005.845207

19. Chen, S. -J., Hovde, D. C., Peterson, K. A., Marshall, A. W. (2007). Fire detection using smoke and gas sensors. *Fire Safety J.*, 42, 507–515. doi: 10.1016/j.firesaf.2007.01.006

20. 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. doi: 10.1109/jsen.2008.917124

21. Skinner, A. J., Lambert, M. F. (2006). Using smart sensor strings for continuous monitoring of temperature stratification in large water bodies. *IEEE Sensors Journal*, 6, 1473–1481. doi: 10.1109/jsen.2006.881373

22. 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 Sensors Journal*, 9, 914–921. doi: 10.1109/jsen.2009.2024703

23. 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.

24. Peng, X., Liu, S., Lu, G. (2005). Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. *Journal of Chongqing University*, 28, 122.

25. 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: 10.15587/1729-4061.2018.142995

26. 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: 10.15587/1729-4061.2018.133127

27. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Krainiukov, O., Biryukov, I., Butenko, T., Yashchenko, O., Bezuhla, Yu., Karpets, K., Vasylychenko, 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: 10.15587/1729-4061.2021.233606

28. 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: 10.15587/1729-4061.2021.238555

29. 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: 10.15587/1729-4061.2019.176579

30. 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: 10.15587/1729-4061.2019.155027

31. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Krainiukov, O., Karpets, K., Pirohov, O.,
civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-37-9

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: 10.15587/1729-4061.2019.187252

32. 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: 10.15587/1729-4061.2020.218714

33. 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: 10.15587/1729-4061.2022.263194

34. 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.

35. 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

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

37. 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: 10.3390/a8040929

38. Yang, B., Wang, M., Zan, T., Gao, X., (2021). Application of bispectrum diagonal slice feature analysis in tool wear states monitoring. *Research Square*. doi: 10.21203/rs.3.rs-775113/v1

39. 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*. Vol. 21. 1177. doi: 10.3390/s21041177

40. Max, J. (1981). *Principes generaux et methods classiques*. Tome 1. Paris New York Barselone Milan Mexico Rio de Janeiro, 311.

41. 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>

42. Nikias, C. L., Raghuveer, M. R. (1987). Bispectrum estimation: A digital signal processing framework. *Proceedings of the IEEE*, 75(7), 869–891. doi: 10.1109/proc.1987.13824

Надійшла до редколегії: 01.03.2023

Прийнята до друку: 13.04.2023