

УДК 621.03

Б. Б. Поспелов, д.т.н., професор, провідн. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-0957-3839)
Є. О. Рибка, д.т.н., ст. дослідник, заст. нач. центру – нач. відділу (ORCID 0000-0002-5396-5151)
М. О. Самойлов, ад'юнкт (ORCID 0000-0002-8924-7944)
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)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

СПЕКТРАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ДИНАМІКИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ФАКТОРІВ СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЗАГОРЯННЯХ У ПРИМІЩЕННЯХ

Досліджена спектральна щільність та амплітудний і фазовий спектри динаміки основних небезпечних факторів газового середовища при загорянні тестових матеріалів у лабораторній камері. Об'єктом дослідження є спектральні властивості динаміки небезпечних факторів газового середовища при загоряннях матеріалів. Основним предметом є спектральна щільність та пряме перетворення Фур'є щодо дискретних вимірювань небезпечних параметрів газового середовища на фіксованих інтервалах до загоряння та після загоряння матеріалу. Пряме дискретне перетворення Фур'є дозволяє визначати миттєві амплітудний та фазовий спектри для обраних фіксованих часових інтервалів. Це дозволяє досліджувати особливості миттєвих амплітуд та фаз гармонійних складових у спектрі нестационарної динаміки небезпечних параметрів газового середовища. Встановлено, що характер спектральної щільності та амплітудного спектра є малоінформативним з огляду виявлення загорань. Встановлено, що основний внесок в щільність та амплітудний спектр динаміки досліджуваних небезпечних параметрів газового середовища в камері вносять частотні складові діапазону 0–0,2 Гц. При цьому внесок в спектральну щільність і амплітудний спектр частотних складових понад 0,2 Гц значно зменшується із зростанням частоти. Виявлено, що більш інформативними та чутливими з погляду детектування загорань є використання прямого перетворення Фур'є щодо вимірюваних даних та застосування фазового спектру для високочастотних складових динаміки небезпечних параметрів газового середовища, що перевищують 0,2 Гц. Встановлено, що характер розкиду фаз для зазначених частотних складових у фазовому спектрі залежить від типу матеріалу загоряння. За характером розкиду фаз частотних складових можна не тільки виявляти загоряння матеріалів, але й розпізнавати тип матеріалу загоряння.

Ключові слова: загоряння матеріалів, газове середовище приміщень, амплітудний миттєвий спектр, фазовий миттєвий спектр

1. Вступ

Забезпечення безпеки та стійкості функціонування різних об'єктів на даний час набуває особливої уваги для будь-якої держави світу [1]. Це пов'язане з вирішенням загальної проблеми сталого розвитку держави і світової цивілізації загалом [2]. Найбільш важливими для вирішення цієї проблеми прийнято вважати різні небезпечні об'єкти [3]. Процес функціонування таких об'єктів пов'язаний з можливістю виникнення на них різних небезпечних подій [4]. Небезпечні події можуть бути на різних об'єктах виробничої і екологічної сфери [5] та виникати в різних соціально-економічних системах [6, 7]. Найбільш небезпечними та частими подіями на об'єктах виявляються пожежі у приміщеннях (ПП) [8]. ПП, зазвичай, завдають значної шкоди життю людини [9], власне об'єктам [10] та оточуючому навколишньому середовищу [11, 12]. Підвищення загального рівня ризику життю людини суттєво впливає на забезпечення стійкості розвитку цивілізації [13]. У зв'язку з цим запобігання ПП об'єктів слід розглядати як одну з актуальних проблем забезпечення сталого розвитку цивілізації.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У роботі [14] наголошується, що одним із конструктивних підходів до забезпечення стійкості функціонування об'єктів технічної сфери слід розглядати виявлення ПП на ранніх стадіях. При цьому в [15] акцент робиться на особливій складності використання динаміки різних небезпечних параметрів газового середовища (ГС). У роботі [15] йде річ про небезпечні параметри ГС, які обмежуються часовою областю, на якій вимірюються відповідними датчиками. Метод підвищення швидкодії датчиків небезпечних параметрів ГС при ПП запропоновано у [16]. Однак, метод обмежується схемними удосконаленнями існуючих датчиків і не торкається спектральних особливостей небезпечних параметрів ГС. Крім того, метод обмежується лише виміром температури ГС. В [17] досліджуються нестационарні характеристики небезпечних параметрів ГС.

Адаптивний метод виявлення загорянь в нестационарних умовах запропоновано в [18]. Однак, метод обмежується розглядом лише нестационарних енергетичних характеристик, а його дослідження особливостями процесу адаптації порогу в відповідних датчиках. Спектральні особливості небезпечних параметрів ГС приміщень при цьому не розглядаються та не досліджуються. Використанню одночасно кількох датчиків та застосуванню групової обробки даних на основі мережевих технологій для раннього виявлення загорянь присвячена робота [19]. Розвиток технології спільної обробки даних про динаміку двох або більше небезпечних параметрів ГС приміщень для підвищення надійності виявлення загоряння розглянуто в [20]. При цьому частина із зазначених технологій вже реалізована у стандартах EN та ISO [21–23]. Наприклад, в [21] реалізована технологія виявлення пожежі на основі комбінації датчиків чадного газу та температури ГС. Однак, технології обмежуються вимірюванням традиційних часових параметрів і не дозволяють виявляти ранні загоряння. В [22] розглядається технологія використання множини датчиків для виявлення ПП з функцією контролю стану датчиків. Однак, вказані технології не дозволяють надійно виявляти загоряння у приміщеннях, оскільки вони обмежуються виміром лише часових параметрів ГС. У стандарті ISO [23] розглядається технологія використання датчика чадного газу у поєднанні з одним або декількома тепловими датчиками для використання у системах пожежної сигналізації.

Однак, ця технологія не поширюється на спільне використання датчика чадного газу та тепла зі спеціальними характеристиками. З огляду на об'єктивне різноманіття та складність реальної динаміки небезпечних параметрів ГС приміщень при загораннях залишаються недостатньо вивченими особливості динаміки зазначених параметрів при загорянні матеріалів, що характеризуються різною швидкістю вигорання.

У цьому напрямку актуальними виявляються дослідження миттєвих амплітудних і фазових частотних спектрів динаміки небезпечних параметрів ГС приміщень на інтервалах часу відсутності та початку загоряння.

Для виявлення загорянь у приміщеннях використовуються різні типи датчиків диму [24]. Такі датчики мають високу швидкодію та мають відносно низьку вартість. Однак, для зазначених датчиків помилка виявлення загорянь суттєво залежить від температури ГС [25]. Тому для надійного виявлення загорянь, зазвичай, датчики газу [26] доповнюється датчиком температури [27]. При цьому нові типи датчиків виявлення пожежі поєднують у своєму складі

декілька датчиків [28]. Відомо, що для раннього виявлення загорянь важливими є особливості процесів піролізу різних горючих матеріалів. В роботі [29] досліджуються характеристики небезпечних чинників ГС при горінні плантаційної деревини.

В [30] досліджується вплив швидкості виділення тепла при спалюванні в різних умовах. Дослідженню швидкості виділення тепла при горінні деревини присвячено роботу [31]. Однак, у [31] дослідження обмежуються вивченням залежності між середньою швидкістю виділення тепла та інтенсивністю горіння. Швидкість виділення тепла при горінні органічного скла та кипарису досліджується в [32]. При цьому в [29–32] не досліджуються особливості миттєвих спектральних особливостей динаміки небезпечних параметрів ГС при піролізі різних горючих матеріалів у приміщенні. У роботах [33–36] розглядаються нові технології виявлення загорянь, що використовують різні фрактальні характеристики небезпечних параметрів ГС приміщень. Наприклад, у роботі [33] пропонується використовувати кореляційну розмірність щодо вектора стану небезпечних параметрів ГС приміщень. Дослідженню застосування рекурентних діаграм для концентрації оксиду вуглецю з метою виявлення загорянь у приміщеннях присвячено роботу [34].

Короткостроковому прогнозу пожежі на основі міри рекурентності щодо поточного вектора стану ГС приміщень та моделі Брауна нульового порядку присвячена робота [35]. Метод адаптивного обчислення рекурентних діаграм запропоновано в [36]. Однак, у зазначених роботах методи обмежуються лише розглядом часової області. При цьому спектральні особливості поточної динаміки небезпечних параметрів ГС при загорянні матеріалів у приміщеннях не розглядаються та не досліджуються.

Відомо, що найкращою зоною для виявлення загорянь є стельова область приміщень [37]. Тому для підвищення ефективності існуючих методів виявлення загорянь останнім часом відводиться особлива роль моделям динаміки небезпечних параметрів ГС у стельовій області приміщень [38]. Стохастичні моделі небезпечних параметрів ГС у зазначеній області приміщень та параметрах осередку загоряння з урахуванням його випадкових складових розглядаються в [39]. Однак, у [39] моделі динаміки небезпечних факторів ГС у стельовій області обмежуються лише часовою областю. Разом з цим у [38] зазначається, що багато з відомих моделей потребують всебічної перевірки експериментальними вогневими випробуваннями [40]. На основі вогневих випробувань встановлено, що урахування динаміки концентрації СО та щільності диму дозволяє досить надійно виявляти загоряння тестових вогнищ стандарту EN 54. Результати вогневих випробувань з урахуванням впливу різних випадкових факторів, що заважають виявляти загоряння, розглядаються в [41]. Зазначається, що урахування спільної динаміки концентрації СО та щільності диму ГС дозволяє надійно виявляти більшість осередків загорянь в умовах випадкових впливів. Результати експериментального дослідження взаємозв'язків між небезпечними параметрами ГС при загорянні матеріалів у приміщеннях наведено у [42]. Але результати дослідження обмежуються розглядом лише кореляційних зв'язків, що враховують лінійний зв'язок. Спектральні характеристики, що враховують складні типи зв'язків, при цьому не розглядаються та не досліджуються.

Таким чином, наведений аналіз свідчить про те, що недостатньо дослідженими виявляються спектральні особливості динаміки основних небезпечних па-
civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-35-3

раметрів ГС при загоряннях різних матеріалів у приміщеннях. Насамперед річ йде про відсутність результатів експериментального дослідження спектральних особливостей динаміки небезпечних параметрів ГС при загоряннях. У цьому аспекті важливою та невирішеною частиною розглянутої проблеми є експериментальне дослідження спектральних властивостей динаміки небезпечних параметрів ГС при загоряннях різних типів матеріалів у приміщеннях.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження спектральних властивостей динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища під час загоряння матеріалів у приміщеннях. На основі спектральних властивостей динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища в принципі може здійснюватися раннє виявлення загорянь та на цій основі попередження пожеж у приміщеннях.

Для досягнення мети роботи поставлені наступні завдання:

- виконати теоретичне обґрунтування щодо дослідження спектральних особливостей поточної динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища при загоряннях типових матеріалів;
- дослідити спектральну щільність та миттєві (амплітудний і фазовий) спектри щодо динаміки для основних небезпечних параметрів газового середовища при загоряннях тестових матеріалів у лабораторній камері.

4. Матеріали та методи дослідження

Експериментальні дослідження проводились у лабораторній камері [39], яка імітувала негерметичні приміщення. Об'єм лабораторної камери становив $0,524 \text{ м}^3$. У верхній частині камери на висоті $0,84 \text{ м}$ від її основи розміщувалися датчики вимірювання небезпечних досліджуваних параметрів ГС при загорянні тестових горючих матеріалів. В якості тестових горючих матеріалів розглядалися спирт, папір, деревина та текстиль. При підпалі висота полум'я для окремих тестових матеріалів не перевищувала $0,2 \text{ м}$ відносно основи камери. В експерименті небезпечні параметри ГС $x(k)$ у довільний момент часу k вимірювалися за допомогою теплового датчика ТПТ-4, оптичного датчика диму ДПП-3,2 та датчика CO (серії Discovery).

Виміряні значення небезпечних параметрів із виходів відповідних датчиків зберігалися у пам'яті комп'ютера. Розроблене програмне забезпечення дозволяло опитувати вказані датчики з довільним інтервалом часу. В експерименті опитування датчиків здійснювалось з інтервалом $0,1 \text{ с}$. Підпал тестових горючих матеріалів у камері проводився приблизно в момент часу t_{200} , що відповідає 20 с . Для дослідження спектральних особливостей динаміки небезпечних параметрів ГС, що вимірюються в камері, вибиралися два однакових інтервали часу, рівних 10 с . При цьому перший інтервал вибирався в проміжку між 10 с та 20 с . Цей інтервал відповідав відсутності загоряння тестового матеріалу. Другий інтервал вибирався у проміжку часу між 20 с та 30 с , який охоплював момент початку (приблизно 23 с) загоряння відповідного тестового матеріалу.

Дослідження спектральних властивостей динаміки небезпечних параметрів ГС на інтервалах відсутності та початку загоряння проводилося окремо для кожного тестового матеріалу в наступній послідовності: спирт, папір, деревина та текстиль. У ході експерименту основні дослідження спектральних властивостей бу-

ло направлено на спектральну щільність та миттєвий амплітудний і фазовий спектри динаміки небезпечних параметрів ГС у лабораторній камері. Для відновлення початкових умов ГС у камері після кожного загоряння тестового матеріалу здійснювалася вентиляція камери протягом 5–7 хвилин.

5. Теоретичне обґрунтування дослідження спектральних властивостей динаміки небезпечних параметрів газового середовища

Теоретичне обґрунтування дослідження спектральних особливостей ГС при загоряннях матеріалів базується на новому уявленні ГС приміщення у вигляді деякої складної динамічної системи. У середині даної системи знаходиться довільне джерело загоряння відповідного матеріалу. При цьому у разі загоряння матеріалу поточний стан ГС збурується. Ці збурення проявляються у відповідній зміні динаміки небезпечних параметрів ГС. Будемо вважати, що стан вказаної системи в довільний та фіксований момент часу характеризується заданою сукупністю значень небезпечних параметрів ГС. Нехай для визначеності в якості небезпечних параметрів ГС розглядаються середньооб'ємна температура, щільність диму та концентрація CO.

Дослідження стану динамічної системи у вигляді ГС приміщення може бути виконано у традиційній часовій або частотній області. Основна проблема щодо обґрунтування інструментарію дослідження обумовлюється нестационарним характером реальної динаміки небезпечних параметрів ГС при загоряннях матеріалів. В цьому сенсі більш інформативними слід вважати дослідження властивостей динаміки небезпечних параметрів ГС у частотній області, ніж у часовій. Відомо, що в частотній області дослідження спектральних властивостей процесів зазвичай призводять на основі двох функцій – спектральної щільності та спектральної характеристики (Фур'є – образу).

Кожна з вказаних функцій володіє різною інформаційною ємністю, точністю та обмеженнями їх застосування на практиці.

Спектральна щільність зазвичай обчислюється на основі перетворення Фур'є відповідної кореляційної функції. У цьому випадку спектральна щільність $S_{xx}(f)$ для довільного та заданого фіксованого інтервалу часу розміром N для дискретних вимірів $x(k)$, де $f, k=0, 1, \dots, N-1$, буде визначатися за виразом:

$$S_{xx}(f) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{xx}(k) \exp(-j2\pi f k / N) / N. \quad (1)$$

У виразі (1) функція $C_{xx}(k)$ визначає відповідну кореляційну функцію для довільної затримки k , яка обчислюється наступним чином:

$$C_{xx}(k) = \sum_{q=0}^{N-1-k} x(q)x(q+k) / (N-k). \quad (2)$$

Для дослідження спектральних особливостей поточної динаміки небезпечних параметрів ГС, крім (1), можна використовувати також і пряме перетворення Фур'є до фіксованого набору дискретних вимірювань динаміки небезпечного досліджуваного параметра ГС на інтервалах, де відсутнє та має місце загоряння матеріалу. Перевагою методу прямого перетворення Фур'є є можли-

вість обчислювати миттєвий спектр (амплітудний та фазовий) щодо динаміки безпосередньо для конкретного набору вимірювань. Миттєвий спектр відрізняється тим, що на відміну від спектральної щільності (1), дозволяє досліджувати амплітудний частотний склад для досліджуваного дискретного набору вимірювань та миттєвий фазовий спектр, що відповідає цим частотам. Вибираючи дискретний набір вимірювань для іншого часового інтервалу динаміки небезпечного параметра ГС, можна визначити миттєвий амплітудний частотний склад і фазовий спектр, що є характерними для цього поточного набору вимірювань. Це означає, що такий підхід дозволяє досліджувати спектральні особливості для довільної нестационарної динаміки небезпечних параметрів ГС при загоряннях тільки на основі дискретного набору вимірювань на інтервалі відповідно до та після загоряння матеріалу.

Операція обчислення прямого дискретного перетворення (ПДП) Фур'є зводиться до визначення середніх значень амплітуд і фаз дискретних гармонійних складових, що є характерними до конкретного дискретного набору вимірювань для досліджуваного інтервалу довільної динаміки небезпечних параметрів ГС. Так, для фіксованого дискретного розміру N набору вимірювань $x(k)$ миттєве ПДП Фур'є $X(f)$ можна представити у вигляді:

$$X(f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \exp(-j2\pi f k / N) / N, \quad (3)$$

де $x(k)$ – дискретний вимір у момент k для досліджуваного інтервалу динаміки довільного небезпечного параметра ГС.

З урахуванням (3) величина $|X(f)|$ буде визначати миттєвий амплітудний спектр (в одиницях виміру відповідного небезпечного параметра ГС) для дискретної частоти f , а величина $\arg[X(f)]$ – відповідний миттєвий фазовий спектр (у радіанах) для кожної дискретної частоти f . Таким чином, обґрунтована можливість дослідження спектральних особливостей динаміки небезпечних параметрів ГС на основі двох методів обчислень (1) та (3).

6. Результати дослідження амплітудного та фазового спектрів динаміки небезпечних параметрів середовища

Відповідно до представлень (1) та (3) виконано експериментальні дослідження спектральних особливостей динаміки небезпечних параметрів ГС на фіксованих інтервалах часу, що відповідають відсутності та появи загоряння різних типів тестового матеріалу. Результати цих досліджень представлені нижче. При дослідженнях кожної дискретної частоти f в (1) та (3) відповідала кругова дискретна частота m (Hz), яка визначалась величиною $f * 10 / (N)$.

В якості прикладу на рис. 1 наведені спектральна щільність (в одиницях квадрата виміру небезпечного параметра ГС) та відповідний розподіл фаз (в радіанах) частот, що обчислені на основі кореляційної функції на інтервалах відсутності та наявності загоряння спирту. Даний тип тестового матеріалу обрано в якості ілюстрації стрибкоподібного загоряння тестового матеріалу. На рис. 1 наведені вказані вище спектральні характеристики для динаміки середньооб'ємної температури, концентрації СО та щільності диму ГС у лабораторній камері на фіксованих інтервалах вимірювання до та після загоряння спирту.

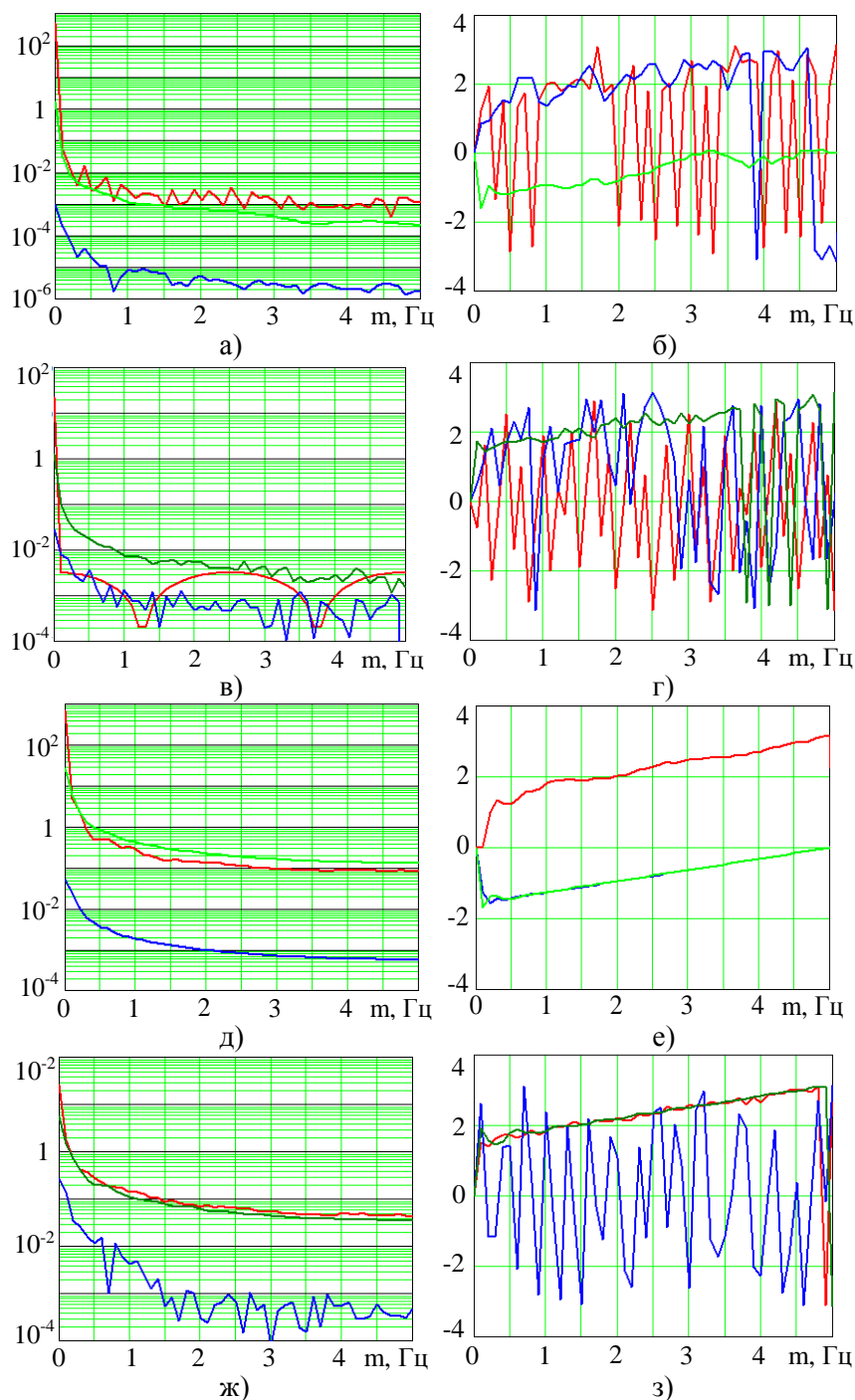


Рис. 1. Спектральні властивості динаміки небезпечних параметрів газового середовища камери до та після загоряння спирту: а – спектральна щільність (1) при відсутності загоряння; б – фазовий розподіл частот для обчислення (1) при відсутності загоряння; в – амплітудний спектр (3) при відсутності загоряння; г – фазовий спектр (3) при відсутності загоряння; д – спектральна щільність (1) на інтервалі початку загоряння; е – фазовий розподіл частот для обчислення (1) на інтервалі початку загоряння; ж – амплітудний спектр (3) на інтервалі початку загоряння; з – фазовий спектр (3) на інтервалі початку загоряння

В якості ілюстрації другого характерного тестового матеріалу на рис. 2 наведені аналогічні спектральні характеристики для динаміки середньооб'ємної температури, концентрації CO та щільності диму ГС у лабораторній камері на фіксованих інтервалах вимірювання до та після загоряння текстилю. Текстиль обрано в якості ілюстрації тестового матеріалу з низкою швидкістю загоряння.

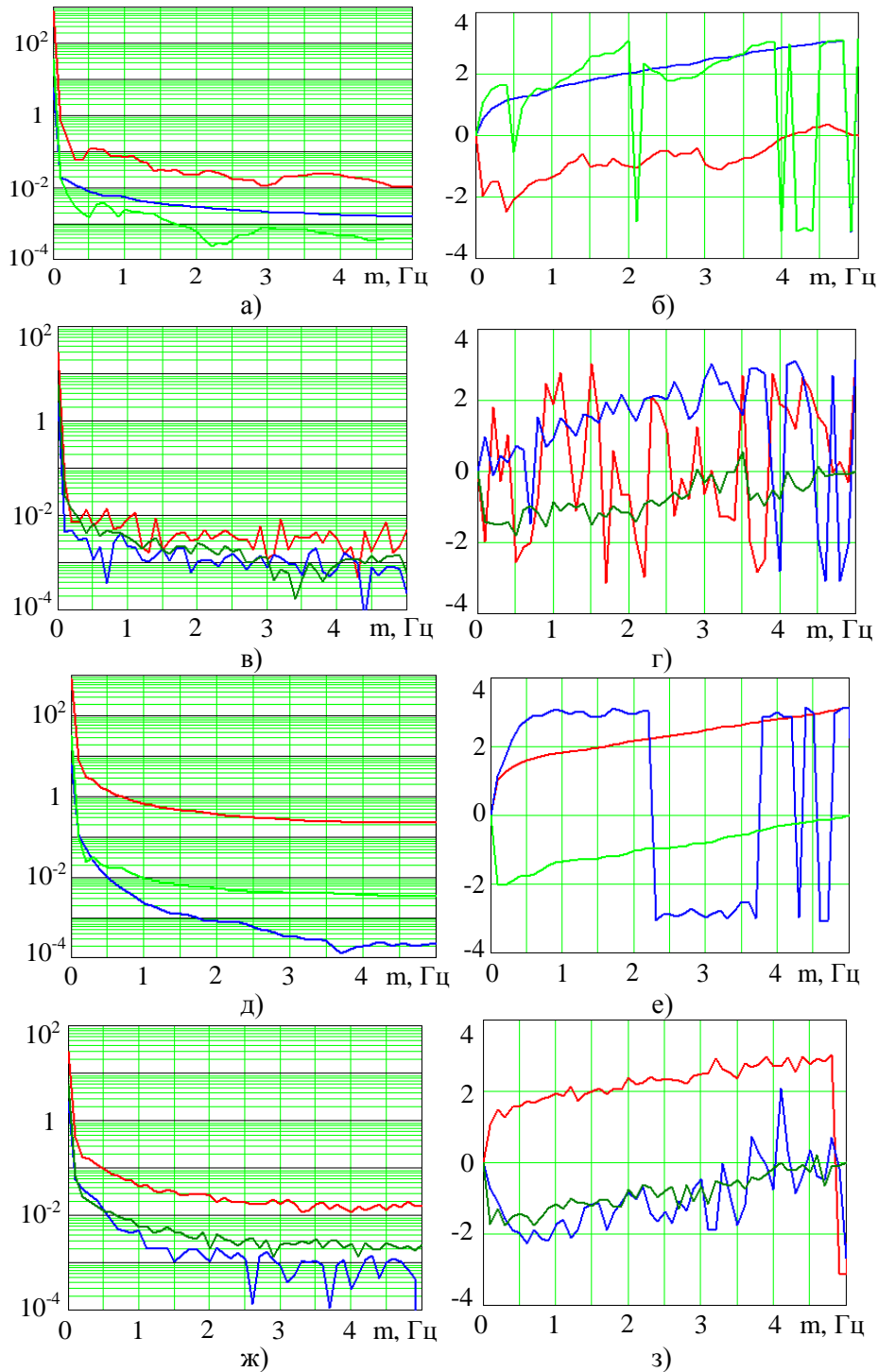


Рис. 2. Спектральні властивості динаміки небезпечних параметрів газового середовища камери до та після загоряння текстилю: а – спектральна щільність (1) при відсутності загоряння; б – фазовий розподіл частот для обчислення (1) при відсутності загоряння; в – амплітудний спектр (3) при відсутності загоряння; г – фазовий спектр (3) при відсутності загоряння; д – спектральна щільність (1) на інтервалі початку загоряння; е – фазовий розподіл частот для обчислення (1) на інтервалі початку загоряння; ж – амплітудний спектр (3) на інтервалі початку загоряння; з – фазовий спектр (3) на інтервалі початку загоряння

На рис. 1 та рис. 2 червоним кольором позначені відповідні спектральна щільність та розподіл фаз для обчислення (1) та амплітудні та фазові спектри (3) динаміки середньооб'ємної температури, синім кольором – динаміки концентрації

CO, а зеленим кольором – динаміки щільності диму ГС в експериментальній камері для спирту та текстилю.

7. Обговорення результатів дослідження спектральних особливостей газового середовища при загорянні матеріалів

З аналізу даних на рис. 1–2 випливає, що спектральна щільність та амплітудний спектр динаміки досліджуваних небезпечних параметрів ГС у камері виявляються малоінформативними з точки зору виявлення загорянь та попередження про пожежу у приміщеннях. Пояснюється це схожістю спектральної щільності та амплітудних спектрів. І спектральна щільність і амплітудні спектри свідчать про перевагу низькочастотних складових, включаючи складову з нульовою частотою. Так, наприклад, основний внесок в спектральну щільність та амплітудний спектр динаміки досліджуваних небезпечних параметрів ГС в камері вносять частотні складові діапазону 0–0,2 Гц.

При цьому спектральна щільність та амплітуда частотних складових понад 0,2 Гц зменшується зі збільшенням величини частоти складових. Крім того результати свідчать про те, що більш інформативними з точки зору виявлення та чутливими до моменту появи загорянь виявляються фазовий розподіл обчислення (1) та фазовий спектр (3) динаміки небезпечних параметрів ГС. Наприклад, фазовий розподіл для частотних складових до 5 Гц у разі відсутності загоряння є суттєво неоднорідним. Неоднорідність значень фаз частотних складових динаміки досліджуваних небезпечних параметрів ГС є випадковою та може змінюватися приблизно від -130°C до $+130^\circ\text{C}$. При цьому у разі загоряння матеріалу випадковий розкид фаз для частотних складових динаміки більшості досліджуваних небезпечних параметрів ГС зменшується (рис. 1 е, з та рис. 2 е, з). Наприклад, при загорянні спирту випадковий розкид фаз частотних складових обчислення (1) суттєво зменшується для динаміки середньооб'ємної температури, щільності диму та концентрації CO (рис. 1 е). Однак, для (3) розкид фаз для диму випадковий характер залишається значним (рис. 1 з). Для загоряння текстилю випадкове розкидання фаз частотних складових суттєво зменшується для всіх досліджуваних параметрів ГС (рис. 2 е, з). Разом з тим розкид фаз залишається значним у випадку обчислення (1). При цьому знак максимальних значень фаз частотних складових при цьому виявляється різним та залежить від досліджуваного небезпечного параметра ГС. Так, наприклад, для динаміки середньооб'ємної температури знак максимальних значень фази виявляється позитивним, а для динаміки концентрації та щільності диму – негативним.

Таким чином, результати проведених експериментальних досліджень свідчать про переваги використання для виявлення загорянь обчислення (3) у порівнянні з обчисленням (1). Крім того для (3) характер випадкового розкиду фаз частотних складових динаміки небезпечних параметрів ГС залежить від типу матеріалу загоряння. Це означає, що за характером нерівномірності фазового спектру (3) динаміки небезпечних параметрів ГС у принципі можна як виявляти загоряння у приміщеннях, так і розпізнавати тип матеріалу загоряння. Однак, слід зазначити, що використання спектрального підходу, що розглядається, не дозволяє отримати інформацію про час появи конкретних частотних складових спектру (щільності, амплітуд і фаз).

Тому, спектральний підхід не забезпечує часову локалізацію появи загорянь, яка є важливим показником щодо попередження та ліквідації пожеж. При цьому, момент часу загоряння при спектральному підході, що розглядається, визначається лише часовим положенням інтервалу вибірки даних для досліджуваного небезпечного параметра ГС. Слід зауважити, що точність обчислення щільності, амплітуд і фаз).....

літудного і фазового спектрів залежить від розміру вимірюваної вибірки. При цьому, чим більше розмір вибірки даних, тим точніше обчислюються зазначені миттєві спектри та спектральна щільність. Наприклад, в експерименті розмір вибірки має 100 відлік, які слідує з інтервалом 0,1 с. Це означає, що інтервал часу експерименту становив 10 с. Тому, отримані результати дослідження спектральних особливостей динаміки небезпечних параметрів ГС дозволяють виявляти зміну спектрального складу динаміки тільки з точністю часового положення фіксованих інтервалів часу вибірки даних. Оскільки інтервал часу вибірки складає 10 с, тому для роздільна здатність за частотою відповідає величині 0,1 Гц. Перевага даного дослідження полягає в новизні та оригінальності результатів, пов'язаних зі спектральними особливостями динаміки небезпечних параметрів ГС та можливості їх використання для раннього виявлення загорянь та попередження ГПП.

8. Висновки

1. Виконано теоретичне обґрунтування проведення досліджень спектральних особливостей динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища при загорянні матеріалів. Основними підходами є обчислення спектральної щільності, що базується на обчисленні дискретного перетворення Фур'є для кореляційної функції, а також на обчисленні прямого дискретного перетворення Фур'є для дискретних вимірювань інтервалів досліджуваної динаміки небезпечних параметрів газового середовища на фіксованих інтервалах до та після загоряння матеріалу. При такому підході пряме дискретне та перетворення Фур'є дозволяє визначати миттєві амплітудний та фазовий спектри для обраних фіксованих часових інтервалів. Це дозволяє досліджувати особливості розподілу миттєвих амплітуд та фаз гармонійних складових у спектрі динаміки небезпечних параметрів газового середовища для нестационарної динаміки небезпечних параметрів.

2. Досліджені спектральна щільність, амплітудний та фазовий спектри динаміки основних небезпечних факторів газового середовища при загорянні тестових матеріалів у лабораторній камері. Отримано, що характер спектральної щільності та амплітудного спектра виявляється малоінформативним з погляду виявлення загорянь та недостатньо чутливим до появи загорянь. Спектральна щільність та амплітудні спектри характеризуються переважним складом низькочастотних складових, включаючи нульову частотну складову. Встановлено, що основний внесок в щільність та амплітудний спектр динаміки досліджуваних небезпечних параметрів газового середовища в камері вносять частотні складові діапазону 0–0,2 Гц. При цьому внесок в спектральну щільність і амплітудний спектр частотних складових понад 0,2 Гц значно зменшується із зростанням частоти. Встановлено, що більш інформативними та чутливими з погляду виявлення загорянь виявляється підхід, заснований на використанні прямого перетворення Фур'є щодо вимірюваних даних та застосування фазового спектру для високочастотних складових динаміки небезпечних параметрів газового середовища. Інформативним для фазового спектра є характер випадкового розкиду фаз частотних складових, що перевищують 0,2 Гц. При цьому характер розкиду фаз для зазначених частотних складових у фазовому спектрі залежить від типу матеріалу загоряння. Показано, що за характером розподілу фаз частотних складових спектру можна не тільки виявляти загоряння на ранніх стадіях та попереджати про пожежу в приміщеннях, але й взагалі розпізнавати тип матеріалу загоряння.

Однак, результатами досліджень встановлено, що фазовий спектр динаміки небезпечних параметрів газового середовища при загоряннях не дозволяє здійснювати локалізацію загоряння в часі. В цьому дослідженні часова локалізація загорянь визначалась часовим положенням поточної вибірки щодо вимірювань. За-

значається, що при цьому точність обчислення амплітудного та фазового спектрів визначається заданим розміром поточної вибірки щодо вимірів небезпечних параметрів газового середовища.

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. *EEJET*. 2017. Vol. 6. № 10–90. P. 57–64. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118213
2. Tan P., Steinbach M., Kumar V. *Introduction to Data Mining*. Addison Wesley, 2005. 864 p. URL: <https://www-users.cse.umn.edu/~kumar001/dmbook/index.php>
3. Semko A. N., Beskrovnaya M. V., Vinogradov S. A., Hritsina I. N., Yagudina N. I. The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2014. Vol. 52(3). P. 655–664. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/279295>
4. Andronov V., Pospelov B., Rybka E., Skliarov S. Examining the learning fire detectors under real conditions of application. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3/9(87). P. 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101985>
5. Mygalenko K., Nuyanzin V., Zemlianskyi A., Dominik A. 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
6. Vambol S., Vambol V., Sobyňa V., Koloskov V., Poberezhna L. Investigation of the energy efficiency of waste utilization technology, with considering the use of low-temperature separation of the resulting gas mixtures. *Energetika*. 2018. Vol. 64. №4. P. 186–195. URL: <http://29yjmo6.257.cz/bitstream/123456789/8734/1/document.pdf>
7. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Improving the installation for fire extinguishing with finelydispersed water. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2/10(92). P. 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865
8. Kovalov A., Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk 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. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>
9. Reproduced with permission from fire loss in the United States during 2019. National Fire Protection Association. 2020. 11 p. URL: www.nfpa.org
10. Otrosh Yu., Semkiv O., 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. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012065/pdf>
11. Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*. 2018. Vol. 37, № 1. P. 63–77. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6849>
12. 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. URL: <http://vhht.dp.ua/wp-content/uploads/pdf/2019/1/Kustov.pdf>

13. 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

14. V. Sadkovyi, E. Rybka, Yu. Otrosh and others. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures: monograph. Kharkiv: PC TC, 2021. 180 p. doi: 10.15587/978-617-7319-43-5

15. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Samoilo M., Krainiukov O., Biryukov I., Butenko T., Bezuhla Yu., Karpets K., Kochanov E. Development of the method of operational forecasting of fire in the premises of objects under real conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise*. 2021. Vol. 2/10(110). P. 43–50. doi: 10.15587/1729-4061.2021.226692

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

17. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4/9(88). P. 53–59. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108448

18. 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

19. 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

20. 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. URL: <https://doi.org/10.3390/a7040523>

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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. URL: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=200902239962971258

25. 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.

26. 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. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2008.917124>

27. Skinner A. J., Lambert M. F. Using smart sensor strings for continuous

monitoring of temperature stratification in large water bodies. *IEEE Sensors J.* 2006. № 6. P. 1473–1481. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2006.881373>

28. Cheon J., Lee J., Lee I., Chae Y., Yoo Y., Han G. A single-chip CMOS smoke and temperature sensor for an intelligent fire detector. *IEEE Sens. J.* 2009. № 9. P. 914–920. URL: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2024703>

29. Wu Y., Harada T. Study on the Burning Behaviour of Plantation Wood. *Scientia Silvae Sinicae.* 2004. № 40. P. 131. doi: 10.11707/j.1001-7488.20040223

30. Zhang D., Xue W. Effect of Heat Radiation on Combustion Heat Release Rate of Larch. *Journal of West China Forestry Science.* 2010. № 39. P. 148. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.133>

31. 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. doi: 10.15587/1729-4061.2018.122419

32. Peng X., Liu S., Lu G. Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. *Journal of Chongqing University.* 2005. № 28. P. 122. doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.133

33. 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. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7483>

34. 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

35. 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.* 2021. Vol. 3/10(111). P. 27–33. doi: 10.15587/1729-4061.2021.233606

36. B. Pospelov, E. Rybka, V. Togobytska, R. Meleshchenko, Yu. Danchenko. 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. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176579>

37. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide.* National Institute of Standards and Technology. 2016. Vol. 3. 6th ed. URL: https://www.fse-italia.eu/PDF/ManualiFDS/FDS_Validation_Guide.pdf

38. 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. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=913619

39. Полстянkin P. M., Поспелов B. B. Стохастические модели опасных факторов и параметров очага загорания в помещениях. *Проблемы пожарной безопасности.* 2015. Вып. 38. С. 130–135.

40. Heskestad G., Newman J. S. Fire Detection Using Cross-Correlations of Sensor Signals. *Fire Safety J.* 1992. Vol. 18. № 4. P. 355–374. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117789>

41. Gottuk D. T., Wright M. T., Wong J. T., Pham H. V., Rose-Pehrsson S. L., Hart S., Hammond M., Williams F. W., Tatem P. A., Street T. T. Prototype Early

Warning Fire Detection Systems: Test Series 4 Results. NRL/MR/6180-02-8602, Naval Research Laboratory, February 15, 2002. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA399480.pdf>

42. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S., Shcherbak S. Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6/10(90). P. 50–56. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117789>

B. Pospelov, DSc, Professor, Chief Researcher of the Department

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

M. Samoylov, Adjunct

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

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

SPECTRAL PROPERTIES OF THE DYNAMICS OF DANGEROUS ENVIRONMENTAL FACTORS DURING INDOOR FIRES

The spectral density and amplitude and phase spectra of the dynamics of the main dangerous factors of the gas environment during the ignition of test materials in a laboratory chamber were investigated. The object of the study is the spectral properties of the dynamics of dangerous factors of the gas environment during the ignition of materials. The main subject is the spectral density and the direct Fourier transform of discrete measurements of hazardous parameters of the gas environment at fixed intervals before and after the ignition of the material. The direct discrete Fourier transform allows determining the instantaneous amplitude and phase spectra for selected fixed time intervals. This makes it possible to study the peculiarities of instantaneous amplitudes and phases of harmonic components in the spectrum of non-stationary dynamics of dangerous parameters of the gas environment. It was established that the nature of the spectral density and amplitude spectrum is uninformative from the point of view of fire detection. It was established that the main contribution to the density and amplitude spectrum of the dynamics of the investigated hazardous parameters of the gas environment in the chamber is made by frequency components in the range of 0–0,2 Hz. At the same time, the contribution to the spectral density and amplitude spectrum of frequency components above 0,2 Hz decreases significantly with increasing frequency. It was found that the use of the direct Fourier transformation of the measured data and the use of the phase spectrum for the high-frequency components of the dynamics of the hazardous parameters of the gas environment exceeding 0,2 Hz are more informative and sensitive from the point of view of detecting fires. It was established that the nature of the phase spread for the specified frequency components in the phase spectrum depends on the type of ignition material. By the nature of the phase spread of the frequency components, it is possible not only to detect ignition, but also to recognize the type of ignition material.

Keywords: ignition of materials, gaseous indoor environment, amplitude instantaneous spectrum, phase instantaneous spectrum

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. EEJET, 6/10(90), 57–64. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118213

2. Tan, P., Steinbach, M., Kumar, V. (2005). Introduction to Data Mining. Addison Wesley, 864. URL: <https://www-users.cse.umn.edu/~kumar001/dmbook/index.php>

3. Semko, A. N., Beskrovnaya, M. V., Vinogradov, S. A., Hritsina, I. N., Yagudina, N. I. (2014). The usage of highspeed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 52(3), 655–664. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/279295>

4. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Examining the

learning fire detectors under real conditions of application. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (9 (87)), 53–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101985>

5. 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](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121727)

6. Vambol, S., Vambol, V., Sobyna, V., Koloskov, V., Poberezhna, L. (2018). Investigation of the energy efficiency of waste utilization technology, with considering the use of low-temperature separation of the resulting gas mixtures. *Energetika*, 64, 4, 186–195. URL: <http://29yjmo6.257.cz/bitstream/123456789/8734/1/document.pdf>

7. 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*, 2/92(10), 38–43. doi: [10.15587/1729-4061.2018.127865](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127865)

8. Kovalov, A., Otrosh, Y., Ostroverkh, O., Hrushovinchuk, O. (2018). Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*, 60, 00003. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>

9. (2020). Reproduced with permission from fire loss in the United States during 2019. National Fire Protection Association, 11. URL: www.nfpa.org

10. Otrosh, Yu., Semkiv, O., 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. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012065/pdf>

11. Dadashov, I., Loboichenko, V., Kireev, A. (2018). Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*, 37 (1), 63–77. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6849>

12. 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. URL: <http://vhht.dp.ua/wp-content/uploads/pdf/2019/1/Kustov.pdf>

13. 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. *EEJET*, 4/10 (106), 37–44. doi: [10.15587/1729-4061.2020.210059](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210059)

14. Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. and others. (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. *PC TECHNOLOGY CENTER*, 180. doi: [10.15587/978-617-7319-43-5](https://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5)

15. 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*, 2/10 (110), 43–50. doi: [10.15587/1729-4061.2021.226692](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.226692)

16. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E. (2017). Development of a method to
civil security. DOI: [10.52363/2524-0226-2022-35-3](https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-35-3)

improve the performance speed of maximal fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (86)), 32–37. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96694>

17. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (9 (88)), 53–59. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108448

18. 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

19. Caixia, C., Fuchun, S., Xinquan, Z. (2011). One Fire Detection Method Using Neural Networks. *Tsinghua Science and Technology*, 16(1), 31–35. doi: 10.1016/S1007-0214(11)70005-0

20. 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, 523–537. URL: <https://doi.org/10.3390/a7040523>

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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. 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.

25. 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. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2008.917124>

26. Skinner, A. J., Lambert, M. F. (2006). Using smart sensor strings for continuous monitoring of temperature stratification in large water bodies. *IEEE Sensors J.*, 6, 1473–1481. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2006.881373>

27. Cheon, J., Lee, J., Lee, I., Chae, Y., Yoo, Y., Han, G. (2009). A single-chip CMOS smoke and temperature sensor for an intelligent fire detector. *IEEE Sens. J.*, 9, 914–920. URL: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2024703>

28. Wu, Y., Harada, T. (2004). Study on the Burning Behaviour of Plantation Wood. *Scientia Silvae Sinicae*, 40, 131. doi: 10.11707/j.1001-7488.20040223

29. Zhang, D., Xue, W. (2010). Effect of Heat Radiation on Combustion Heat Release Rate of Larch. *Journal of West China Forestry Science*, 39, 148. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.133>

30. 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. doi: 10.15587/1729-4061.2018.122419

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

10.1016/j.proeng.2013.08.133

32. 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. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7483>

33. 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

34. 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

35. 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. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176579>

36. McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. (2016). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*. National Institute of Standards and Technology, 3, 6th ed. URL: https://www.fse-italia.eu/PDF/ManualiFDS/FDS_Validation_Guide.pdf

37. Floyd, J., Forney, G., Hostikka, S., Korhonen, T., McDermott, R., McGrattan, K. (2013). *Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's Guide*. National Institute of Standard and Technology, 1, 1st ed. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=913619

38. Polstyankin, R. M., Pospelov, B. B. (2015). Stokhastychni modeli nebezpechnykh faktoriv ta parametriv vohnyshcha v prymishchennyakh. *Problemy pozhezhnoyi bezpeky*, 38, 130–135.

39. Heskestad, G., Newman, J. S. (1992). Fire Detection Using Cross-Correlations of Sensor Signals. *Fire Safety J.*, 18, 4, 355–374. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117789>

40. 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, February 15. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA399480.pdf>

41. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S., Shcherbak, S. (2017). Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/10(90), 50–56. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117789>

Надійшла до редколегії: 18.04.2022

Прийнята до друку: 14.06.2022