

Тютюник Вадим Володимирович (доктор технічних наук, професор) ¹

Левтеров Олександр Антонович (доктор технічних наук, старший науковий співробітник) ¹

Тютюник Ольга Олександрівна (кандидат технічних наук, доцент) ²

Усачов Дмитро Володимирович ¹

¹ Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

² Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Харків, Україна

РОЗВИТОК НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ АКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ МАСШТАБНИХ ПОЖЕЖ ІЗ РІДКИМИ ОРГАНІЧНИМИ РЕЧОВИНАМИ НА ТЕРИТОРІЇ МІСТА

Сучасні міста являють собою складну, цілісну та динамічну систему, в якій взаємодіють люди, природа, економіка і суспільство, а також характеризуються просторовим та часовим розподілом параметрів життєдіяльності. Однак, міста у процесі свого функціонування та розвитку створюють передумови для виникнення різного роду небезпек, серед яких масштабні пожежі з рідкими органічними речовинами, які негативно впливають на стан природно-екологічного, економіко-технічного і соціально-політичного балансу на території міста і в регіоні, а також можуть завдати шкоди життєво важливим національним інтересам. З урахуванням цього, метою статті є розвиток науково-технічних основ створення геоінформаційної системи акустичного моніторингу масштабних пожеж із рідкими органічними речовинами як складової підсистеми Safe City в системі Smart City для достовірного виявлення та ідентифікації на території міста джерел масштабних пожеж із рідкими органічними речовинами. Під час проведення дослідження застосовано положення системного підходу, методи спектрального та фрактального аналізу. Зазначений методичний підхід дав змогу запропонувати системний підхід і принципи використання спектрального аналізу акустичного простору міста, що ґрунтуються на наукових дослідженнях ефекту акустичної емісії, спричиненого високотемпературним окисненням (горінням) рідких органічних речовин. У статті розроблені вимірювальна схема акустичного ефекту, алгоритм і програмне забезпечення для обробки характеристик прийнятого акустичного сигналу первинного (спалаху) та основного процесів горіння деяких рідких органічних речовин. Приймання та аналіз акустичного сигналу реалізовано шляхом перетворення сигналу у числовий ряд, з подальшим застосуванням методу R/S -аналізу для оцінки фрактальної структури часового ряду як сукупності фоновому сигналу та корисного акустичного сигналу, отриманого в процесі горіння рідкої органічної речовини. Наукова новизна полягає у встановленні залежності амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу від фізичних і фізико-хімічних термодинамічних параметрів процесу горіння деяких рідких органічних речовин. Ці залежності описані трендами від кількості атомів вуглецю у вуглецевих каркасах молекул органічних речовин та їх молярної маси. Також, методом акустичної емісії вивчено ефект «спалаху» парів рідких органічних речовин і встановлено однозначну залежність тривалості цього процесу від парціального тиску парів над чистим розчинником й температурою спалаху або займання. Відповідний рівень достовірності та надійності обробки результатів досліджень підтверджується розрахунками показників Херста і фрактальної розмірності. Теоретична значущість роботи для оборонної сфери полягає в розробці функціональної схеми системи наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору на території міста, ситуаційного центру, підсистеми зв'язку та передавання телеметричної інформації, а також підсистеми виконання антикризових рішень щодо запобігання, локалізації і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного, техногенного, соціального й воєнного характеру на території міста. Практична значущість отриманих результатів дослідження для сфери безпеки полягає в отриманні інформаційного матеріалу для бази даних запропонованої в роботі системи моніторингу, з метою достовірного виявлення та ідентифікації на території міста джерел масштабних пожеж із рідкими органічними речовинами.

Ключові слова: масштабна пожежа, процес високотемпературного окиснення, процес горіння, рідка органічна речовина, акустична емісія, амплітудно-частотний спектр, спектральний аналіз,

фрактальний аналіз, показник Херста, показник фрактальної розмірності, геоінформаційна система акустичного моніторингу, Safe City, Smart City.

Вступ

Сучасні міста являють собою складну, цілісну та динамічну систему, в якій взаємодіють люди, природа, економіка і суспільство, а також характеризуються просторовим та часовим розподілом параметрів життєдіяльності. Залежно від чисельності населення міста розділяються на невеликі, малі, середні, великі тощо, а за функціональним спрямуванням на промислові, транспортні, наукові, історичні та багатогалузеві. Складовими компонентами міста є такі елементи: територія з власним ландшафтом, природними ресурсами та забудовою, які формують міське середовище; населення, розділене на працездатну (трудова ресурси) та непрацездатну частину; сфера формування міста (підприємства промисловості, транспорту, будівництва тощо, незалежно від розміру і форми власності); сфера обслуговування або міське господарство, яке визначає життєзабезпечення міста (житло, транспорт, водопостачання, торгівля тощо); соціальна сфера, яка забезпечує здоров'я, допомагає соціально незахищеним, враховує духовні та інші нематеріальні потреби людей (освіта, наука, культура, охорона здоров'я, соціальна допомога, фізична культура, спорт, відпочинок, розваги тощо) [1–3].

Протилежною стороною життєдіяльності міста є те, що у процесі його функціонування та розвитку створюються передумови для виникнення ризиків, що негативно впливають на стан природно-екологічного, економіко-технічного та соціально-політичного балансу як на території міста, так і в регіоні. Крім того, міста можуть завдати шкоди життєвоважливим національним інтересам [4–10]. На сьогодні до небезпек зі значним рівнем соціальних та матеріальних збитків можна віднести масштабні пожежі з легкозаймистими речовинами до яких відносяться рідкі органічні речовини (далі – ОР). Останнім часом в різних місцях стали траплятися різноманітні надзвичайні ситуації (далі – НС), серед яких значна кількість вибухів та масштабних пожеж з ОР. Деякі з них включають:

вибух цистерни з легкозаймистою рідиною, що була частиною вантажного поїзда з 40 цистернами на залізничній станції «Шебелинка» в Харківській області. Цю пожежу оцінено як акт диверсії, проте вона не призвела до втрат життів або постраждалих, і рух залізничного транспорту не був припинений (січень 2015 року) [11];

пожежа на автозаправній станції (далі – АЗС) в місті Миколаїв, викликана ворожим обстрілом. Три мирні мешканці отримали смертельні поранення, але пожежу вдалося локалізувати на площі десять квадратних метрів (березень 2022 року) [12];

загоряння бензовозу у порту міста Рені в Одеській області. Одна людина загинула, а інша отримала серйозні опіки внаслідок цієї події (липень 2022 року) [13];

пожежа біля АЗС у Чернівцях. Згоріли бензовоз і три цистерни, пошкоджено адміністративне приміщення, а також травмована людина (серпень 2022 року) [14];

пожежа в місті Дніпрі на АЗС, в яку поцілила російська ракета. Пожежу локалізовано на площі 300 квадратних метрів, 2 особи загинуло, 2 осіб вдалося врятувати (жовтень 2022 року) [15];

пожежа, що сталася на АЗС та в гаражному кооперативі у місті Нікополь Дніпропетровської області, була наслідком атаки, яку здійснила росія. Унаслідок цього інциденту у місті було пошкоджено вісім житлових та комерційних будівель, кілька магазинів, меблева фабрика, готель, автобусна зупинка, газова мережа та система електропостачання (жовтень 2022 року) [16];

загоряння бензовозу на території нафтобази на Сарненщині Рівненської області. Поруч із транспортом знаходилися резервуари з паливом. Внаслідок пожежі, вогнем пошкоджені цистерна-напівпричіп та два резервуари з легкозаймистими речовинами (січень 2023 року) [17];

масштабна пожежа на АЗС «Мотто» у місті Бориспіль. На її території спалахнув бензовоз. У цистерні було 10 тисяч літрів пального (березень 2023 року) [18];

пожежа на АЗС у Новобаварському районі міста Харкова. Пожежа спалахнула коли російська федерація завдала ударів по місту. Вибухнула цистерна з газом. Поранених внаслідок вибуху та пожежі немає (квітень 2023 року) [19];

вибух бензовозу у Київській області, на автодорозі Харків–Київ. Внаслідок цього, водій втратив життя, а на місці події спалахнула велика пожежа (травень 2023 року) [20];

пожежа на АЗС у м. Київ спалахнула через наїзд автомобіля на пально-роздавальну колонку. На місці було виявлено трьох потерпілих. Площа займання склала 1500 квадратних метрів. Вогонь повністю знищив будівлю й наземне обладнання АЗС та 8 легкових авто (липень 2023 року) [21];

пожежа бензовозу та двох мікроавтобусів. Транспорт горів у селищі міського типу Немішаєве Київської області. Була загроза для розташованої поряд електростанції (жовтень 2023 року) [22];

потужний вибух на АЗС «ОККО» в Харкові. Вибух стався всередині авто, внаслідок чого виникла масштабна пожежа. Водія авто, всередині якого стався вибух, госпіталізовано. Персонал та інші клієнти не постраждали (листопад 2023 року) [23].

Один із способів підвищення ефективності безпеки в сучасних містах полягає у необхідності створення ситуаційних центрів в контексті концепції Smart City. Ці центри мають бути оснащені вдосконаленою геоінформаційною системою моніторингу території міста з метою

виявлення та ідентифікації джерел різноманітних небезпек [24–27].

Постановка проблеми. Забезпечення відповідного рівня безпеки життєдіяльності міста досягається шляхом створення в системі Smart City підсистеми Safe City, що спрямована на виявлення, запобігання, послаблення, усунення і відвернення загроз, здатних призвести до соціальних та екологічних збитків, а також завдати шкоду матеріальним та духовним цінностям, перешкоджаючи їх прогресивному розвитку [28].

Модель Safe City включає етапи реєстрації загроз для життєдіяльності міста, аналізу та систематизації інформації про ці загрози, формування бази даних, моделювання та прогнозування розвитку небезпек, оцінки рівня цих небезпек та ухвалення антикризових управлінських рішень. Також вона передбачає виконання прийнятих антикризових рішень.

Процес реєстрації загроз для життєдіяльності міста містить фінансовий аудит, моніторинг соціального стану та довкілля, відеоспостереження, радіаційний, хімічний та біологічний моніторинг, а також спектральний аналіз випромінювань від джерел небезпек. Спектральний аналіз випромінювань від джерел небезпек охоплює, згідно даних рис. 1, аналіз у акустичному, радіо, інфрачервоному, ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах, а також аналіз гамма та космічних променів.

Кожен метод спектрального аналізу випромінювань від джерел небезпек у різних частотних діапазонах має свої переваги та недоліки. У власних дослідженнях автори вирішили, зупинившись на спектральному аналізі

акустичного простору, для виявлення та ідентифікації джерел НС місцевого рівня, зокрема, масштабних пожеж із РОР. Реалізація спектрального аналізу акустичного простору міста, згідно з рис. 2, здійснюється за допомогою неперервного та тривалого в реальному масштабі часу оперативного моніторингу території міста.



Рисунок 1 – Спектральні характеристики випромінювань від джерел надзвичайних ситуацій

Зазначене досягається завдяки об'єднанню в систему моніторингу наземних автоматизованих пристроїв контролю акустичного простору та пасивної локації джерел небезпек. Отримання та обробка інформації від наземних пристроїв акустичного контролю здійснюється ситуаційним центром. Функціонування ситуаційного центру пов'язане з системою виконання антикризових рішень щодо запобігання та локалізації НС, а також ліквідації їх наслідків [29–31].

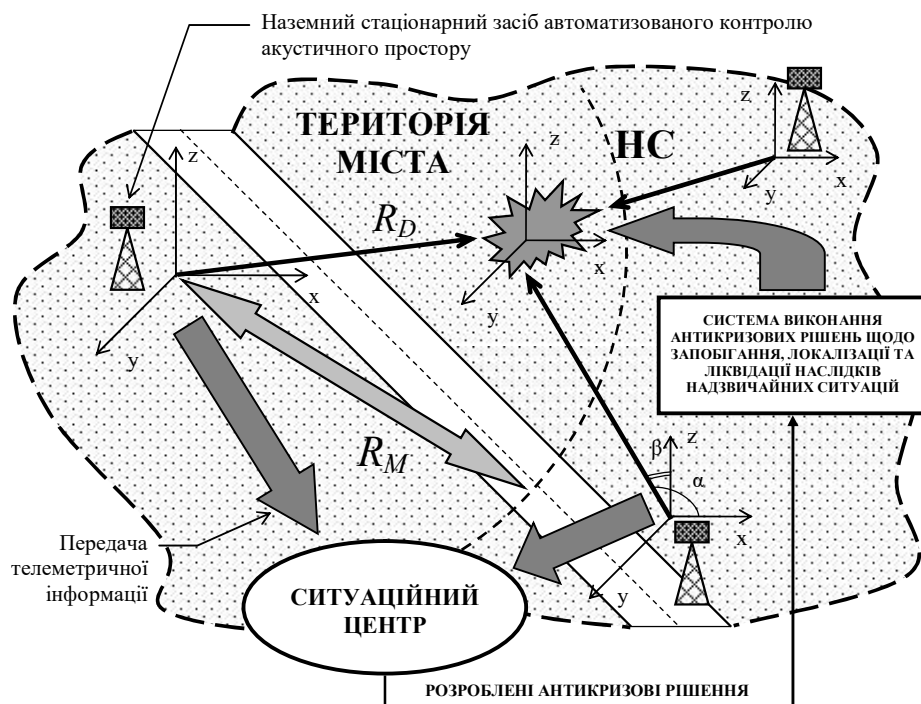


Рисунок 2 – Схема функціонування геоінформаційної системи моніторингу акустичного простору міста

Реалізація, наведеної на рис. 2, геоінформаційної системи моніторингу потребує розвитку наукових основ щодо автоматизованого виявлення та ідентифікації акустичних випромінювань від джерел різного роду небезпек. Дослідження ж особливостей технічної реалізації системи акустичного моніторингу масштабних пожеж з РОР на території міста визначають один з напрямів наших наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес горіння являє собою швидкий окислювально-відновний процес, де горюча речовина сполучається з окиснювачем, виділяючи

енергію та продукти розкладання [32]. На основі загальних закономірностей пожеж, зображених на рис. 3, можна виділити такі аспекти: горіння із виділенням тепла і продуктів повного та неповного згоряння; масообмін, що виникає в результаті конвекційних газових потоків на пожежі, які забезпечують надходження свіжого повітря в зону горіння та відведення продуктів горіння; передача тепла зоні горіння, яке витрачається на нагрів горючих речовин і будівельних конструкцій та сприяє самостійному розповсюдженню процесу горіння.

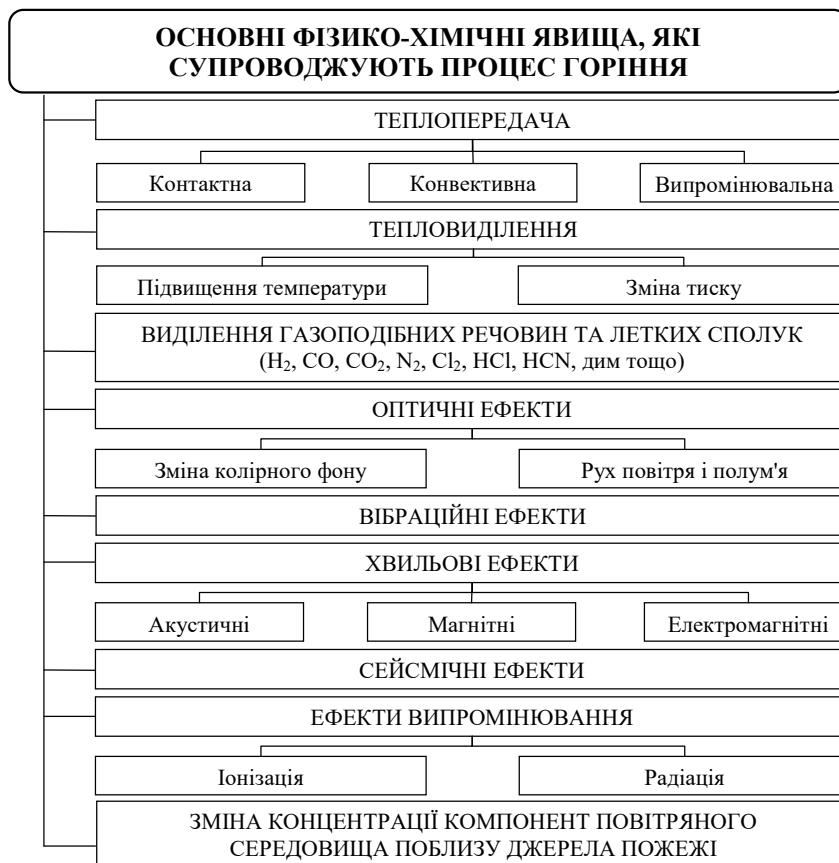


Рисунок 3 – Класифікація основних фізико-хімічних явищ, які супроводжують процес горіння

Впровадження режиму виявлення та ідентифікації джерел загорянь для ефективної протидії масштабним пожежам з різним рівнем небезпеки на території міста підкреслює важливість технічної реалізації нових фізико-технічних методів аналізу властивостей середовища загоряння. Ці методи спрямовані на практичне миттєвий контроль хвильових факторів небезпеки на етапі виникнення та прояву джерел загорянь.

Практичне значення методу контролю хвильових факторів виявляється у серії підтверджених спроб успішної технічної реалізації контролю пружних хвиль. Ці спроби були обумовлені локальною динамічною перебудовою внутрішньої структури матеріалів, відомої як акустична емісія. Метод застосовується для

діагностики тріщин у металах і сплавах на ранніх стадіях їх утворення, виявлення прихованих дефектів на етапі їх зародження, дослідження корозії металів під впливом напруги, а також аналізу кінетики розвитку тріщин у зварних швах. Крім того, цей метод використовується для дослідження акустичних властивостей середовищ, що перебувають у стані загоряння [33–36].

Для підтвердження зазначених уявлень слід відзначити, що наукові джерела [37–40] містять позитивні відомості про розширення сфери застосування методу акустичної емісії. У проведених експериментах вдалося визначити потенційні можливості цього методу для вивчення хімічних реакцій та фізико-хімічних процесів. Наприклад, для аналізу акустичної емісії, що виникає під час процесів у гомогенних

середовищах, досліджено процеси розчинення сірчаної кислоти та етилового спирту у воді. Внаслідок розчинення рідини в рідині були зафіксовані характерні акустичні сигнали. Виділено два ключові моменти, які є характерними для явища акустичної емісії в фізико-хімічних процесах: універсальний характер явища; імпульсний характер акустичної емісії, в ході хімічних реакцій та фізико-хімічних процесів, свідчить про те, що реакція відбувається в невеликому об'ємі і взаємодіє когерентно в часі на окремих ділянках системи, що вказує на колективний характер взаємодії субстратів.

Отримані висновки дали підстави розглядати можливість розробки пристрою для акустичного контролю на території міста під час масштабних пожеж з РОР. Основний принцип його функціонування полягає в аналізі характеристик акустичних коливань, які виникають від джерела загоряння внаслідок ефекту акустичної емісії, як хвильового чинника, що виявляється на різних етапах виникнення та розвитку пожежної небезпеки.

Отже, для підтримки цих тверджень, автори у дослідженнях [41–45] подали результати аналізу

амплітудно-частотних спектрів акустичної емісії під час горіння матеріалів, що містять целюлозу, таких як соснова деревина, бинт, картон, папір та вата. Отримані висновки свідчать про стабільну залежність амплітудно-частотних характеристик акустичної емісії під час горіння від природи та хімічного складу цих целюлозовмісних матеріалів.

Ураховуючи ці обставини **метою статті** є розвиток науково-технічних основ створення геоінформаційної системи автоматизованого контролю акустичного простору міста, як складової підсистеми Safe City в системі Smart City, для достовірного виявлення та ідентифікації на території міста джерел масштабних пожеж із рідкими органічними речовинами.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Досягнення означеної мети було реалізовано шляхом проведення досліджень щодо реєстрації спектрів акустичної емісії від осередків займання деяких РОР та аналізу, згідно даних рис. 4, впливу фізико-хімічних характеристик цих речовин на кінетику їх високотемпературного окиснення (горіння).



Рисунок 4 – Послідовність встановлення природи кінетичних ефектів високотемпературного окиснення (горіння) деяких рідких органічних речовин методом акустичної емісії

Враховуючи означене, завдання цього дослідження, згідно даних рис. 5, є такими [46]:

1. Визначення характеристичних піків ($A_m(f)$) амплітудно-частотної характеристики (далі – АЧХ) акустичного сигналу активного високотемпературного окиснювально-відновного процесу від кількості атомів вуглецю ($n(C)$) у вуглецевому каркасі молекули РОР та їх молярної маси (M).

2. Встановлення залежності амплітуди характеристичних піків ($A_m(f)$) АЧХ та фрактальної розмірності (D) прийнятого акустичного сигналу від динаміки згасання процесу горіння РОР у часі залежно від $n(C)$.

3. Оцінка початкового (τ_1) та кінцевого (τ_2) часу горіння первинної хмари парів РОР, а також тривалості їх горіння ($\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$), залежно від АЧХ прийнятого акустичного сигналу.

4. Встановлення, за результатами аналізу АЧХ прийнятого акустичного сигналу, залежність між термодинамічними і кінетичними параметрами процесу високотемпературного окиснення (горіння) деяких РОР в залежності від $n(C)$ і P .

5. Встановлення взаємозв'язку між АЧХ прийнятого акустичного сигналу та способом гасіння різноманітних джерел масштабних пожеж на території міста, залежно від фізико-хімічної природи та термодинамічних показників займання РОР.

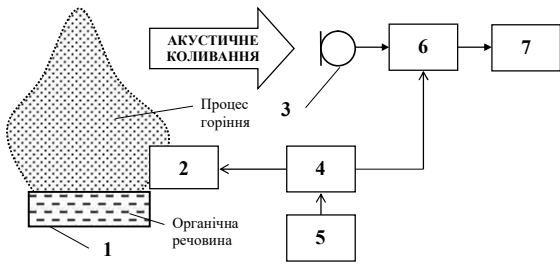


Рисунок 5 – Блок-схема установки дослідження акустичних коливань процесу горіння рідких органічних речовин*

*Позначення: 1 – металева чаша з аналізованою органічною речовиною; 2 – електричний підпал; 3 – акустичний мікрофон; 4 – вимикач для синхронного включення підпалу (2) та акустичного мікрофона (3); 5 – джерело живлення; 6 – підсилювач; 7 – аналізатор спектру

Прийом та аналіз акустичного сигналу в процесі високотемпературного окислення РОР як на етапі первинного займання, так і в процесі реакції горіння, реалізовано у цій роботі шляхом перетворення сигналу $A(t)$ у часовий ряд $X = x_1, x_2, \dots, x_N$, з подальшим застосуванням методу фрактального R/S -аналізу – методу, оснований на використанні для аналізу результатів спостережень безрозмірного показника у вигляді відношення розмаху ($R = x_{max} - x_{min}$) накопиченого відхилення від середнього до середньоквадратичного відхилення (S) [47; 48].

Алгоритм реалізації R/S -аналізу часового ряду, який отримано під час перетворення акустичного сигналу процесу горіння РОР, подано на рис. 6.

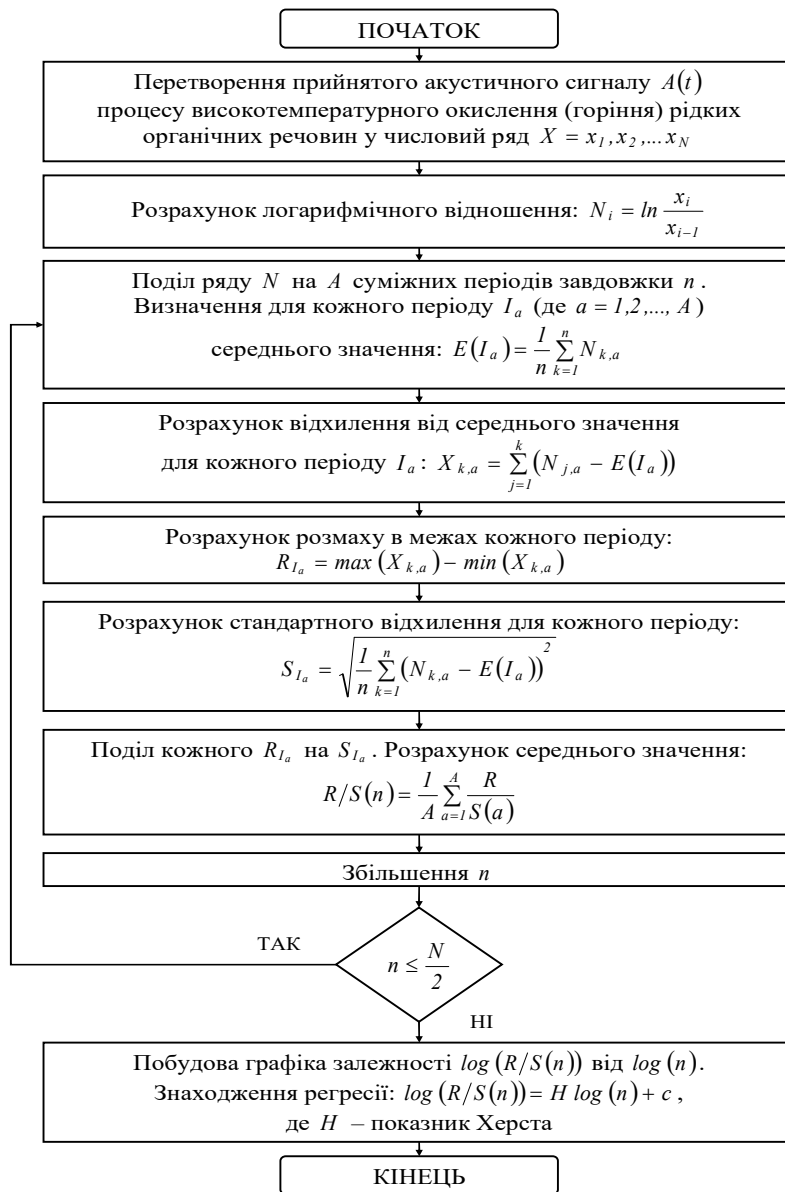


Рисунок 6 – Алгоритм R/S -аналізу часового ряду, отриманого шляхом перетворення акустичного сигналу процесу високотемпературного окислення (горіння) рідких органічних речовин

Використання R/S -аналізу для оцінки часового ряду X прийнятого акустичного сигналу $A(t)$ обумовлено наявністю відношення сигнал/шум менше одиниці, що є умовою функціонування нормально-розподіленої системи або близької до неї. В результаті цього, на основі R/S -аналізу в роботі оцінена фрактальна структура ряду X як сукупності фонового сигналу та корисного акустичного сигналу, отриманого у процесі високотемпературного окислення РОР.

З урахуванням особливостей акустичних спектрів для РОР, які були піддані високотемпературному окисленню, виконано розрахунок фрактальної розмірності (D_f), яка віддзеркалює ступінь подібності амплітудно-часових характеристик РОР, що аналізувалися, а також характеризує динаміку процесів горіння та затухання горіння РОР (для зразків постійного об'єму). Фрактальна розмірність D_f (як ступінь зламності ряду) визначалася як $D_f = 2 - H$, де

H – показник Херста. Показник H визначався із умови $R/S = (\alpha A)^H$, де A – кількість періодів спостереження, α – константа, яка задається. За таких умов, Херст емпірично розрахував константу α для порівняно короткострокових часових рядів природних явищ як 0,5.

Для дослідження були взяті деякі спирти (C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 і C_8), їхні ізомери (C_3 , C_5 і C_8), а також рідкі вуглеводи (C_8 , C_{12} і C_{16}). Чітко відібрані проби РОР ($V = 2 \text{ мл}$) переносились в металеву чашу діаметром 38 мм та висотою 5 мм. Чаша була обладнана електричним підпалом. Схему лабораторної установки наведено на рис. 6, де аналізатор акустичного сигналу з мікрофоном розташовується на відстані 100 мм від краю металеві чаші. Електричний підпал та підсилювач акустичного мікрофона включалися синхронно, що дозволило фіксувати спектри як на первинній стадії горіння (спалаху) парів РОР, так і процес горіння РОР.

Як приклад результатів лабораторних досліджень, на рис. 7 розглянуто отриманий у процесі експерименту графік зміни в часі спектра прийнятого акустичного сигналу процесу високотемпературного окислення (горіння) метанолу. Зміни в часі спектра прийнятого акустичного сигналу процесу горіння РОР фіксувалися до припинення горіння (відсутність коливального режиму горіння) в діапазоні частот 5 Гц–25 кГц.

Робоча гіпотеза для обробки та аналізу результатів дослідження процесу горіння деяких РОР методом акустичної емісії заснована на уявленнях про те, що характер амплітудно-часової характеристики та АЧХ процесу, визначальною мірою, залежить від фізико-хімічних констант горючої

речовини ($T_{\text{спал.}}$ – температура спалаху; $T_{\text{займ.}}$ – температура займання; $T_{\text{с.займ.}}$ – температура самозаймання; ΔT – температурний інтервал поширення полум'я; P – парціальний тиск парів РОР над розчинником; $\Delta \tau$ – час горіння первинної хмари парів РОР; ΔH_0° – стандартна ентальпія утворення горючої речовини; ΔH_r° – стандартна ентальпія високотемпературного окиснення горючої речовини).

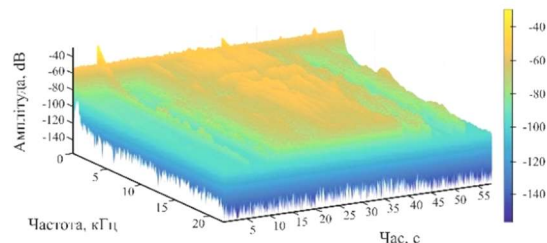


Рисунок 7 – Графік зміни у часі спектра прийнятого акустичного сигналу процесу горіння метанолу

У плані обґрунтування висловленої гіпотези необхідно встановити взаємозв'язок фізико-хімічних констант РОР, що досліджується, з їх структурою (кількість атомів вуглецю в молекулі РОР, ефекти ізомерії) та молярною масою. Для цього авторами складено рівняння реакції горіння та розраховано величини ΔH_0° і ΔH_r° РОР (табл. 1).

Аналіз результатів обчислень (табл. 1) дає змогу встановити однозначну залежність збільшення теплоти утворення нормальних ($n-$) та ізомерів ($izo-$) спиртів ($C_1 - C_8$), а також більш «важких» вуглеводнів (C_8 , C_{12} , C_{16}) від кількості атомів вуглецю в скелетному каркасі молекул спиртів та величин стандартних теплових ефектів реакцій високотемпературного окиснення РОР.

Ґрунтуючись на наявності залежностей показників ΔH_0° і ΔH_r° процесів горіння проб РОР постійного обсягу від показників $n(C)$ і M , у роботі висловлено уявлення про наявність подібних залежностей АЧХ випромінюваного в процесі горіння проб РОР акустичного сигналу від показників $n(C)$ і M цих речовин.

Так, згідно з даними табл. 1 величини ΔH_0° для ізомерів спиртів дещо вище, ніж для аліфатичних ($n-$) спиртів. Відповідно, величини ΔH_r° для ізомерів спиртів нижчі, хоч і незначно. Встановлені факти для розглянутих закономірностей однозначно вказують на складність (багатофакторність) процесу перебігу високотемпературного окиснення ізомерів досліджених спиртів. Одним із ідентифікуючих факторів РОР за їх високотемпературного окислення є те, що для ізомерів спиртів період прямування максимумів (T) акустичного сигналу має бути менше, ніж для спиртів із лінійним вуглецевим каркасом молекул.

Значення енергій утворення (ΔH_f°) та стандартних теплових ефектів (ΔH_r°) реакцій горіння аліфатичних спиртів ($C_1 - C_8$) та важких ($C_{12} - C_{16}$) рідких вуглеводнів

| № з/п | Рівняння реакції горіння різних рідких органічних речовин | $\Delta H_f^\circ, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ | $\Delta H_r^\circ, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ |
|-------|---|--|--|
| 1 | $CH_3OH + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$ | -201,3 | -763,8 |
| 2 | $C_2H_5OH + 3O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$ | -234,9 | -1408,0 |
| 3 | $n-C_3H_7OH + 4,5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$ | -257,7 | -2067,4 |
| 4 | $izo-C_3H_7OH + 4,5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$ | -272,4 | -2051,4 |
| 5 | $n-C_4H_9OH + 6O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$ | -274,6 | -2728,0 |
| 6 | $izo-C_4H_9OH + 6O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$ (вторинний) | -292,6 | -2713,0 |
| 7 | $n-C_5H_{11}OH + 7,5O_2 = 5CO_2 + 6H_2O$ | -302,5 | -3383,6 |
| 8 | $izo-C_5H_{11}OH + 7,5O_2 = 5CO_2 + 6H_2O$ (третинний) | -330,0 | -3353,0 |
| 9 | $n-C_8H_{17}OH + 12O_2 = 8CO_2 + 9H_2O$ | -357,0 | -5360,0 |
| 10 | $izo-C_8H_{17}OH + 12O_2 = 8CO_2 + 9H_2O$ | -367,6 | -5352,3 |
| 11 | $C_8H_{18}(z, p) + 12,5O_2 = 8CO_2 + 9H_2O$ | -215,5 (z) -259,3 (p) | -5505,1 (z) -5496,5 (p) |
| 12 | $C_{12}H_{26}(z) + 18,5O_2 = 12CO_2 + 13H_2O$ ‡ ($M = 172,3 \div 204,0$) | -290,9 | -8147,2 |
| 13 | $C_{16}H_{34}(z) + 24,5O_2 = 16CO_2 + 17H_2O$ ‡ ($C_{13} - C_{15}; C_{12} - C_{16}; M = 198 \div 199$) | -373,3 | -10782,2 |
| 14 | $C_3H_6O + 4O_2 = 3CO_2 + 3H_2O$ (ацетон) пропанон | -217,6 | -1821,4 |

Оскільки початок процесу високотемпературного окиснення РОР відбувається через первинну стадію – запалення газоподібної хмари (парів) над розчинником, то час займання (спалаху) визначається пружністю парів

(P) вуглеводнів при стандартних температурах (рис. 8) та величинами $T_{\text{спал.}}$, $T_{\text{займ.}}$, $T_{\text{с.займ.}}$ і ΔT (табл. 2).

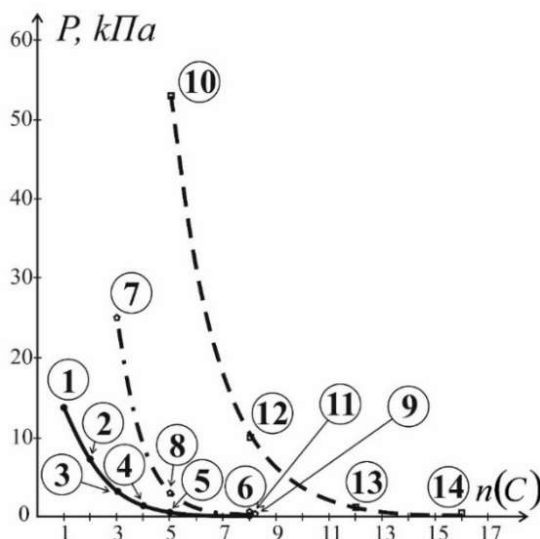


Рисунок 8 – Парціальний тиск парів (P) рідких органічних речовин (за температури $20^\circ C$) залежно від $n(C)$ у вуглецевому каркасі молекул*

*Позначення: спирти (●): 1 – CH_3OH ; 2 – C_2H_5OH ; 3 – $izo-C_3H_7OH$; 4 – $n-C_4H_9OH$; 5 – $izo-C_5H_{11}OH$; 6 – $izo-C_8H_{17}OH$; кетони (○): 7 – пропанон (C_3H_6O); 8 – пентанон ($C_5H_{10}O$); 9 – октанон ($C_8H_{16}O$); вуглеводи (□): 10 – пентан (C_5H_{12}); 11 – октан (C_8H_{18}); 12 – бензин (C_8H_{18}); 13 – дизпаливо ($C_{12}H_{28}$); 14 – парафін ($C_{16}H_{34}$)

За даними табл. 2, зі збільшенням $n(C)$ або M (n – та izo –) спиртів $T_{спал.}$ та $T_{займ.}$ збільшуються, причому для izo – спиртів ці величини дещо нижчі, ніж для n – спиртів, а значення ΔT у досліджуваному ряду спиртів мало змінюються, але спостерігається зміщення величини інтервалу ΔT за умов збільшення $n(C)$ або M у бік високих температур. Подібний характер зміни мають величини $T_{спал.}$, $T_{займ.}$ і ΔT для більш важких, ніж спирти, вуглеводнів (C_8 , C_{12} , C_{16}).

Закономірно стверджувати, що чим вище пружність парів, тим швидше відбувається первинне займання (спалах) за досягнення температури займання $T_{займ.}$ і тим швидше має

згоріти первинна газоподібна маса пару РОР. І навпаки, чим менше P , тим вища температура спалаху парів РОР, тим більше інтервал часу Δt стадії первинного займання РОР.

На рис. 9 подано розраховані за амплітудно-часовими характеристиками значення τ_1 , τ_2 і $\Delta\tau$ для спиртів, кетону та вуглеводнів (всі речовини в рідкій фазі), де чітко фіксується практично незначний вплив ізомерії спиртів на величини τ_1 , τ_2 і $\Delta\tau$ залежно від кількості C – атомів у каркасі молекул ізоспиртів. Спостережуване можна пояснити рівнем розбіжності температур $T_{спал.}$ і $T_{займ.}$ n – та izo – спиртів (табл. 2).

Таблиця 2

Значення величин $T_{спал.}$, $T_{займ.}$, $T_{с.займ.}$ і температурних меж поширення полум'я досліджених рідких органічних речовин у реакції горіння

| № з/п | Формула РОР | $T_{спал.}$, °C | | $T_{займ.}$, °C | $T_{с.займ.}$, °C | Температурні межі поширення полум'я, °C | | |
|--------------------|---|------------------|-----------------|------------------|---|---|---------|------------|
| | | | | | | нижній | верхній | ΔT |
| 1 | CH_3OH | 6,0 | – | 13,0 | 440 | 5 | 39 | 34 |
| 2 | C_2H_5OH | 13,0 (з.т.)* | 16,0 (в.т.) | 18,0 | 400 | 11 | 41 | 30 |
| Закінчення табл. 2 | | | | | | | | |
| 3 | $n-C_3H_7OH$ | 23,0 (з.т.) | 29,0 (в.т.) | 30,0 | 371 | 21 | 55 | 34 |
| 4 | $izo-C_3H_7OH$ (2 пропанол) | 14,0 (з.т.) | 18,0 (в.т.) | 21,0 | 430 | 11 | 42 | 31 |
| 5 | $n-C_4H_9OH$ | 35,0 (з.т.) | 41,0 (в.т.) | 43,0 | 340 | 34 | 67 | 33 |
| 6 | $izo-C_4H_9OH$ (вторинний) | 24,0 | – | 32,0 | 395 | 20 | 55 | 35 |
| 7 | $n-C_5H_{11}OH$ | 48,0 | – | 57,0 | 300 | 45 | 79 | 34 |
| 8 | $izo-C_5H_{11}OH$ (третинний) | 24,0 | – | 34,0 | 410 | 23 | 55 | 32 |
| 9 | $n-C_8H_{17}OH$ | 86,0 | – | 92,0 | 260 | 80 | 116 | 36 |
| 10 | $izo-C_8H_{17}OH$ (ізооктанол) | 77,0 (з.т.) | 82,0 (в.т.) | 86,0 | 266 | 70 | 108 | 38 |
| 11 | C_8H_{18} (р) | 14,0 | – | 19,0 | 215 | 13 | 49 | 36 |
| 12 | $C_{12}H_{26}$ (р) ($M = 172 \div 204$) | 37,0 | 59,0 | 112,0 | 210-370 | 35 | 92 | 57 |
| | | | 65,0–110,0 | | | 99 | 155 | 56 |
| 13 | $C_{16}H_{34}$ (р) $C_{13} - C_{15}$ ($M = 181 \div 212$) | – | 95,0 (в.т.) | 116 | 190 | 83 | 146 | 63 |
| | $C_{12} - C_{16}$ ($M = 172 \div 226$) | 98,0 (з.т.) | 107,0 (в.т.) | 112 | 200 | 95 | 145 | 50 |
| 14 | C_3H_6O ацетон (кетон) | -18,0 (з.т.) | -9,0 (в.т.) | -5 | 535 (в повітрі) 485 (в атм. O ₂) | -20 | 6 | 26 |

* з.т. – закритий тигель; в.т. – відкритий тигель

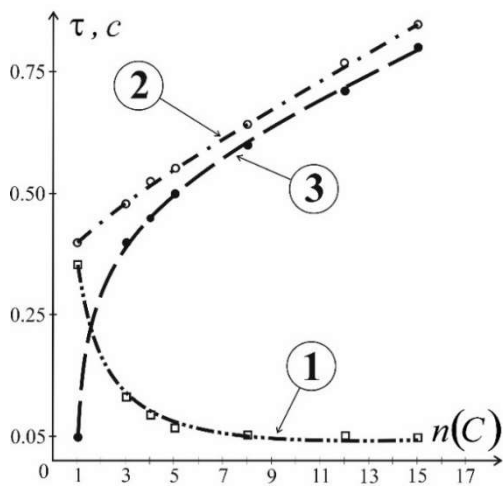


Рис. 9. Значення часу: початку спалаху – τ_1 , закінчення спалаху – τ_2 та тривалості спалаху (горіння первинного шару парів РОР) – $\Delta\tau$ для досліджуваних спиртів, кетону та вуглеводів*

*Позначення: 1 – τ_1 ; 2 – τ_2 ; 3 – $\Delta\tau$

У разі розгляду вуглеводнів із високим вмістом C за звичайних температурних значень їх P приблизно рівні нулю, тому потрібно попереднє нагрівання (для парафіну попереднє нагрівання і перехід у рідку фазу) доти, доки утворюється мінімальний обсяг газової фази вуглеводнів, достатній для займання (спалаху) і подальшого горіння. Тому результати розрахунків τ_1 , τ_2 і $\Delta\tau$ для дизпалива ($C_{12}H_{36} - C_{14}H_{30}$) та парафіну ($C_{16}H_{34} - C_{18}H_{38}$) мають деструктивний характер у разі аналізу загальних залежностей ($\tau_1 - n(C)$, $\tau_2 - n(C)$ і $\Delta\tau - n(C)$). Проте «важкі» вуглеводні можуть розглядатися у контексті аналізу залежностей $n(A_m(t)) - n(C)$, $n(A_m(t)) - M$, $n(A_m(f)) - n(C)$ і $n(A_m(f)) - M$.

Залежність кількості амплітудних максимумів $n(A_m(t))$ і $n(A_m(f))$ від $n(C)$ за амплітудно-часовими характеристиками та АЧХ прийнятого акустичного сигналу від процесу акустичної емісії під час горіння спиртів та вуглеводнів знято за умови постійного обсягу проби пального ($V_{проби} = const$), а також у встановленому діапазоні частот (5 Гц–25 кГц) та часу (до повного згасання горіння). За таких умов може бути встановлена різниця у величинах $n(A_m(t))$ і $n(A_m(f))$ аліфатичних та ізомерних структур спиртів залежно від $n(C)$ й M .

Враховуючи, що амплітуда спектрів характеризує потужність акустичного процесу (емісії) в імпульсі, а величина визначається кількістю окисленого пального в імпульсі, можна припустити зменшення потужності процесу емісії зі збільшенням $n(C)$ або M за умов $V_{проби} = const$. Так, характер зміни виду амплітудної модуляції акустичного сигналу під час перебігу реакції

горіння РОР може бути встановлений на основі результатів розрахунків параметра повторюваності (подібності) амплітудної модуляції прийнятого акустичного сигналу, на основі аналізу фрактальної розмірності D_r (див. рис. 4), що розраховувалася на основі показника Херста часових рядів прийнятого сигналу (відповідно до представленого на рис. 5 алгоритму R/S -аналізу). Встановлення особливостей зміни фізичних параметрів амплітудної модуляції прийнятого акустичного сигналу від процесу акустичної емісії під час горіння РОР (в умовах $V_{проби} = const$), а також його амплітудно-частотного відображення, наведені на рис. 10 і 11, де використані наступні позначення РОР: 1 – CH_3OH ; 2 – $n-C_4H_9OH$; 3 – $n-C_8H_{17}OH$; 4 – $izo-C_3H_7OH$; 5 – $izo-C_5H_{11}OH$; 6 – $izo-C_8H_{17}OH$; 7 – C_8H_{18} ; 8 – $C_{12}H_{26}$; 9 – $C_{16}H_{34}$; 10 – C_3H_6O (ацетон).

Подані на рис. 10 і 11 результати експериментальної реалізації розглянутих вище уявлень про характер змін амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик процесу горіння РОР від структури та молярної маси паливної речовини. Як логічно виходить з розглянутого аналізу результатів експерименту, параметри амплітудної модуляції акустичного сигналу та його амплітудно-частотного відображення характеризуються кількістю атомів вуглецю ($n(C)$) у вуглецевому каркасі молекул (див. рис. 10) або величиною молярної маси (M) РОР (див. рис. 11). Залежності $n(A_m(t))$ і $n(A_m(f))$ від $n(C)$ і M апроксимовані у роботі лінійною функцією, що не суперечить закону діючих мас для хімічних реакцій – для реакції горіння РОР (спиртів, кетону та вуглеводнів).

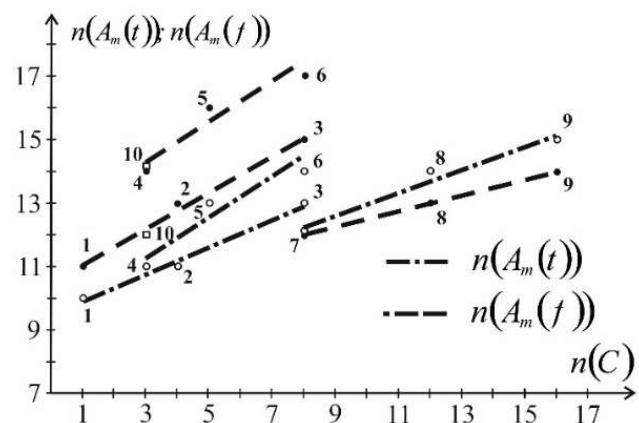


Рисунок 10 – Характер зміни кількості амплітудних максимумів $n(A_m(t))$ (в інтервалі часу – від займання до повного припинення горіння) і $n(A_m(f))$ (у діапазоні частот – 5 Гц–25 кГц) у прийнятому акустичному сигналі під час перебігу реакції горіння спиртів, кетону та вуглеводнів залежно від $n(C)$ у вуглецевому каркасі рідких органічних речовин

Розглянуті залежності у взаємному розташуванні амплітудних максимумів для спиртів (*n* – та *ізо* –) і «важких» вуглеводнів можуть бути пояснені зміною структури спиртів та відсутністю функціональних груп вуглеводнів (C_8 , C_{12} , C_{16}), а також практично нульовими значеннями P у вуглеводнів з $n(C) \geq 8$, внаслідок чого можлива зміна динаміки горіння вуглеводнів, відповідно виду амплітудної модуляції і виду спектральних гармонік акустичного сигналу при ефекті акустичної емісії процесу високотемпературного окислення РОР. Внаслідок можливого прояву перерахованих факторів для вуглеводнів спостерігається реверсивність взаємного розташування залежностей $n(A_m(t))$ і $n(A_m(f))$ від $n(C)$ та M (рис. 10 і 11).

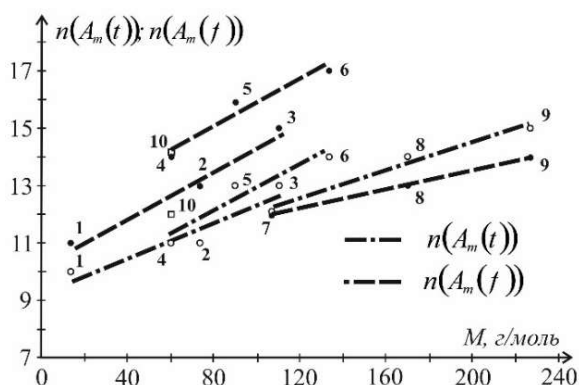


Рисунок 11 – Характер зміни кількості амплітудних максимумів $n(A_m(t))$ (в інтервалі часу – від займання до повного припинення горіння) і $n(A_m(f))$ (у діапазоні частот – 5 Гц–25 кГц) у прийнятому акустичному сигналі під час перебігу реакції горіння спиртів, кетону та вуглеводнів залежно від їх молярної маси (M)

Викладені результати експериментальних досліджень дають змогу створити банк даних геоінформаційної системи автоматизованого контролю акустичного простору міста, як складової підсистеми Safe city в системі Smart city, для достовірного виявлення та ідентифікації на території міста джерел масштабних пожеж з РОР. Так, за умови виникнення на території міста масштабної пожежі, система акустичного моніторингу дозволить у реальному масштабі часу ідентифікувати (за наявністю в базі даних інформації щодо АЧХ горіння РОР) природу та координати осередку займання, що є джерелом інформації для системи підтримки прийняття антикризових рішень.

З метою підвищення достовірності та надійності результатів визначення природи РОР (у режимі високотемпературного окислення (горіння)) необхідні результати тестування характеру повторюваності у часі (τ) кількості максимумів амплітудної модуляції акустичного сигналу при ефекті акустичної емісії протягом часу горіння

проб РОР. І тому на рис. 12 і 13 відображено результати розрахунків показників Херста (H) та фрактальної розмірності D_τ .

На рис. 12 і 13 використані такі позначення РОР: 1 – CH_3OH ; 2 – $n-C_4H_9OH$; 3 – $n-C_8H_{17}OH$; 4 – $ізо-C_3H_7OH$; 5 – $ізо-C_5H_{11}OH$; 6 – $ізо-C_8H_{17}OH$; 7 – C_3H_6O (ацетон); 8 – C_8H_{18} ; 9 – $C_{12}H_{26}$; 10 – $C_{16}H_{34}$. Встановлено, що незалежно від природи РОР ($n(C)$) значення показників H і D_τ для дослідженого ряду легкозаймистих рідин перебувають у проміжках $H = 0,3 \div 0,4$ і $D_\tau = 1,55 \div 1,65$. За таких умов чітко проявляється тенденція підвищення показника H і, відповідно, – зниження показника D_τ для ізомерів спиртів (приблизно на 0,05 одиниць). За абсолютними значеннями показника H процес горіння вивчених РОР є антиперсистентним (тимчасовим), а реакції високотемпературного окислення ацетону (C_3H_6O) персистентним (довготривалим), але не динамічним. Тільки за $1 < H < 2$ процес горіння набуває динамічного характеру, проте реалізувати його можливо лише за умови сталості маси РОР протягом часу горіння.

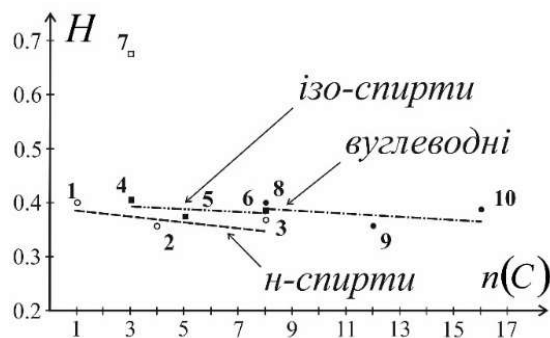


Рисунок 12 – Характер зміни показника Херста (H) амплітудної модуляції акустичного сигналу при ефекті акустичної емісії реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких рідких органічних речовин від їх $n(C)$

Практична сталість значень показників H і D_τ (див. рис. 12 і 13) для вивченого діапазону РОР свідчить про достатній рівень достовірності та надійності отриманих результатів залежності амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик горіння РОР від фізико-хімічних констант паливної речовини (див. рис. 10 і 11) і тому отримані у робі експериментальні результати можуть бути рекомендовані як інформаційний матеріал для наповнення бази даних геоінформаційної системи автоматизованого контролю акустичного простору міста, як складової підсистеми Safe City в системі Smart City, для достовірного виявлення та ідентифікації на території міста джерел масштабних пожеж з РОР.

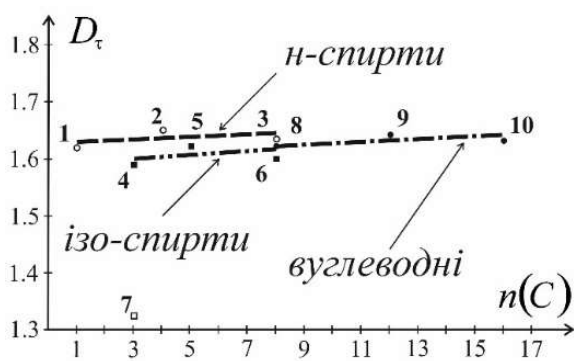


Рисунок 13 – Характер зміни показника фрактальної розмірності (D_τ) амплітудної модуляції акустичного сигналу при ефекті акустичної емісії реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких рідких органічних речовин від їх $n(C)$

Висновки і перспективи подальших досліджень

З метою достовірного виявлення та ідентифікації на території міста джерел масштабних пожеж з рідкими органічними речовинами, у роботі запропоновано системний підхід і принципи використання спектрального аналізу акустичного простору міста, що ґрунтуються на наукових дослідженнях ефекту акустичної емісії, спричиненого високотемпературним окисленням (горінням) рідких органічних речовин. Для дослідження рівня інформативних можливостей цього ефекту, розроблені вимірювальна схема акустичного ефекту, алгоритм і програмне забезпечення для обробки амплітудно-часових характеристик прийнятого акустичного сигналу первинного (спалаху) та основного процесів горіння деяких рідких органічних речовин, шляхом використання спектрального аналізу та фрактального R/S -аналізу.

Метод, який запропонований у роботі для діагностики процесів горіння рідких органічних спиртів ($n(C)=1 \div 8$) та вуглеводнів ($n(C)=8, 12, 16$), ґрунтується на дослідженні динамічних параметрів процесу, що описуються видом амплітудної модуляції акустичного сигналу ($n(A_m(t))$) та його амплітудно-частотними характеристиками ($n(A_m(f))$), які чітко пов'язані з особливостями структури нормальних спиртів, їх ізомерів і нормальних вуглеводнів, а також кількістю атомів вуглеводнів – $n(C)$ у каркасі молекул досліджених органічних речовин або величиною молярної маси (M) цих речовин. За таких умов встановлено, що динаміка процесу високотемпературного окиснення (горіння), тобто залежності кількості екстремумів ($n(A_m(t))$),

$n(A_m(f))$) амплітудно-часових та амплітудно-частотних характеристик прийнятого акустичного сигналу за ефекту акустичної емісії, визначається фізичними ($T_{спал.}$, $T_{займ.}$, $T_{с.займ.}$, ΔT , P) та фізико-хімічними термодинамічними параметрами (ΔH_0° , ΔH_r°) процесу і описується лінійними залежностями від $n(C)$ і M органічних речовин.

Методом акустичної емісії досліджено ефект «спалаху», тобто час первинного процесу горіння парів рідких органічних речовин і встановлено однозначну залежність тривалості даного процесу ($\Delta \tau$) від парціального тиску парів над чистим розчинником та температурою спалаху ($T_{спал.}$) або займання ($T_{займ.}$). Встановлено, що чим більше P і менше $T_{спал.}$ ($T_{займ.}$), тим менше час «спалаху» $\Delta \tau$, тобто тривалість горіння парів органічних речовин.

За допомогою розробленого алгоритму та програмного забезпечення для обробки параметрів акустичного сигналу за параметрами H (показник Херста) та фрактальної розмірності D_τ встановлено, що незалежно від природи досліджених органічних речовин ($n(C)=1 \div 16$) значення показників H і D_τ залишаються постійними для дослідженого ряду легкозаймистих рідин ($H=0,3 \div 0,4$; $D_\tau=1,55 \div 1,65$). За таких умов встановлено тенденцію підвищення показника H і відповідно зниження показника D_τ для ізомерів спиртів (приблизно 0,05 одиниць). Практична сталість параметрів H і D_τ для органічних речовин з лінійною та ізомерною структурою C -каркасів молекул органічних речовин свідчить про відповідний рівень достовірності та надійності отриманих результатів щодо обробки акустичних сигналів за ефекту акустичної емісії реакції високотемпературного окислення (горіння) деяких органічних речовин, що дає змогу зменшити ступінь помилкових спрацьовувань акустичного пристрою виявлення на території міста джерел масштабних пожеж та встановлення природи пального матеріалу в осередку займання.

Результати досліджень свідчать про перспективність проведення подальших досліджень, спрямованих на розроблення ефективної системи наземних автоматизованих пристроїв контролю акустичного простору та пасивної локації джерел небезпек, з подальшим отриманням й обробкою інформації, а також із прогнозуванням виникнення на території міста надзвичайних ситуацій природного, техногенного, соціального та воєнного характеру й розробленням ефективних управлінських антикризових рішень, з метою підвищення ефективності функціонування підсистеми Safe City в системі Smart City.

Список бібліографічних посилань

1. Левчук К. О., Романюк Р. Я. Сталий розвиток міста як ключовий фактор розвитку економіки України. *Математичне моделювання*. 2022. № 1(46). С. 131–140. URL: <http://matmod.dstu.dp.ua/article/view/258455/255221> (дата звернення 22.01.2024).
2. Назаренко Ю., Сирбу О. Стратегія розвитку міст: удосконалення підходів. Приклад Києва. URL: <https://cedos.org.ua/wp-content/uploads/stattya-strategiyi-rozvytku-mist.pdf> (дата звернення 22.01.2024).
3. Планування і забудова територій: ДБН Б.2.2-12:2018 від 01 вересня 2018 року. Київ: Міністерство комунального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 187 с. URL: https://dbn.co.ua/pay/pub01/dbn-B-2212_planuvannya.pdf (дата звернення 29.01.2024).
4. Про національну безпеку України: Закон України від 21 червня 2018 року № 2469-VIII. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19> (дата звернення 22.01.2024).
5. Про засади внутрішньої і зовнішньої політики: Закон України від 01 липня 2010 року № 2411-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2411-17#Text> (дата звернення 15.01.2024).
6. Про правовий режим надзвичайного стану: Закон України від 16 березня 2000 року № 1550-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-14#Text> (дата звернення 15.01.2024).
7. Про правовий режим воєнного стану: Закон України від 12 травня 2015 року № 389-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/389-19#Text> (дата звернення 15.01.2024).
8. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України «Про Стратегію національної безпеки України»: Указ Президента України від 14 вересня 2020 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020#Text> (дата звернення 15.01.2024).
9. Тютюник В. В., Черногор Л. Ф., Калугін В. Д. Системний підхід до оцінки небезпеки життєдіяльності при територіально часовому розподілі енергії джерел надзвичайних ситуацій. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: Національний університет цивільного захисту України. 2011. Вип. 14. С. 171–194. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/15891> (дата звернення 29.01.2024).
10. Андронов В. А., Дівізюк М. М., Калугін В. Д., Тютюник В. В. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні: монографія. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2016. 319 с. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5970> (дата звернення 29.01.2024).
11. На залізничній станції «Шебелинка» вибухнула цистерна з паливом. Пожежа кваліфікована як диверсія. URL: <https://kharkivoda.gov.ua/news/72697> (дата звернення 05.02.2024).
12. Унаслідок ворожих обстрілів у Миколаєві загорілась АЗС: є загиблі. URL: <https://prm.ua/unaslidok-vorozhykh-obstriliv-u-mykolaievi-zahorilas-azs/> (дата звернення 05.02.2024).
13. Пожежа в Рені: у порту вибухнув бензовоз, є жертви. URL: <https://zn.ua/ukr/UKRAINE/pozhezha-v-reni-u-portu-vibukhnuv-benzovoz-je-zhertvi.html> (дата звернення 05.02.2024).
14. Наслідки пожежі біля АЗС у Чернівцях: згоріли бензовоз і три цистерни, пошкоджено приміщення, травмована людина. URL: https://bukinfo.com.ua/nadzvychni-sytuacii/naslidky-pozhezhi-bilya-azs-u-chernivcyah-zgorilo-try-benzovozy-poshkodzheno-prymishchennya-travmovana-lyudyna-lyudyna#google_vignette (дата звернення 05.02.2024).
15. Обстріл Дніпра: пожежу на АЗС локалізували. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3601120-obstril-dnipra-pozezu-na-azs-lokalizuvali.html> (дата звернення 05.02.2024).
16. Окупанти потужно обстріляли Нікополь: виникла пожежа на АЗС, пошкоджено багатопверхівки і фабрику. URL: <https://tsn.ua/ato/okupanti-potuzhno-obstrilyali-nikopol-vinikla-pozhezha-na-azs-poshkodzheno-bagatopoverhivki-i-fabriku-2190190.html> (дата звернення 05.02.2024).
17. На Рівненщині у Сарнах 1 липня загорівся бензовоз на території нафтобази. Поруч з транспортом знаходилися резервуари з паливом, повідомили у прес-службі ДСНС області. Місткість бензовоза – 28 тон пального. URL: <https://suspilne.media/519805-na-naftobazi-na-rivnensini-spalahnuv-benzovoz-so-vidomo-pro-incident/> (дата звернення 05.02.2024).
18. Під Києвом сталася пожежа на АЗС: спалахнув бензовоз із 10 тисячами літрів пального. URL: <https://tsn.ua/exclusive/pid-kiyevom-stalasya-masshtabna-pozhezha-na-zpravci-spalahnuv-benzovoz-foto-video-2286691.html> (дата звернення 05.02.2024).
19. У Харкові сталася пожежа на АЗС, коли рф вдарила по місту. URL: <https://suspilne.media/453915-u-harkovi-stalasya-pozeza-na-azs-koli-rf-vdarila-po-mistu-so-vidomo/> (дата звернення 05.02.2024).
20. На Київщині вибухнув бензовоз: водій загинув, на місці сталася значна пожежа. URL: <https://www.unian.ua/incidents/nakijivshchini-vibukhnuv-benzovoz-vodiy-zagynuv-na-misci-stalasya-znachna-pozheza> (дата звернення 05.02.2024).
21. Вогняне пекло у Києві: пожежа на АЗС спалахнула через найзд авто на колонку. URL: <https://kyiv.tsn.ua/vognyane-peklo-u-kiyevi-pozhezha-na-azs-spalahnula-cherez-nayzd-avto-na-kolonku-foto-video-2366779.html> (дата звернення 05.02.2024).
22. На Київщині шест згоріли бензовоз та мікроавтобуси. URL: <https://kyiv.comments.ua/ua/news/society/accidents/20534-na-kiivschini-vschent-zgorili-benzovoz-ta-mikroavtobusi-foto.html> (дата звернення 05.02.2024).
23. У Харкові пролунав потужний вибух, в небо піднявся стовп диму. URL: <https://apostrophe.ua/ua/news/society/accidents/2023-11-12/v-harkove-progremel-moschniy-vzryiv-v-nebopodnyalsya-stolb-dyima-vse-podrobnosti-i-video/308351> (дата звернення 05.02.2024).
24. Кодекс цивільного захисту України від 2 жовтня 2012 року № 5403-VI. *Голос України*. 2012. листопад (№ 220(5470)). С. 4–20. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення 15.01.2024).
25. Рішення Ради національної безпеки і оборони України від 04 червня 2021 року «Щодо удосконалення мережі ситуаційних центрів та цифрової трансформації сфери національної безпеки і оборони». Введено в дію Указом Президента України від 18 червня 2021 року № 260/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0039525-21#Text> (дата звернення 15.01.2024).
26. Тютюник В.В., Калугін В.Д., Писклакова О.О. Основоположні принципи створення у Єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. 2018. №4(50). С. 168–177. URL:

- <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7411> (дата звернення 05.02.2024). **27. Тютюнник В. В., Калугін В. Д., Писклакова О. О.** Управлінські основи створення у єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій. *Вісник Національного університету цивільного захисту України. Серія «Державне управління»*. Харків. Національний університет цивільного захисту України. 2020. Вип. 1(12). С. 546–571. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11625> (дата звернення 05.02.2024).
- 28. Тютюнник В. В., Тютюнник О. О., Усачов Д. В.** Особливості створення системи акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій у контексті розвитку концепції «Smart city». *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ: Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту. 2023. № 2(16). С. 58–76. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19263> (дата звернення 05.02.2024).
- 29. Тютюнник В. В., Яценко О. А., Рубан І. В., Тютюнник О. О.** Особливості функціонування системи ситуаційних центрів на різних стадіях розвитку надзвичайних ситуацій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2022. Вип. 1(43). С. 41–52. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/15894> (дата звернення 05.02.2024).
- 30. Рубан І. В., Тютюнник В. В., Тютюнник О. О.** Розвиток науково-технічних основ оперативного геоінформаційного акустичного моніторингу джерел терористичних небезпек. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2020. Вип. 3(39). С. 67–80. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18114> (дата звернення 05.02.2024).
- 31. Рубан І. В., Тютюнник В. В., Тютюнник О. О.** Особливості створення системи підтримки прийняття антикризових рішень в умовах невизначеності вхідної інформації при надзвичайних ситуаціях. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2021. Вип. 1(40). С. 75–84. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14232> (дата звернення 05.02.2024).
- 32. Тарахно О. В., Трегубов Д. Г., Жернокльов К. В., Коврегін В. В.** Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння. Навчальний посібник. Харків : Національний університет цивільного захисту України. 2020. 408 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11382> (дата звернення 05.02.2024).
- 33. Ghadarah N., Ayre D.** A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of Polymer-Based composites. *Sensors*. 2023. 23. 6945. DOI: 10.3390/s23156945.
- 34. Hauser T., Reisch R.T., Kamps T., Kaplan A.F.H., Volpp J.** Acoustic emissions in directed energy deposition processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. № 119. P. 3517–3532. DOI: 10.1007/s00170-021-08598-8.
- 35. Huijter A., Kassapoglou C., Pahlavan L.** Acoustic emission monitoring of carbon fibre reinforced composites with embedded sensors for In-Situ damage identification. *Sensors*. 2021. № 21. 6926. DOI: 10.3390/s21206926.
- 36. Fevotte G., Wang X.J., Ouabbas Y.** Acoustic emission, a new sensor for monitoring industrial crystallization processes. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014. № 47(3). P. 2727–2733. DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.01478.
- 37. Dang V.H., Beroual A., Rozga P.** Fractal dimensions analysis of branching streamers propagating in mineral oil. *Archives of Electrical Engineering*. 2022. № 71(3). P. 659–669. DOI: 10.24425/aee.2022.141677.
- 38. Souza F.C., Franco S.D., Arencibia R.V., Leal J.E.S., Teodoro E.B., Neto F.F.R.** Acoustic emission assessment of measurement errors caused by gaps in chemical composition analyzes carried out using a portable spark spectrometer. *Measurement*. 2020. №151. 107105. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107105.
- 39. Ospitia N., Korda E., Kalteremidou K.-A., Lefever G., Tsangouri E., Aggelis D.G.** Recent developments in acoustic emission for better performance of structural materials. *Developments in the Built Environment*. 2023. №13. 100106. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100106.
- 40. Guo J., Shang H., Cai G., Jin Y., Wang K., Li S.** Early detection of coal spontaneous combustion by complex acoustic waves in a concealed fire source. *ACS Omega*. 2023. № 8(19). P. 16519–16531. DOI: 10.1021/acsomega.3c00199.
- 41. Левтеров О. А., Тютюнник В. В., Калугін В. Д., Ольховіков С. В.** Використання ефекту акустичної емісії для раннього виявлення загорання матеріалів, що містять целюлозу, об'єктової підсистеми універсальної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні. *Прикладна радіоелектроніка*. 2017. Т.16. № 1–2. С. 23–40. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5938> (дата звернення 05.02.2024).
- 42. Левтеров О. А., Тютюнник В. В., Калугін В. Д.** Методи ідентифікації процесу горіння целюлозомістких матеріалів на основі ефекту акустичної емісії. *Проблеми пожежної безпеки*. 2017. Вип. 42. С. 72–84. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5939> (дата звернення 05.02.2024).
- 43. Левтеров О. А., Калугін В. Д., Тютюнник В. В.** Пат. 127254 Україна, МПК (2006) A62C 3/00, G01R 29/26 (2006.01), G08C 19/00, G08B 31/00. Спосіб раннього виявлення осередку займання. Власник патенту: Національний університет цивільного захисту України. № u201801387; заявл. 12.02.2018; опубл. 25.07.2018, бюл. № 14. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8423> (дата звернення 05.02.2024).
- 44. Levterov A. A.** Acoustic research method for burning flammable substances. *Acoustical Physics*. 2019. №65(4). P. 444–449. DOI: 10.1134/S1063771019040109.
- 45. Tiutiunyk V., Kalugin V., Pysklakova O., Levterov A., Zakharchenko Ju.** Development of civil defense systems and ecological safety. *IEEE Problems of Infocommunications. Science and Technology*. 2019. P. 295–299. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061569.
- 46. Tiutiunyk V. V., Kalugin V. D., Levterov A. A., Sydorenko O. V., Starodubtsev S. A., Usachov D. V.** Establishing the nature of kinetic effects of the high-temperature oxidation (combustion) process of some liquid organic matters by acoustic radiation. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2023. № 6. P. 203–212. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19622> (дата звернення 05.02.2024).
- 47. Wu Z., Lou Y., Yin S., Wang A., Liu H., Sun W., Zuo Y., Chen B.** Acoustic and fractal analyses of the mechanical properties and fracture modes of bedding-containing shale under different seepage pressures. *Energy Science and Engineering*. 2020. № 8. P. 3638–3656. DOI: 10.1002/ese3.772.
- 48. Yang H.** Fractal analysis of acoustic emission parameter series of coal with different properties under uniaxial loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. № 81. 012071. DOI: 10.1088/1755-1315/81/1/012071.

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL FOUNDATIONS FOR CREATION OF A
GEOINFORMATION SYSTEM FOR ACOUSTIC MONITORING OF LARGE FIRES WITH LIQUID
ORGANIC SUBSTANCES IN THE CITY

Tiutiunyk Vadym (Doctor of Technical Sciences, Professor)¹
Liev tierov Oleksandr (Doctor of Technical Sciences, Senior Research)¹
Tiutiunyk Olha (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor)²
Usachov Dmytro¹

¹ National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

² Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

Formulation of the problem in general. The article is devoted to developing the scientific and technical foundations for creating a geoinformation system for monitoring large-scale fires. This system is an important component of the Safe City subsystem within the Smart City framework. The authors propose a model of Safe City that takes into account the complexity and dynamics of modern cities, where people, nature, economy, and society interact. This system includes stages for registering threats to the city's livelihood and analyzing and systematizing information about these threats. In the process of city functioning and development, conditions are created for the emergence of dangers that adversely affect the natural-ecological, economic-technical, and socio-political balance both within their territory and in the region. Additionally, these hazard factors may harm the vital national interests of the country.

Analysis of recent researches and publications. The process of registering potential threats to the city's livelihood includes conducting financial audits, monitoring social and environmental conditions, video surveillance, as well as radiation, chemical, and biological monitoring. Spectral analysis of emissions from hazardous sources involves a comprehensive analysis of emission characteristics across various frequency ranges, such as acoustic, radio frequency, infrared, optical, ultraviolet, and X-ray, as well as analysis of gamma and cosmic rays. In their research, the authors focus on spectral analysis of acoustic signals to detect and identify local-level hazardous sources, including large fires with rare organic substances.

Research methods. During the research, the principles of systems approach, spectral and fractal analysis methods were applied. A conceptual scheme for measuring the acoustic effect was developed. An algorithm and software for processing the characteristics of the received acoustic signal of the primary (flash) and main combustion processes of certain liquid organic substances were created.

Presenting the main material. The reception and analysis of the acoustic signal in the article is implemented by converting the signal into a number series, followed by the use of the R/S-analysis method to assess the fractal structure of the time series as a combination of the background signal and the useful acoustic signal obtained during the combustion of rare organic substances.

Elements of scientific novelty. The scientific novelty lies in establishing dependencies of amplitude-time and amplitude-frequency characteristics of the received acoustic signal on the physical and physicochemical thermodynamic parameters of the combustion process of certain liquid organic substances. These dependencies were described by trends related to the number of carbon atoms in the carbon frameworks of organic molecules and their molar mass. Additionally, the "flash" effect of vapors of liquid organic substances was determined using acoustic emission method. A clear dependence of the duration of this process on the partial pressure of vapors above the pure solvent and the temperature of flashing or ignition was established. The corresponding level of reliability and accuracy in processing the research results was confirmed by calculations of Hurst indicators and fractal dimension.

The theoretical significance. The theoretical significance of the article for the military-defense sphere is the development of a functional diagram of a system of ground-based stationary means of automated control of acoustic space in the city, a situation center, a communication subsystem and transmission of telemetric information, as well as a subsystem for implementing anti-crisis decisions to prevent, localize and eliminate the consequences of emergency situations natural, technogenic, social and military nature in the city.

Practical significance of the article. The practical significance of the research results for the security sphere lies in gathering informational material for the proposed monitoring system database. The main functions of this database include reliable detection and identification of large-scale fire sources with rare organic substances within urban areas.

Conclusion and the perspectives of future researches. Further research will be conducted aimed at developing an effective system of ground-based automated devices for monitoring the acoustic space and passive location of sources of danger, with subsequent data collection and processing, as well as predicting the occurrence of various types of emergencies within urban areas and developing effective crisis management solutions.

Keywords: large-scale fire, high-temperature oxidation process, combustion process, liquid organic substance, acoustic emission, amplitude-frequency spectrum, spectral analysis, fractal analysis, Hurst exponent, fractal dimension, geoinformation system of acoustic monitoring, Safe City, Smart City.

References

1. Levchuk, K. O., Romanjuk, R. Ja., (2022). Sustainable development of the city as a key factor in the development of the economy of Ukraine. *Matematychni modeliuvannia*, 1(46), 131–140. Available at:

<http://matmod.dstu.dp.ua/article/view/258455/255221>

[Accessed: 22 January 2024]. 2. Nazarenko, Ju., Syrbu, O. City development strategy: improvement of approaches. Example of Kyiv. Available at: <https://cedos.org.ua/wp-content/uploads/stattya-strategiyi-rozvytku-mist.pdf> [Accessed: 22 January 2024]. 3. Planning and development

of territories: DBN B.2.2-12:2018. Kyiv: Ministerstvo komunal'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrainy, 187. Available at: https://dbn.co.ua/pay/pub01/dbn-B-2212_planuvannya.pdf [Accessed: 29 January 2024].

4. On National Security of Ukraine: Law of Ukraine, (2018). 2469-VIII. Available at: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19> [Accessed: 22 January 2024].

5. About the principles of domestic and foreign policy: Law of Ukraine, (2010). 2411-VI. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2411-17#Text> [Accessed: 15 January 2024].

6. About the legal regime of the state of emergency: Law of Ukraine, (2000). 1550-III. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-14#Text> [Accessed: 15 January 2024].

7. About the legal regime of martial law: Law of Ukraine, (2015). 389-VIII. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/389-19#Text> [Accessed: 15 January 2024].

8. Decree of the President of Ukraine On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine «On the National Security Strategy of Ukraine», (2020). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020#Text> [Accessed: 15 January 2024].

9. Tiutiunyk, V. V., Chernogor, L. F., Kalygin, V. D., (2011). System approach to the estimation of danger of vital functions at the emergencies sources energy territorial-temporal distribution. *Problemy nadzvychajnykh sytuatsij*. Kharkiv: Natsional'nyj universytet tsyvil'noho zakhystu Ukrainy, 14, 171–194. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/15891> [Accessed: 29 January 2024].

10. Andronov, V. A., Diviziniuk, M. M., Kalygin V. D., Tiutiunyk V. V., (2016). Scientific and design basis for creating a comprehensive system for monitoring emergencies in Ukraine. Monohrafiia. Kharkiv: Natsional'nyj universytet tsyvil'noho zakhystu Ukrainy, 319. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5970> [Accessed: 29 January 2024].

11. A fuel tank exploded at the Shebelinka railway station. The fire is classified as sabotage. Available at: <https://kharkivoda.gov.ua/news/72697> [Accessed: 05 February 2024].

12. As a result of enemy shelling, a gas station in Mykolaiv caught fire: there were casualties. Available at: <https://prm.ua/unaslidok-vorozhykh-obstriliv-u-mykolaievi-zahorilas-azs/> [Accessed: 05 February 2024].

13. Fire in Rennes: a fuel tanker exploded in the port, there are victims. Available at: <https://zn.ua/ukr/UKRAINE/pozhezha-v-reni-u-portu-vibukhnuv-benzovoz-je-zhertvi.html> [Accessed: 05 February 2024].

14. Consequences of a fire near a gas station in Chernivtsi: a gasoline truck and three tanks burned, the premises were damaged, a person was injured. Available at: https://bukinfo.com.ua/nadzvychnayni-sytuacii/naslidky-pozhezhi-bilya-azs-u-chernivcyah-zgorilo-try-benzovozy-poshkodzheni-prymishchennya-travmovana-lyudyna#google_vignette [Accessed: 05 February 2024].

15. Shelling of the Dnipro: the fire at the gas station was contained. Available at: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3601120-obstril-dnipra-pozezu-na-azs-lokalizovali.html> [Accessed: 05 February 2024].

16. The occupiers heavily shelled Nikopol: a fire broke out at a gas station, high-rise buildings and a factory were damaged. Available at: <https://tsn.ua/ato/okupanti-potuzhno-obstrilyali-nikopol-vinikla-pozhezha-na-azs-poshkodzheni-bagatopoverhivki-i-fabriku-2190190.html> [Accessed: 05 February 2024].

17. On July 1, a gasoline tanker caught fire on the territory of an oil depot in Sarny, Rivne region. Tanks with fuel were located

near the transport, the press service of the Regional Emergency Service reported. The capacity of the fuel truck is 28 tons of fuel. Available at: <https://suspilne.media/519805-naftobazi-na-rivnensini-spalahnuv-benzovoz-so-vidomopro-incident/> [Accessed: 05 February 2024].

18. A fire broke out at a gas station near Kyiv: a gasoline tanker with 10,000 liters of fuel caught fire. Available at: <https://tsn.ua/exclusive/pid-kiyevom-stalasya-masshtabna-pozhezha-na-zapravci-spalahnuv-benzovoz-foto-video-2286691.html> [Accessed: 05 February 2024].

19. A fire broke out at a gas station in Kharkiv when the Russian Federation struck the city. Available at: <https://suspilne.media/453915-u-harkovi-stalasa-pozeza-na-azs-koli-rf-vdarila-po-mistu-so-vidomo/> [Accessed: 05 February 2024].

20. A gasoline tanker exploded in Kyiv region: the driver died, and a significant fire broke out on the spot. Available at: <https://www.unian.ua/incidents/nakijivshchini-vibukhnuv-benzovoz-vodiy-zagynuv-na-misci-stalasya-znachna-pozhezha-foto-video-novini-kiyeva-12269862.html> [Accessed: 05 February 2024].

21. Fiery hell in Kyiv: a fire broke out at a gas station due to a car hitting a column. Available at: <https://kyiv.tsn.ua/vognyane-peklo-u-kiyevi-pozhezha-na-azs-spalahnula-cherez-nayizd-avto-na-kolonku-foto-video-2366779.html> [Accessed: 05 February 2024].

22. In the Kyiv region, a gasoline truck and minibuses burned to the ground. Available at: <https://kyiv.comments.ua/ua/news/society/accidents/20534-na-kiivschini-vschent-zgorili-benzovoz-ta-mikroavtobusi-foto.html> [Accessed: 05 February 2024].

23. A powerful explosion rang out in Kharkiv, a column of smoke rose into the sky. Available at: <https://apostrophe.ua/ua/news/society/accidents/2023-11-12/v-harkove-progremel-moschnyy-vzryiv-v-nebo-podnyalsya-stolb-dyima-vse-podrobnosti-i-video/308351> [Accessed: 05 February 2024].

24. Code of Civil Protection of Ukraine, (2012). 5403-VI. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> [Accessed: 15 January 2024].

25. Decision of the National Security and Defense Council of Ukraine «Regarding the improvement of the network of situational centers and the digital transformation of the sphere of national security and defense», (2021). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0039525-21#Text> [Accessed: 15 January 2024].

26. Tiutiunyk, V. V., Kalygin V. D., Pysklakova O. O., (2018). The fundamental principles of creating an information and analytical subsystem of the management of the processes of prevention and localization of the consequences of emergency situations in the Unified State System of Civil Protection. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku*, 4(50), 168–177. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7411> [Accessed: 05 February 2024].

27. Tiutiunyk V. V., Kalygin V. D., Pysklakova O. O., (2020). Administrative bases for the creation of an information and analytical subsystem of the management of the processes of prevention and localization of the consequences of emergency situations in the unified state system of Civil Protection. *Visnyk Natsional'noho universytetu tsyvil'noho zakhystu Ukrainy. Seriya «Derzhavne upravlinnia»*, 1(12), 546–571. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11625> [Accessed: 05 February 2024].

28. Tiutiunyk V. V., Tiutiunyk O. O., Usachov D. V., (2023). Peculiarities of creating a system of acoustic monitoring of sources of emergency situations in the context of the development of the «Smart city» concept. *Naukovyy visnyk: Tsyvil'nyj zakhyst ta*

- pozhezhna bezpeka*, 2(16), 58–76. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19263> [Accessed: 05 February 2024].
- 29. Tiutiunyk V. V., Yashchenko O. A., Ruban I. V., Tiutiunyk O. O.**, (2022). Peculiarities of the functioning of the system of situational centers at different stages of the development of emergency situations. *Suchasni informatsijni tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 1(43), 41–52. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/15894> [Accessed: 05 February 2024].
- 30. Ruban I. V., Tiutiunyk V. V., Tiutiunyk O. O.**, (2020). Development of scientific and technical foundations of operational geoinformational acoustic monitoring of sources of terrorist dangers. *Suchasni informatsijni tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 3(39), 67–80. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18114> [Accessed: 05 February 2024].
- 31. Ruban I. V., Tiutiunyk V. V., Tiutiunyk O. O.**, (2021). Peculiarities of creating a support system for making anti-crisis decisions in conditions of uncertainty of input information in emergency situations. *Suchasni informatsijni tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 1(40), 75–84. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14232> [Accessed: 05 February 2024].
- 32. Tarahno O. V., Trehubov D. H., Žernokl'ov K. V., Kovrehin V. V.**, (2020). The main provisions of the combustion process. The occurrence of the combustion process. Kharkiv: Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy, 319. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11382> [Accessed: 05 February 2024].
- 33. Ghadarah, N., Ayre, D.**, (2023). A review on acoustic emission testing for structural health monitoring of Polymer-Based composites. *Sensors*, 23, 6945. DOI: 10.3390/s23156945.
- 34. Hauser, T., Reisch, R. T., Kamps, T., Kaplan, A. F. H., Volpp J.**, (2022). Acoustic emissions in directed energy deposition processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119, 3517–3532. DOI: 10.1007/s00170-021-08598-8.
- 35. Huijjer, A., Kassapoglou, C., Pahlavan, L.**, (2021). Acoustic emission monitoring of carbon fibre reinforced composites with embedded sensors for In-Situ damage identification. *Sensors*, 21, 6926. DOI: 10.3390/s21206926.
- 36. Fevotte, G., Wang, X.J., Ouabbas, Y.**, (2014). Acoustic emission, a new sensor for monitoring industrial crystallization processes. *IFAC Proceedings*, 47, 3, 2727–2733. DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.01478.
- 37. Dang, V.H., Beroual, A., Rozga, P.**, (2022). Fractal dimensions analysis of branching streamers propagating in mineral oil. *Archives of Electrical Engineering*, 71(3), 659–669. DOI: 10.24425/ae.2022.141677.
- 38. Souza, F. C., Franco, S. D., Arencibia, R. V., Leal, J. E. S., Teodoro, E. B., Neto, F. F. R.**, (2020). Acoustic emission assessment of measurement errors caused by gaps in chemical composition analyzes carried out using a portable spark spectrometer. *Measurement*, 151, 107105. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107105.
- 39. Ospitia, N., Korda, E., Kalteremidou, K.-A., Lefever, G., Tsangouri, E., Aggelis, D. G.**, (2023). Recent developments in acoustic emission for better performance of structural materials. *Developments in the Built Environment*, 13, 100106. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100106.
- 40. Guo, J., Shang, H., Cai, G., Jin, Y., Wang, K., Li, S.**, (2023). Early detection of coal spontaneous combustion by complex acoustic waves in a concealed fire source. *ACS Omega*, 8, 19, 16519–16531. DOI: 10.1021/acsomega.3c00199.
- 41. Lievtierov, O. A., Tiutiunyk, V. V., Kalygin, V. D., Olkhovikov, S. V.**, (2017). The use of the effect of acoustic emission for the early detection of ignition of materials containing cellulose the object subsystem of the universal emergency monitoring system in Ukraine. *Prykladna radioelektronika*, 16, 1–2, 23–40. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5938>
- 42. Lievtierov, O. A., Tiutiunyk, V. V., Kalygin, V. D.**, (2017). Methods of identification of the process of combustion of cellulose-containing materials based on the effect of acoustic emission. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 42, 72–84. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/5939> [Accessed: 05 February 2024].
- 43. Lievtierov, O. A., Kalygin V. D., Tiutiunyk V. V.** Pat. 127254 Ukrainy, MPK (2006) A62C 3/00, G01R 29/26 (2006.01), G08C 19/00, G08B 31/00. The method of early detection of the source of ignition. Kharkiv. Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8423> [Accessed: 05 February 2024].
- 44. Levterov, A. A.**, (2019). Acoustic research method for burning flammable substances. *Acoustical Physics*, 65, 4, 444–449. DOI: 10.1134/S1063771019040109.
- 45. Tiutiunyk, V., Kalugin, V., Pysklakova, O., Levterov, A., Zakharchenko, Ju.**, (2019). Development of civil defense systems and ecological safety. *IEEE Problems of Infocommunications. Science and Technology*, 295–299. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061569.
- 46. Tiutiunyk, V. V., Kalugin, V. D., Levterov, A. A., Sydorenko, O. V., Starodubtsev, S. A., Usachov, D. V.**, (2023). Establishing the nature of kinetic effects of the high-temperature oxidation (combustion) process of some liquid organic matters by acoustic radiation. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 6, 203–212. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19622> [Accessed: 05 February 2024].
- 47. Wu, Z., Lou, Y., Yin, S., Wang, A., Liu, H., Sun, W., Zuo, Y., Chen, B.**, (2020). Acoustic and fractal analyses of the mechanical properties and fracture modes of bedding-containing shale under different seepage pressures. *Energy Science and Engineering*, 8, 3638–3656. DOI: 10.1002/ese3.772.
- 48. Yang, H.**, (2017). Fractal analysis of acoustic emission parameter series of coal with different properties under uniaxial loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 81, 012071. DOI: 10.1088/1755-1315/81/1/012071.