

УДК 621.03

Б. Б. Поспелов, 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. 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)
П. Ю. Бородич, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-9933-8498)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ СЕРЕДНЬОЇ БІКОГЕРЕНТНОСТІ ДИНАМІКИ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ПОЯВІ ЗАГОРЯНЬ

Об'єктом дослідження є небезпечні параметри газового середовища при загоряннях матеріалів у приміщеннях. Важливість такого дослідження пов'язана з можливістю використання міри середньої бікогерентності для виявлення загорянь та попередження надзвичайних ситуацій в наслідок пожежі. Обґрунтовано міру середньої бікогерентності довільних небезпечних параметрів газового середовища на вільному часовому інтервалі. Експериментально вивчені особливості міри середньої бікогерентності частотних складових спектра основних небезпечних параметрів газового середовища в модельній камері на інтервалах достовірної відсутності та наявності загоряння типових матеріалів загоряння. Результати свідчать, що динаміки небезпечних параметрів газового середовища в камері на інтервалах відсутності та наявності загорянь носить складний нелінійний характер. Встановлено, що різниця міри середньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів газового середовища при наявності та відсутності загорянь має неоднаковий та індивідуальний характер. Зазначено, що індивідуальні особливості міри середньої бікогерентності можуть виступати як можлива ознака щодо виявлення загорянь. Встановлено, що максимальне значення міри, що дорівнює 1,0, для усіх частотних індексів має місце перед загоранням спирту та паперу. Перед загоранням деревини та текстилю значення міри по частотних індексах мають випадковий характер та лежать в межах від 0,4 до 0,8. Встановлено, що загоряння матеріалів призводять до втрати початкових взаємозв'язків третього порядку між частотними складовими у спектрах. Це дозволяє розглядати вказану втрату зв'язків в якості загальної ознаки щодо виявлення загорянь шляхом обчислення запропонованої міри середньої бікогерентності небезпечних параметрів газового середовища у приміщеннях.

Ключові слова: міра, середня бікогерентність, зміна небезпечних параметрів, газове середовище, загоряння матеріалу

1. Вступ

На сучасному етапі постійного зростання різних типів загроз важливою проблемою є забезпечення стійкого функціонування об'єктів [1]. Особливе місце [2, 3] посідають об'єкти критичної інфраструктури, які є джерелами виникнення надзвичайних ситуацій та небезпечних подій [4]. Джерелами різних загроз і небезпечних подій виступають практично усі об'єкти технічної [5, 6] та соціально-економічної сфери [7, 8]. Зазвичай загрози та надзвичайні ситуації оцінюють рівнем завданих ними збитків та частотою їх появи. З огляду на це максимальна частота появи та рівень збитків характерні пожежам у приміщеннях (ПП) [9]. ПП завдають великої шкоди як здоров'ю людини [10, 11], так і власно об'єктам [12]. Крім того власно ПП та пожежна техніка, що використовується для гасіння пожежі, завдають значної шкоди й зовнішньому середовищу [13, 14]. Однак світова тенденція зростання частоти ПП та рівня збитків свідчать про те, що сучасні технології не повністю вирішують проблему забезпечення стійкого функціонування об'єктів та ефективного їх захисту від ПП [15]. Тому одним із важливих напрямів

забезпечення стійкого функціонування об'єктів на сучасному етапі слід вважати якісний їх захист від ПП. Відомо, що джерелом будь-якого ПП є поява загоряння (З) [16]. Це означає, що проблема якісного захисту об'єктів від ПП зводиться до раннього виявлення З та недопущення переходу З в великі пожежі зі збитками. Тому вирішення проблеми виявлення З (ВЗ) є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [17] зазначається, що раннє ВЗ можна здійснювати за рахунок використання нетрадиційних ознак та прогнозування структурних змін щодо небезпечних параметрів газового середовища (ГС) приміщень. Показано, що реальна динаміка небезпечних параметрів ГС як до, так і після З мають нелінійний та нестационарний характер. Це дає підстави щодо різних напрямків розв'язанні проблеми ВЗ. Перший напрямок пов'язаний із підвищенням якості ВЗ в умовах нестационарної зміни небезпечних параметрів ГС. Наприклад, в умовах нестационарної зміни параметрів ГС пропонується використовувати швидкодію відомих методів ВЗ [18]. Однак такі методи обмежуються лише часовою областю та схемними рішеннями. При цьому частотна область щодо структурної зміни небезпечних параметрів ГС не розглядається, а схемні рішення обмежуються лише температурою ГС. У роботі [19] в умовах нестационарної зміни небезпечних параметрів ГС пропонується для ВЗ використовувати адаптивні методи. Однак методи [19] обмежуються адаптацією до нестационарних характеристик небезпечних параметрів ГС у часовій області лише другого порядку. Частотна область при цьому та властивості зміни небезпечних параметрів ГС вище другого порядку не досліджуються.

Другий напрямок пов'язаний із підвищенням якості ВЗ в умовах складного та нестационарного характеру змін небезпечних параметрів ГС. Так, у [20] пропонується використовувати групова обробка вимірювань безлічі датчиків з урахуванням реалізації мережевих технологій. Групова обробка вимірювань від безлічі датчиків щодо різних небезпечних параметрів ГС у складних та нестационарних умовах розглядається в [21]. Однак групова обробка обмежується змінами параметрів ГС у часовій області та традиційними характеристиками, що не дозволяють виявляти нелінійні властивості.

З огляду на важливість проблеми ВЗ горючих матеріалів (ГМ) з низьким темпом З третій напрям присвячений експериментальному вивченню особливостей зміни небезпечних параметрів ГС при З таких ГМ. У роботі [22] наведено результати дослідження зміни небезпечних параметрів ГС під час З деревини. Дослідження залежності швидкості зростання температури ГС від інтенсивності горіння деревини виконано в [23]. Однак дослідження обмежуються залежністю лише середньої швидкості зростання температури від середньої інтенсивності горіння. Результати аналогічних досліджень для органічного скла та кипариса наведено в [24]. При цьому в роботах [22–24] відсутні дослідження особливостей часових та спектральних характеристик другого та третього порядку щодо небезпечних параметрів, які здатні виявляти їх структурні зміни. З огляду на нелінійний та нестационарний характер поведінки реальних небезпечних параметрів ГС під час З ГМ, для вирішення проблеми ВЗ необхідне використання новітніх нетрадиційних підходів, що здатні виявляти такі складні зміни.

У зв'язку з цим, четвертий напрямок визначається низькою досліджень щодо можливості ВЗ на основі використання фрактальних характеристик змін небезпечних параметрів ГС. У роботі [25] досліджуються можливості використання міри кореляційної розмірності для вектора стану небезпечних параметрів ГС. Застосування методу рекурентних діаграм щодо змін концентрації CO для раннього ВЗ, Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-39-16

присвячено роботу [26]. У [27] досліджуються можливості ВЗ на основі прогнозування Z щодо поточної рекурентності вектора стану небезпечних параметрів ГС. Дослідженню модифікації моделі прогнозування Брауна щодо раннього ВЗ присвячена робота [28]. Адаптивний метод визначення рекурентних діаграм в умовах невизначеності динаміки небезпечних параметрів ГС розглядається в [29]. Однак зазначені підходи та методи, незважаючи на їхню новизну та перспективність використання, щодо вирішення проблеми ВЗ, обмежуються розглядом тільки часової області. Спектральна область при цьому не розглядається. Розвиток кореляційного методу щодо ВЗ на основі обчислення поточної рекурентності станів ГС розглядається в [30]. Застосуванню методу структурної функції для ВЗ присвячено дослідження [31]. Використання функції невизначеності щодо вирішення проблеми ВЗ розглядається в роботі [32]. Однак слід відмітити, що результати досліджень [30–32] обмежуються розглядом лише часової області. При цьому частотна область зміни небезпечних параметрів ГС не розглядається, а спектральні особливості змін не досліджуються. Більшість відомих моделей зміни небезпечних параметрів ГС є детермінованими [33]. Стохастичні моделі зміни небезпечних параметрів ГС розглядаються в [34]. Однак у [33, 34] моделі є часовими. При цьому в [33] зазначається, що більшість моделей мають уточнюватися під час вогневих випробувань. Результати вогневих випробувань з урахуванням випадкового фактора розглядаються в [35]. Наголошується, що підвищення ефективності ВЗ у реальних умовах повинне здійснюватись на основі спільної зміни щодо концентрації СО та густини диму ГС. У [36] досліджуються взаємні зв'язки між різними небезпечними параметрами ГС. Однак дослідження обмежуються тільки оцінкою кореляцій, яка характеризує виключно лінійний зв'язок. При цьому характеристики порядку вище за другий у частотній області, що дають змогу виявляти нелінійні зв'язки, не досліджуються.

П'ятий напрям пов'язаний із можливостями ВЗ на основі особливостей зміни небезпечних параметрів ГС у частотній області. У роботі [37] досліджуються особливості миттєвих амплітудних та фазових спектрів зміни небезпечних параметрів ГС приміщень. Зазначається, що амплітудні спектри виявляються малоінформативними з точки зору ВЗ. Однак цей висновок стосується амплітудного спектра тільки другого порядку (традиційного). Такий спектр, як відомо, не здатний виявляти кореляційні зв'язки між відповідними частотними складовими, що виникають у разі нелінійної змін небезпечних параметрів ГС, що є характерними в реальних умовах. При цьому спектрі зміни небезпечних параметрів ГС порядку вище за другий, здатні виявляти нелінійні властивості, однак вони не розглядаються. У роботі [38] досліджуються особливості амплітудних спектрів щодо небезпечних параметрів ГС у модельній камері. При цьому підтверджено, що амплітудні спектри третього порядку дозволяють виявляти нелінійні зв'язки частотних складових у спектрах зміни небезпечних параметрів ГС. Зазначається, що виявлення нелінійних частотних зв'язків істотно залежить від енергії небезпечного параметра ГС, що вимірюється. Особливості бікогерентності, яка є інваріантною до енергії небезпечного параметра, при цьому не розглядається. Особливості зв'язків частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів ГС на основі бікогерентності досліджуються в [39]. Однак особливості бікогерентності спектра виконано тільки для окремого випадку частотних триплетів, що визначаються частотою та їхніх других гармонік. Це суттєво

обмежує можливості використання результатів дослідження [39] щодо ВЗ. При цьому особливості зв'язків для довільної пари частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів ГС щодо ВЗ залишилися не дослідженими.

Таким чином, реальні зміни небезпечних параметрів ГС є складними та нестационарними. Складність змін зумовлені різними нелінійними ефектами, що виникають у ГС під час З і є прихованими та невизначеними. Відомі результати дослідження особливостей зв'язку частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів ГС на основі бікогерентності виконані тільки для окремого виду частотних триплетів і тому не можуть вважатися повними щодо ВЗ. Тому важливою та невирішеною частиною проблеми ВЗ слід вважати відсутність даних про особливості середньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін основних небезпечних параметрів ГС при З різних ГМ.

3. Мета та завдання дослідження

Мета роботи – визначити особливості середньої бікогерентності частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів газового середовища на інтервалах відсутності та виникнення загоряння. Результати цих досліджень можуть бути використані для раннього виявлення загорянь матеріалів у приміщеннях з метою недопущення в них виникнення пожежі.

Для досягнення мети роботи поставлено завдання:

- виконати теоретичне обґрунтування міри середньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін довільних небезпечних параметрів газового середовища на вільному обмеженому часовому інтервалі;
- експериментально вивчити особливості міри середньої бікогерентності частотних складових спектра змін для основних небезпечних параметрів газового середовища в модельній камері на інтервалах достовірної відсутності та наявності загоряння для типових матеріалів загоряння.

4. Матеріали та методи дослідження

Матеріалами дослідження служили вимірювання небезпечних параметрів ГС у стельовій області модельної камери [33]. Вимірювання здійснювались дискретно у часі з інтервалом 0,1 с. Результати вимірювань зберігалися в пам'яті комп'ютера. Примусове З тестових ГМ (ТГМ) проводилося приблизно в дискретний момент $t = 200$. Небезпечними параметрами ГС камери, що вимірювались були температура, щільність диму та концентрація СО. Поточне вимірювання температури ГС здійснювалось датчиком ТПТ-4 (Україна) [40], густини диму – датчиком ИПД-3.2 (Україна) [41], а концентрації СО – датчиком Discovery (Швейцарія) [42]. В експерименті у якості тестових обрано типові для приміщень ГМ як спирт, папір, деревина та текстиль. Небезпечними параметрами ГС, що вимірювались були температура, щільність диму та концентрація СО.

Обраний метод дослідження базується на використанні методу обчислення перетворення Фур'є по дискретних вимірюваннях відповідних небезпечних параметрів ГС камери щодо двох однакових за тривалістю інтервалів часу, що визначалися 100 дискретними значеннями, та методу визначення бікогерентності обчислених відповідних Фур'є спектрах. При цьому перший інтервал визначався між 100-м та 200-м дискретним вимірюваннями і відповідав достовірній відсутності З. Другий інтервал обмежувався між 200-м та 300-м вимірюваннями і

включав момент початку примусового З ТГМ у модельній камері. Обчислення бікогерентності на зазначених інтервалах досліджувалися для кожного з ТГМ у такому порядку: спирт, папір, деревина та текстиль. Щодо відновлення вихідних умов для небезпечних параметрів ГС камері після З кожного з ТГМ проводилася природна вентиляція камери протягом 5 хв. Запропонована міра середньої бікогерентності небезпечних параметрів ГС на вказаних інтервалах обчислювалась шляхом усереднення по відповідним частотним складовим спектру модуля косинусу миттєвої бікогерентності. На основі обчислених значень міри середньої бікогерентності для двох вказаних інтервалів методом порівняння динаміки значень мір на цих інтервалах здійснювалось вивчення особливостей поведінки середньої бікогерентності небезпечних параметрів газового середовища приміщень при появі загорянь.

5. Результати вивчення середньої бікогерентності динаміки параметрів газового середовища при загорянні

5.1. Теоретичне обґрунтування міри середньої бікогерентності

Відомо, що спектри порядку, вищого за другий, зазвичай використовують для виявлення та ідентифікації нелінійних зв'язків між частотними складовими складних процесів [43]. В роботі [44] зазначається, що в загальному випадку спектри високого порядку є надійним інструментарієм щодо виявлення особливостей процесів, які відрізняються від Гаусу, з одночасним придушенням адитивних перешкод Гауса. Слід зазначити, що спектри порядку вище другого містять корисну інформацію щодо особливостей процесів в порівнянні зі спектрами другого порядку [45, 46].

Оцінка біспектру $B(h_1, h_2; T)$ для часового інтервалу T та дискретної на ньому множини $\{x(k)\}$ значень досліджуваного процесу, дотримуючись [47], визначатиметься у вигляді:

$$B(h_1, h_2; T) = X(h_1; T)X(h_2; T)X^*(h_1 + h_2; T), \quad (1)$$

де $B(h_1, h_2; T)$ – функція змінних h_1, h_2 для заданого інтервалу T ; h_1, h_2 – частотні індекси, що відповідають частотам $f_1 = h_1/T$ та $f_2 = h_2/T$;

$X(h; T) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp(-j2\pi hk/N)$, ($0 \leq k \leq N-1$) – визначає перетворення Фур'є для

дискретної множини $\{x(k)\}$ та довільного частотного індексу h ($0 \leq h \leq N-1$); * – оператор комплексного спряження. Величина T визначає тривалість інтервалу в секундах. При цьому інтервал і його тривалість повинні відповідати ділянці стаціонарності процесу. У разі невиконання цієї умови перетворення Фур'є в (1) визначатиметься з помилкою, величина якої залежатиме від ступеня нестационарної поведінки процесу на цьому інтервалі. Крім цього оцінка (1) є комплексною величиною [48]. Тому вона характеризується дійсною $\text{Re}[B(h_1, h_2; T)]$ та мнимою $\text{Im}[B(h_1, h_2; T)]$ частинами. Це означає, що замість оцінки (1) можна розглядати відповідні оцінки біспектру амплітуди та фази. Для інтервалу T фазовий біспектр $\varphi(h_1, h_2; T)$ визначатиметься:

$$\varphi(h_1, h_2; T) = \arctg\{\text{Im}[B(h_1, h_2; T)] / \text{Re}[B(h_1, h_2; T)]\}. \quad (2)$$

На відміну від біспектру амплітуди, (2) не залежить від енергії відрізка реалізації процесу на інтервалі тривалістю T і визначається нелінійною функцією від відношення мнимої та дійсної частини (1), що визначаються з приблизно однаковими похибками. Це дає змогу певною мірою знизити вплив зазначених помилок на визначення бікогерентності. Для додаткового зниження впливу похибок, слідуючи [39], пропонується замість (2) використовувати міру, що визначається у вигляді:

$$M(h_1, h_2; T) = |\cos[\varphi(h_1, h_2; T)]|. \quad (3)$$

У цьому разі значення міри бікогерентності (3) належатимуть фіксованому інтервалу: $-1 \leq M(h_1, h_2; T) \leq 1$. Крім того нелінійна функція косинуса у (2) дає змогу додатково згладити можливі похибки в області когерентності (2) (0 та π). При цьому міра (3), що дорівнює 1, відповідає повній когерентності трьох частот, що визначаються частотними індексами h_1 , h_2 та h_1+h_2 у спектрі $X(h; T)$. Якщо міра (3) дорівнює -1, то між зазначеними трьома частотами має місце також повна когерентність, але вона характеризується протилежним значенням (2), тобто рівним π . У разі міри (3), що дорівнює нулю, когерентність між зазначеними трьома частотами в спектрі $X(h; T)$ відсутня. Проміжні значення міри (3) відповідатимуть різному ступеню когерентності зазначених трьох частот у спектрі $X(h; T)$. При цьому абсолютне значення міри (3) для частотних індексів h_1 , h_2 , відмінне від нуля, вказуватиме на наявність відповідного ступеня когерентності для частотних індексів h_1 , h_2 та h_1+h_2 у спектрі $X(h; T)$. Ступінь бікогерентності визначає частку енергії процесу між будь-якою парою частот та їхньою сумарною частотою. При цьому точність міри (3) залежатиме від точності визначення спектра $X(h; T)$, яка зі свого боку обернено пропорційна тривалості T часового інтервалу. Слідуючи [49], зі збільшенням тривалості інтервалу T точність оцінки спектра $X(h; T)$ буде зростатиме. Крім цього, в [50] доводиться, що для великих за тривалістю T інтервалів (значень N) оцінки для дійсної та мнимої частин біспектру (1) виявляються асимптотичне незміщеними та спроможними. Важливою перевагою міри (3), порівняно з амплітудою біспектру (1), є її інваріантність до енергетичних параметрів відрізка реалізації процесу, її підвищена точність і застосовність до різних видів частотних триплетів. Це дає змогу за допомогою міри (3) досліджувати особливості когерентності спектральних складових $X(h; T)$ для довільних видів частотних триплетів. Крім цього, міра (3) дає змогу для довільного небезпечного параметра ГС на заданому інтервалі визначати та візуально відображати ступінь бікогерентності частот спектру $X(h; T)$. Візуальне відображення здійснюється у вигляді тривимірного графіка з двома взаємно ортогональними координатними осями, що визначаються заданими частотними індексами, та третьою взаємною ортогональною віссю, яка відповідає величині міри (3) для відповідної довільної пари частотних індексів. Однак таке візуальне відображення бікогерентності ускладнює його застосування на практиці. Тому актуальними є пропозиції щодо способів перетворення цього відображення в інші види, що зручніші для практичного застосування.

У [39] запропоновано один із можливих способів такого перетворення. Пропонований спосіб полягає в перетворенні (3) на міру $M_1(h_1, h_1; T)$. При цьому

пропонована міра є окремим випадком і залежить тільки від єдиного частотного індексу. Це дає змогу відображати величину бікогерентності тільки для одного довільного частотного індексу в спектрі $X(h_1; T)$. Тому зазначене перетворення міри (3) обмежується тільки визначенням величини бікогерентності між довільною частотою та її подвоєною частотою в спектрі досліджуваного процесу. Величину бікогерентності для довільної пари частот у спектрі ця міра не визначає. Тому пропонується міра, яка здатна визначати середню величину бікогерентності щодо вільної частоти з урахуванням усіх інших частот спектру досліджуваного процесу:

$$M_2(h_1; T) = \text{if } [h_1 = 0, \frac{1}{h_{\max} + 1} \sum_{i=0}^{h_{\max}} M(0, i; T), \frac{1}{h_{\max} + 1} \sum_{i=0}^{h_{\max}} M(h_1, i; T)], \quad (4)$$

де h_{\max} – величина максимального частотного індексу в спектрі досліджуваного процесу, яка визначається за умови: $h_{\max} < h_s$, где h_s – максимальний частотний індекс у спектрі досліджуваного процесу. Міра (4) на відміну від [39] визначає середню величину бікогерентності для довільного частотного індексу з урахуванням усіх частот у спектрі, що відповідають частотним індексам від 0 до h_{\max} . Ця міра за рахунок усереднення по частотних індексах дає змогу додатково зменшити випадкові похибки. На основі міри (4) можна вивчати особливості середньої бікогерентності для довільного частотного індексу спектру небезпечного параметра ГС на довільних часових інтервалах. В цьому випадку необхідно визначити значення цієї міри щодо відповідних небезпечних параметрів ГС на інтервалах, які відповідають достовірній відсутності та наявності З ГМ.

Таким чином, міра (4) на відміну від відомих мір дає змогу вивчати особливості не тільки середньої бікогерентності власних частот у спектрі небезпечних параметрів ГС, а й середньої бікогерентності з урахуванням вкладу усіх частотних складових у спектрі. Інакше кажучи, міра (4) дає змогу враховувати внесок в когерентність кожної з частот усіх інших частотних складових досліджуваного спектру.

5.2. Вивчення особливостей міри середньої бікогерентності небезпечних параметрів середовища при загоряннях

Вивчення особливостей міри середньої бікогерентності (4) виконувалось для рівних за тривалістю T інтервалів, що дорівнювали 100 дискретним вимірюванням відповідного небезпечного параметра ГС при достовірній відсутності та наявності З ТГМ у модельній камері. Експериментальну частину роботи і процедуру обробки експериментальних даних, отриманих у камері, докладно наведено у роботі [39]. Відмінність запропонованої процедури обробки експериментальних даних полягала в тому, що замість міри [39] під час експерименту обчислювалась міра (4). Слід зазначити, що міра (4) за заданої тривалості часового інтервалу залежить тільки від одного довільного частотного індексу h_1 та визначає для цього частотного індексу середній ступінь бікогерентності з урахуванням внеску усіх частотних триплетів (вільних трьох частотних індексів) спектру небезпечних параметрів ГС. На рис. 1 наведено результати дослідження міри (4) для різних частотних індексів h_1 та відповідних небезпечних параметрів ГС на інтервалах достовірній відсутності та наявності З.

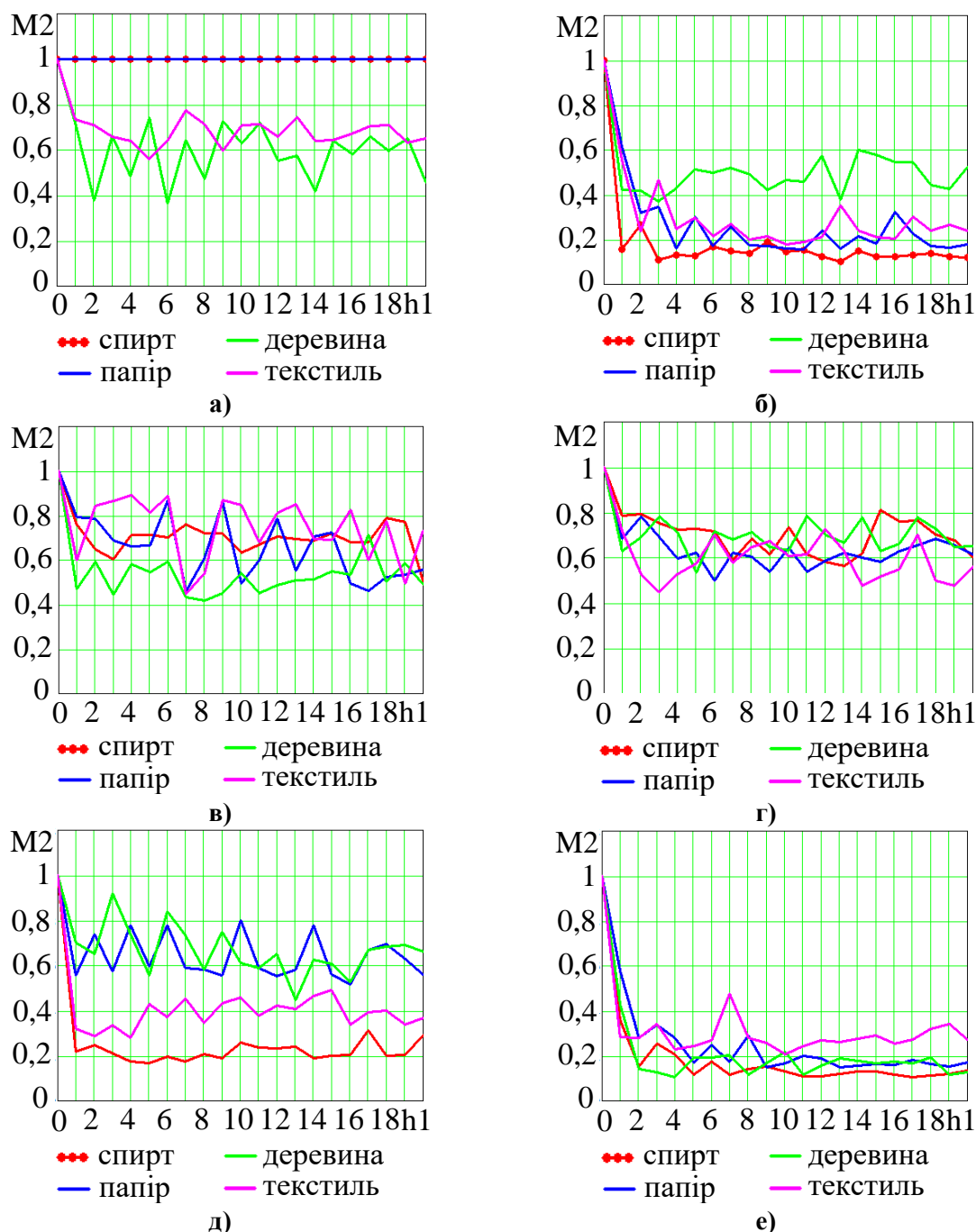


Рис. 1. Залежності середньої бікогерентності спектру зміни температури, густини диму та концентрації CO для різних значень частотного індексу h_1 з урахуванням вкладу від усіх частотних триплетів на різних інтервалах: а, в, д – відсутність загоряння; б, г, е – наявність загоряння

Графіки на рис. 1 визначають ступінь середньої бікогерентності (4) для частот у спектрі щодо відповідних небезпечних параметрів ГС на інтервалах достовірної відсутності та наявності 3 ТГМ у модельній камері.

6. Обговорення результатів дослідження міри середньої бікогерентності небезпечних параметрів газового середовища

З аналізу результатів на рис. 1, випливає, що зміна температури, густини диму та концентрації CO ГС у модельній камері на інтервалах відсутності та наявності 3 спирту, паперу, деревини та текстилю є в цілому складним процесом, що характеризується

зується різними середніми ступенями бікогерентності щодо частотних складових спектру. Це означає, що процес зміни зазначених параметрів ГС у камері зазвичай не є процесом Гауса, а має більш складний та нелінійний характер. Цей результат не суперечить відомим результатам і загалом збігається з ними. При цьому для кожного з розглянутих небезпечних параметрів ГС характер їх складної зміни виявляється неоднаковим та є суттєво індивідуальним. Це пояснюється різними прихованими механізмами, що відбуваються на молекулярному та макроскопічному рівнях та призводять до утворення спостережуваних змін розглянутих небезпечних параметрів ГС у камері при відсутності і наявності З ТГМ. При цьому при інтерпретації результатів слід враховувати, що значення міри (4), які зосереджуються біля нульового значення відповідають відсутності когерентності третього порядку між відповідними частотними складовими у спектрі зміни небезпечного параметру. Разом з тим відомо, що у випадку процесу Гауса, когерентність третього порядку частотних складових буде дорівнювати нулю, що відповідає значенням міри (4) близьких до одиниці. Наприклад, різниця величини міри середньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін температури ГС (рис. 1 а, б) при З ТГМ, свідчить про наявність неоднакового характерного зв'язку між відповідними частотними складовими. Це означає, що реальна зміна температури ГС в камері як на інтервалі відсутності, так і на інтервалі наявності З досліджуваних ТГМ має в цілому нелінійний характер. Характерні особливості розподілу величини міри середньої бікогерентності для частот спектру зміни температури можуть бути використані як можлива ознака щодо раннього виявлення З ТГМ. При цьому на інтервалі відсутності З ТГМ динаміка зміни температури ГС у камері характеризується також неоднаковим розподілом значень міри середньої бікогерентності щодо окремих частотних складових (рис. 1 а). Наприклад, усереднена по 20 частотних складових (в діапазоні частот 0-2 Гц) міра середньої бікогерентності лежить у межах від 0 до 1,0. При цьому характер зміни міри середньої бікогерентності по частотах є неоднаковим. Максимальне значення міри, що дорівнює 1,0 для усіх частотних індексів має місце перед З спирту та паперу. Перед З деревини та текстилю значення міри по частотним індексам мають випадковий характер з розкидом по частотах в межах від 0,4 до 0,8. Випадковість розподілу значень міри, на нашу думку, обумовлена недостатнім інтервалом часу природної вентиляції камери після З кожного з ТГМ. Зазвичай за цей час небезпечні параметри ГС камери не встигатимуть прийти в початковий стан. На це впливає також і різний набір утворення кожним з ТГМ небезпечних параметрів ГС. Тому можна стверджувати, що в ході експерименту початкові властивості ГС камери мали різний характер. При виконанні експериментального дослідження цей недолік розглядався як корисний. Наприклад, різниця величин міри середньої бікогерентності для частотних складових у спектрах зміни щільності диму та концентрації чадного газу ГС камери (рис. 1 в, д) при відсутності З ТГМ підтверджує це ствердження. З аналізу результатів, що наведені на рис. 1 б, г, е, встановлено, що наявність З ТГМ впливає на характер розподілу значень міри по різних частотних індексах для температури, щільності диму та чадного газу. Так, встановлено, що загальний вплив З ТГМ проявляється в появі тенденції зменшення значень міри для зростаючих частотних індексів. Наприклад, вказана тенденція володіє максимальною швидкістю для концентрації чадного газу, а мінімальною швидкістю щодо щільності при З усіх досліджуваних ТГМ. Це означає, що З ТГМ в цілому призводять до втрати початкових взаємозв'язків між частотними складовими і переходу динаміки небезпечних параметрів ГС зі стохастичними властивостями. Саме цей факт може розглядатися в якості ефективного приз-

наку щодо виявлення появи Z у приміщеннях на основі використання запропонованої міри середньої бікогерентності небезпечних параметрів ГС.

Таким чином, експериментальне вивчення особливостей міри середньої бікогерентності досліджуваних небезпечних параметрів ГС в модельній камері при загорянні ТГМ за даними їх вимірювання можуть бути використані щодо виявлення Z для недопущення виникнення пожежі зі втратами в приміщеннях різних типів об'єктів. Одержані результати свідчать про те, що динаміки небезпечних параметрів ГС в камері на інтервалах відсутності та наявності Z ТМ в цілому відрізняються від Гауса та носять нелінійний характер. Це означає, що ефективно виявлення небезпечних змін у динаміці небезпечних параметрів ГС, що викликаються Z матеріалів, потребує використання нових методів нелінійної динаміки. Наприклад, запропонована міра середньої бікогерентності щодо небезпечних параметрів ГС є представником таких методів. Однак використання запропонованої міри середньої бікогерентності для фіксованого інтервалу вимірювань не дозволяє визначити момент часу виникнення Z , що є важливим для практики показником з точки зору недопущення пожежі та евакуації людей. При цьому момент Z на основі міри середньої бікогерентності буде визначатися лише з точністю до часового положення вимірюваного інтервалу часу. Слід зазначити, що точність обчислення міри середньої бікогерентності залежатиме переважно від тривалості інтервалу та реалізованої частоти дискретизації вимірювань. Чим більша тривалість цього інтервалу, тим точніше обчислюється спектр Фур'є та бікогерентність відповідного небезпечного параметра ГС. Відмітимо, що у дослідженні інтервал вимірювання складав 100 дискретних значень небезпечного параметра з інтервалом 0,1 секунду. Це означає, що тривалість двох інтервалів дорівнювала 10 секундам. Для таких параметрів вимірювання момент виявлення Z відбувається лише з точністю 10 секунд. При цьому роздільна частотна здатність становить 0,1 Гц. До обмежень дослідження можна віднести те, що результати одержані на основі експериментальних вимірів динаміки небезпечних параметрів ГС у модельній камері для обмеженого набору типів ГМ. Тому вони не є остаточними, а лише вказують головний напрямок та перспективність можливого подальшого розвитку цього дослідження. У зв'язку з цим отримані результати потребують додаткової перевірки вогневыми випробуваннями в реальних умовах Z матеріалів у приміщеннях об'єктів.

7. Висновки

1. Теоретично обґрунтовано міра середньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін довільних небезпечних параметрів газового середовища на вільному обмеженому часовому інтервалі. Запропонована міра дає змогу вивчати особливості середньої бікогерентності небезпечних параметрів газового середовища з урахуванням вкладу усіх частотних складових у спектрі. Інакше кажучи, така міра дає змогу враховувати внесок у когерентність для кожної з частот спектру усіх інших частот.

2. Експериментально вивчені особливості зміни значень міри середньої бікогерентності частотних складових спектра основних небезпечних параметрів газового середовища в модельній камері на інтервалах достовірної відсутності та наявності загоряння для типових матеріалів загоряння. Одержані результати свідчать про те, що динаміки небезпечних параметрів газового середовища в камері на інтервалах відсутності та наявності загорянь матеріалів в цілому відрізняються від Гауса та носять складний нелінійний характер. Встановлено, що різниця міри се-

редньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів газового середовища при наявності та відсутності загорянь має неоднаковий характер зв'язку для відповідних частотних складових. Зазначено, що такі характерні особливості різниці величин міри середньої бікогерентності для частот можуть бути використані як можлива ознака щодо раннього виявлення загорянь. Встановлено, що максимальне значення міри, що дорівнює 1,0 для усіх частотних індексів має місце перед загоранням спирту та паперу. Перед загоранням деревини та текстилю значення міри по частотним індексам мають випадковий характер з розкидом по частотах в межах від 0,4 до 0,8. При цьому встановлено, що загальний вплив загоряння проявляється в появі тенденції зменшення міри для зростаючих частотних індексів. Така тенденція володіє максимальною швидкістю для концентрації чадного газу, а мінімальною до щільності диму при загорянні усіх досліджуваних матеріалів. Встановлено, що загоряння матеріалів призводять до втрати початкових взаємозв'язків третього порядку між частотними складовими та переходу до стохастичної динаміки небезпечних параметрів газового середовища. Така обставина дозволяє розглядати її в якості можливої ознаки щодо виявлення загорянь на основі запропонованої міри середньої бікогерентності небезпечних параметрів газового середовища у приміщеннях.

Литература

1. Vambol S., Vambol V., Suchikova Y., Deyneko N. Analysis of the ways to provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle. *EEJET*. 2017. Vol. 1/10(85). P. 27–36. doi: 10.15587/1729-4061.2017.85847
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. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V. Conceptual approaches for development of informational and analytical expert system for assessing the NPP impact on the environment. *Nuclear and Radiation Safety*. 2018. Vol. 3(79). P. 56–65. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).09
4. Development of the method of frequencytemporal representation of fluctuations of gaseous medium parameters at fire / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Popov V., Semkiv O. // *EEJET*. 2018. Vol. 2/10(92). P. 44–49. doi: 10.15587/1729-4061.2018.125926
5. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I. Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6/10(90). P. 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114504
6. 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. P. 11. doi: 10.32918/nrs.2019.4(84).11
7. Vambol V., Vambol S., Kondratenko O., Koloskov V., Suchikova Y. Substantiation of expedience of application of high-temperature utilization of used tires for liquefied methane production. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2018. Vol. 87(2). P. 77–84. doi: 10.5604/01.3001.0012.2830
8. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A. Improving the installation for fire extinguishing with finelydispersed water. *EEJET*. 2018. Vol. 2/10(92). P. 38–43. doi:

10.15587/1729-4061.2018.127865

9. Otrosh Y., Danilin O., Zhuravskiy M. Assessment of the technical state and the possibility of its control for the further safe operation of building structures of mining facilities. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 123. № 01012. doi: 10.1051/e3sconf/201912301012

10. Ragimov S., Sobyna 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

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. *EEJET*. 2020. Vol. 4/10(106). P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2020.210059

12. 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

13. 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

14. Rybalova O., Artemiev S., Sarapina M., Tsybmal B., Bakhareva A., Shestopalov O., Filenko O. Development of methods for estimating the environmental risk of degradation of the surface water state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2/10(92). P. 4–17. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127829

15. World Fire Statistics. Center for Fire Statistics of CTIF. 2022. № 27. P. 65. URL: https://www.ctif.org/sites/default/files/2022-08/CTIF_Report27_ESG.pdf

16. Kovalov A., Otrosh Y., Kovalevska T., Togobytska V., Rolin I. Treatment of Determination method for strength characteristics of reinforcing steel by using thread cutting method after temperature influence. *MSF*. 2020. Vol. 1006. P. 179–184. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.179

17. Development of the method of operational forecasting of fire in the premises of objects under real conditions / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Samoilov 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

18. Andronov V., Pospelov B., Rybka E. Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors. *EEJET*. 2017. Vol. 2/9(86). P. 32–37. doi: 10.15587/1729-4061.2017.96694

19. 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

20. Caixia C., Fuchun S., Xinquan Z. One Fire Detection Method Using Neural Networks. *Tsinghua Science and Technology*. 2011. Vol. 16. № 1. P. 31–35. doi: 10.1016/s1007-0214(11)70005-0

21. Ding Q., Peng Z., Liu T., Tong Q. Multi-Sensor Building Fire Alarm System with Information Fusion Technology Based on D-S Evidence Theory. *Algorithms*. 2014. № 7. P. 523–537. doi: 10.3390/a7040523
22. Wu Y., Harada T. Study on the Burning Behaviour of Plantation Wood. *Scientia Silvae Sinicae*. 2004. № 40. P. 131–136.
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., Vasylchenko 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 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., 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
31. 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
32. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Krainiukov O., Harbuz S., Bezuhla Yu., Morozov I., Kuruch A., Saliyenko O., Vasylchenko R. Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector. *Eastern-European Journal of Enterprise*. 2020. Vol. 2/10(104). P. 6–12. doi: 10.15587/1729-4061.2020.200140
33. Floyd J., Forney G., Hostikka S., Korhonen T., McDermott R., McGrattan K. *Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's Guide*. National Institute of Standard and

Technology. 2013. Vol. 1. 1st ed.

34. Полстянкін Р. М. Стохастическіє моделі небезпечних факторів і параметрів очага загорання в приміщеннях. Проблеми пожежної безпеки. 2015. Вып. 38. С. 130–135. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2015_38_24

35. Heskestad G., Newman J. S. Fire Detection Using Cross-Correlations of Sensor Signals. *Fire Safety J.* 1992. Vol. 18. № 4. P. 355–374. doi: 10.1016/0379-7112(92)90024-7

36. 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.

37. 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

38. Pospelov B., Rybka E., Savchenko A., Dashkovska O., Harbuz S., Naden E., Chornomaz I., Hryshko S., Nepsha O. Peculiarities of amplitude spectra of the third order for the early detection of indoor fires. *EEJET.* 2022. Vol. 5/10(119). P. 49–56. doi: 10.15587/1729-4061.2022.265781

39. Pospelov B., Bezuhla Y., Yashchenko O., Khalmuradov B., Petukhova O., Gornostal S., Kozar Y., Tishechkina K., Salamatina O., Ihnatenko Z. Revealing the features of the third order phase spectrum of the main dangerous parameters of the gas medium. *EEJET.* 2022. Vol. 6/10(120). P. 63–70. doi: 10.15587/1729-4061.2022.268437

40. Паспорт. Сповісчувач пожежний тепловий точковий. Arton. с. 7. URL: <https://ua.arton.com.ua/files/passports/%D0%A2%D0%9F%D0%A2-4-UA.pdf>

41. Паспорт. Сповісчувач пожежний димовий точковий оптичний. Arton. с. 8. URL: https://ua.arton.com.ua/files/passports/spd-32_new_pas_ua.pdf

42. Optical/Heat Multisensor Detector. *Discovery.* 2019. Issue 1. p. 4. URL: <https://www.nsc-hellas.gr/pdf/APOLLO/discovery/B02704-00%20Discovery%20Multisensor%20Heat-%20Optical.pdf>

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

44. 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

45. Chua K. C., Chandran V., Acharya U. R., Lim C. M. Application of higher order statistics/spectra in biomedical signals-A review. *Med. Eng. Phys.* 2010. № 32. P. 679–689. doi: 10.1016/j.medengphy.2010.04.009

46. Chua K. C., Chandran V., Acharya U. R., Lim C. M. Cardiac state diagnosis using higher order spectra of heart rate variability. *J. Med. Eng. Technol.* 2008. № 32. P. 145–155. doi: 10.1080/03091900601050862

47. 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

48. Martín-Montero, A., Gutiérrez-Tobal, G. C., Kheirandish-Gozaal, L., Jiménez-García, J., Álvarez, D., del Campo, F. Heart rate variability spectrum characteristics in children with sleep apnea. *Pediatr. Res.* 2021. № 89. P. 1771–1779. doi: 10.1038/s41390-020-01138-2

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

50. Mohankumar K. 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>

B. Pospelov, DSc, Professor, Chief Researcher of the Department
E. Rybka, DSc, Professor, Deputy Head of the Center – Head of the 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 the Department
P. Borodych, Associate Professor, Associate Professor of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

FEATURES OF THE AVERAGE BIHOHERENTITY OF THE DYNAMICS OF THE PARAMETERS OF THE GAS ENVIRONMENT AT THE APPEARANCE OF FIRE

The object of the study is the dangerous parameters of the gas environment during the ignition of materials in the premises. The importance of such research is related to the possibility of using the average bicoherence measure to detect fires and prevent emergency situations due to fire. The measure of the average bicoherence of arbitrary dangerous parameters of the gas environment on a free time interval is substantiated. Experimentally studied features of the average bicoherence measure of the frequency components of the spectrum of the main dangerous parameters of the gas environment in the model chamber at the intervals of reliable absence and presence of ignition of typical ignition materials. The results show that the dynamics of the dangerous parameters of the gas environment in the chamber at the intervals of the absence and presence of fires has a complex non-linear nature. It was established that the difference in the average bicoherence measure for the frequency components in the spectrum of changes in the hazardous parameters of the gas environment in the presence and absence of fires has a different and individual character. It is noted that the individual characteristics of the average bicoherence measure can act as a possible sign for the detection of fires. It was found that the maximum value of the measure equal to 1.0 for all frequency indices occurs before the ignition of alcohol and paper. Before the ignition of wood and textiles, the values of the frequency index measures are random and range from 0.4 to 0.8. It was established that the ignition of materials leads to the loss of the initial third-order relationships between the frequency components in the spectra. This makes it possible to consider the specified loss of connections as a general sign of fire detection by calculating the proposed measure of average bicoherence of hazardous parameters of the gas environment in the premises.

Keywords: measure, average bicoherence, change of dangerous parameters, gas medium, ignition of material

References

1. Vambol, S., Vambol, V., Sychikova, Y., Deyneko, N. (2017). Analysis of the ways to provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10(85)), 27–36. doi: 10.15587/1729-4061.2017.85847
2. Semko, A., Rusanova, O., Kazak, O., Beskrovnyaya, M., Vinogradov, S., Gricina, I. (2015). The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. *The International Journal of Multiphysics*, 9(1), 9–20. doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9
3. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D., Sobyna, V. et al. (2018). Conceptual Approaches for Development of Informational and Analytical Expert System for Assessing the NPP impact on the Environment. *Nuclear and Radiation Safety*, 3(79), 56–65. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).09
4. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Popov, V., Semkiv, O. (2018). Development of the method of frequencytemporal representation of fluctuations of gaseous

medium parameters at fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (92)), 44–49. doi: 10.15587/1729-4061.2018.125926

5. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2017). Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10 (90)), 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114504

6. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., Hurkovskiy, V., Nikolaiev, K., Yatsyshyn T., Dimitrieva, 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

7. Vambol, V., Vambol, S., Kondratenko, O., Koloskov, V., Suchikova, Y. (2018). Substantiation of expedience of application of high-temperature utilization of used tires for liquefied methane production. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 87(2), 77–84. doi: 10.5604/01.3001.0012.2830

8. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finelydispersed water. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (92)), 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

9. Otrosh, Y., Rybka, Y., Danilin, O., Zhuravskiy, M. (2019). Assessment of the technical state and the possibility of its control for the further safe operation of building structures of mining facilities. *E3S Web of Conferences*, 123, 01012. doi: 10.1051/e3sconf/201912301012

10. 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

11. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Krainiukov, O., Maksymenko, N., Meleshchenko, R. et al. (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. 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

13. 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

14. Rybalova, O., Artemiev, S., Sarapina, M., Tsymbal, B., Bakhareva, A., Shestopalov, O., Filenko, O. (2018). Development of methods for estimating the environmental risk of degradation of the surface water state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (92)), 4–17. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127829

15. World Fire Statistics (2022), 27. CTIF, 65. Available at: https://www.ctif.org/sites/default/files/2022-08/CTIF_Report27_ESG.pdf

16. Kovalov, A., Otrosh, Y., Rybka, E., Kovalevska, T., Togobytska, V., Rolin, I.

(2020). Treatment of Determination Method for Strength Characteristics of Reinforcing Steel by Using Thread Cutting Method after Temperature Influence. *Materials Science Forum*, 1006, 179–184. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.179

17. 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: 10.15587/1729-4061.2021.226692

18. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E. (2017). Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(9 (86)), 32–37. doi: 10.15587/1729-4061.2017.96694

19. 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

20. Cheng, C., Sun, F., Zhou, X. (2011). One fire detection method using neural networks. *Tsinghua Science and Technology*, 16(1), 31–35. doi: 10.1016/s1007-0214(11)70005-0

21. Ding, Q., Peng, Z., Liu, T., Tong, Q. (2014). Multi-Sensor Building Fire Alarm System with Information Fusion Technology Based on D-S Evidence Theory. *Algorithms*, 7(4), 523–537. doi: 10.3390/a7040523

22. Wu, Y., Harada, T. (2004). Study on the Burning Behaviour of Plantation Wood. *Scientia Silvae Sinicae*, 40, 131–136.

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., 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: 10.15587/1729-4061.2019.187252

31. 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

32. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Krainiukov, O., Harbuz, S., Bezuhla, Y. et al. (2020). Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10(104)), 6–12. doi: 10.15587/1729-4061.2020.200140

33. Floyd, J., Forney, G., Hostikka, S., Korhonen, T., McDermott, R., McGrattan, K. (2013). *Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's Guide*. Vol. 1. National Institute of Standard and Technology.

34. 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

35. Heskestad, G., Newman, J. S. (1992). Fire detection using cross-correlations of sensor signals. *Fire Safety Journal*, 18(4), 355–374. doi: 10.1016/0379-7112(92)90024-7

36. 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.

37. 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

38. Pospelov, B., Rybka, E., Savchenko, A., Dashkovska, O., Harbuz, S., Naden, E. et al. (2022). Peculiarities of amplitude spectra of the third order for the early detection of indoor fires. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10(119)), 49–56. doi: 10.15587/1729-4061.2022.265781

39. Pospelov, B., Bezuhla, Y., Yashchenko, O., Khalmuradov, B., Petukhova, O., Gornostal, S. et al. (2022). Revealing the features of the third order phase spectrum of the main dangerous parameters of the gas medium. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10(120)), 63–70. doi: 10.15587/1729-4061.2022.268437

40. Passport. Spovishchuvach pozhezhnyi teplovyyi tochkovyyi. Arton. Available at: https://ua.arton.com.ua/files/passports/%D0%A2%D0%9F%D0%A2-4_UA.pdf

41. Passport. Spovishchuvach pozhezhnyi dymovyyi tochkovyyi optychnyi. Arton. Available at: https://ua.arton.com.ua/files/passports/spd-32_new_pas_ua.pdf

42. Optical/Heat Multisensor Detector (2019). Discovery. Available at: <https://www.nsc-hellas.gr/pdf/APOLLO/discovery/B02704-00%20Discovery%20Multisensor%20Heat-%20Optical.pdf>

43. Saeed, M., Alfatih, S. (2013). Nonlinearity detection in hydraulic machines

utilizing bispectral analysis. *TJ Mechanical engineering and machinery*, 13–21.

44. 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

45. Chua, K. C., Chandran, V., Acharya, U. R., Lim, C. M. (2010). Application of higher order statistics/spectra in biomedical signals – A review. *Medical Engineering & Physics*, 32(7), 679–689. doi: 10.1016/j.medengphy.2010.04.009

46. Chua, K. C., Chandran, V., Acharya, U. R., Lim, C. M. (2008). Cardiac state diagnosis using higher order spectra of heart rate variability. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 32(2), 145–155. doi: 10.1080/03091900601050862

47. 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*, 21(1177). doi: 10.3390/s21041177

48. Martín-Montero, A., Gutiérrez-Tobal, G. C., Kheirandish-Gozal, L., Jiménez-García, J., Álvarez, D., del Campo, F. et al. (2020). Heart rate variability spectrum characteristics in children with sleep apnea. *Pediatric Research*, 89(7), 1771–1779. doi: 10.1038/s41390-020-01138-2

49. Max, J. (1981). *Principes généraux et méthodes classiques*. Tome 1. Paris New York Barcelone Milan Mexico Rio de Janeiro, 311.

50. 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>

Надійшла до редколегії: 09.03.2024

Прийнята до друку: 17.04.2024