

Р.В. КОЛОДНИЦЬКА, В.Б. КРИЖАНІВСЬКИЙ, П.П. МОСКВІН

Житомирський державний технологічний університет

(Вул. Черняхівського, 103, Житомир 10005; e-mail: moskvin\_pp@mail.ru)

## МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВІДБИТКІВ КРАПЕЛЬ РОЗПИЛЕНОГО ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА РІЗНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ

УДК 539.21, 548.5, 620.18

*Реалізовано метод мультифрактального (МФ) аналізу площі поверхні відбитків крапель розпиленого дизельного палива, що отримані на поверхні скляної пластинки, покритої шаром кіптяви. Вхідною інформацією для МФ аналізу слугують фотографічні зображення отриманих відбитків. Знайдено параметри МФ спектрів площі поверхні відбитків в залежності від складу суміші дизельного та біопалива. Показано, що МФ функції системи відповідають своїм канонічним формам, а розроблена числова методика може застосовуватись для кількісних оцінок та аналізу параметрів стану площі просторових фрактальних форм, що утворюються у аерозольній паливно-повітряній системі. Виявлені кількісні взаємозв'язки між параметрами МФ спектрів і хімічним складом розпиленого палива.*

*Ключові слова:* аерозольні системи, крапельні паливно-повітряні суміші, фрактальні стани в розпиленій рідкій фазі, мультифрактальний аналіз.

### 1. Вступ

Вивчення фізичних процесів, які протікають при розпиленні рідини, становить важливий розділ фізики дисперсних станів і спрямоване на дослідження задач конструювання розпиленого крапельно-повітряного середовища із заданими властивостями.

Саме формування при розпиленні рідини оптимального розташування краплин палива в навколишньому повітрі в значній мірі визначає, наприклад, ефективність запалювання та згоряння палива, а, отже, і параметри функціонування двигунів внутрішнього згоряння. Реалізація найбільш сприятливих термодинамічних умов взаємодії краплин палива з окислюючим середовищем дає можливість суттєво впливати на процеси його згоряння та, відповідно, на ефективність використання у двигунах палив різного хімічного складу.

Сукупність крапель розпиленої у повітрі рідини являє собою складну аерозольну систему із специфічними властивостями. Дійсно, аерозольна суміш формується з набору крапель, що мають однакові фізико-хімічні властивості, вона утворюється, як правило, одним джерелом, чи джерелами, які фун-

кціонують в одних і тих самих умовах. Така ситуація неодмінно повинна знайти своє відображення у появі специфічних форм симетрії, властивих усій аерозольній системі в цілому. В цьому відношенні частковим і найбільш простим проявом такого виду симетрії є і те, що її компоненти, краплини в дисперсній суміші, мають геометрично подібні форми.

У той самий час опис простими традиційними математичними виразами складних геометричних форм, які спостерігаються експериментально на мікроскопічних зображеннях розпиленої рідини (хмари крапель, конгломерати крапель, області різної крапельної щільності і т.д.), як правило, виглядає малоперспективним. Однак нехтувати впливом таких складних форм симетрії, а саме фрактальних, на формування остаточних властивостей усїєї аерозолі не є виправданим.

За таких умов корисними стають прийоми фрактального аналізу, на перспективи застосування якого до опису стану розпиленої рідини звертається увага в роботах [1, 2]. Так, у роботі [1] показано, що в розпиленій рідині довжина контуру, проведеного по поверхні рідини, являє собою фрактальну змінну, а сам процес утворення крапельно-повітряної суміші варто розглядати як фрактальний. Наведені міркування відносно використання фрактального аналізу для опису стану

крапельно-повітряної суміші, напевне, можна розглядати як розвиток традиційних способів опису крапельного стану речовини, що базується на використанні методів статистичного аналізу при розрахунках середніх значень діаметрів крапель [3] або даних про їх розподіл [4].

У той самий час використовуючи методи фрактального аналізу до всієї макроскопічної крапельно-повітряної системи як до єдиного цілого, можна отримати корисну інформацію про взаємне розташування крапельних форм у повітряному середовищі. Це дає змогу знайти параметри самоподібного стану крапель речовини або, іншими словами, виявити внутрішню симетрію її аерозольного стану. Саме використання фрактального аналізу відкриває перспективу отримання кількісних характеристик такого багатофазного самоподібного стану з власними видами симетрії.

Природним виглядає припущення про тісний взаємозв'язок значень параметрів, які описують самоподібні стани крапель аерозолі, з термодинамічними властивостями та умовами розпилення рідини, що використовується. Наявність таких кількісних взаємозв'язків відкриває перспективу цілеспрямованого керування параметрами технічних засобів, які створюють розпилений стан речовин.

Серед ефективних підходів до математичного опису властивостей симетрії в складних системах значного розвитку набув мультифрактальний аналіз (МФА) [5–7]. Дійсно, використання усього спектра МФ параметрів до кількісної параметризації складної системи дає можливість повністю описати її стан.

Варто зазначити, що використання з цією ж метою монофрактального аналізу виявляється не таким ефективним. Основною причиною цього є достатньо слабка залежність основного результуючого параметра фрактального аналізу – Хаусдорфової розмірності [6–8] від властивостей та стану об'єкта, що моделюється. Така ситуація з використанням монофрактального аналізу не є неочікуваною. Дійсно, теорія степеневих рядів, яка лежить в основі уявлень про фрактали, передбачає опис системи за допомогою зміни величини показника у степеневих функціях. При цьому ми природним чином стикаємось із ситуацією, коли відносно малі зміни показників ступенів спричинюють суттєві зміни властивостей системи, яка ними описується. Однак, враховуючи статистичний характер поло-

жень фрактального аналізу, усе ж досягти високої точності їх визначення на практиці досить важко. Як наслідок, неминуче знижується точність математичного опису поведінки системи. Саме використання МФА, коли стан системи описується цілим набором функцій, дозволяє позбутись вказаного недоліку монофрактального підходу.

Як приклад застосування мультифрактального аналізу до опису станів аерозольних систем слід вказати роботи [9, 10]. Так, в роботі [10] аналізується хімічний склад атмосфери в містах України та Словенії в різні пори року. Використання типового для фрактального аналізу підходу дозволило отримати рекурсивні залежності відповідних концентрацій атмосферних компонентів та розрахувати МФ параметри аерозольної суміші. В роботі [9] МФ методом аналізується стан повітря в високочистих кімнатах для проведення технологічних робіт з напівпровідникової електроніки. Відомо, що навіть дуже низька концентрація неконтрольованих домішок може суттєво впливати на остаточні параметри напівпровідникових приладів. Припущення, що дуже малі, практично на атомарному рівні, концентрації домішок можуть розглядатися як фрактальні змінні, дозволило авторам цієї роботи використати для опису такого аерозольного стану МФ аналіз та знайти МФ параметри системи. Отримані вказаними авторами результати по застосуванню МФ аналізу для кількісного опису аерозольних сумішей стимулювало застосування цього математичного методу до опису стану крапельної паливно-повітряної суміші.

Тому метою даної роботи є застосування МФА до опису стану крапельно-повітряної суміші та обчислення на його основі МФ спектрів від розпиленої рідини різного хімічного складу. Практична актуальність роботи підтверджується використанням у дослідженнях з розпилення біодизельного палива різного складу. Отримані кількісні дані про МФ параметри для розпиленого палива різного складу дозволять проаналізувати їх взаємозв'язок з умовами формування крапельно-повітряної суміші.

## 2. Реалізація МФА для параметризації розпиленого дизельного палива

Принциповим фрагментом у застосуванні МФА до опису стану розпиленого палива є конкретний ви-

бір того фізичного параметра, який його найбільш повно характеризує і підлягає фрактальній параметризації. На важливість цього етапу розрахунків вказують і автори [9], де для опису змін концентрації домішок в повітрі використані дані про параметри характеристичних спектральних ліній поглинання компонентами аерозолі.

У даній роботі в ролі можливого геометричного параметра системи крапель розпиленої рідини, визначення якого було б інформативним протягом наступних етапів термодинамічного моделювання умов формування дисперсної системи, вибрана видима на фотографіях площа поверхні фрактальних структур. Саме цей параметр системи утворює у наведених розрахунках базову множину міри при реалізації МФА. Чітке виділення фізичного параметра системи дозволить згодом проаналізувати його поведінку залежно від умов розпилення і використати в подальших термодинамічних обчисленнях, наприклад, поверхневої енергії крапельної системи.

Вхідна інформація для проведення МФА площі поверхні розпилених крапель була отримана на основі фотографічних зображень. Основні припущення, які дозволили зв'язати параметри структури на фотографічних зображеннях саме з площею поверхні рідинних утворень, будуть ретельно обговорені у відповідному розділі, де надається опис експериментального обладнання, що використовується. Розроблене нами математичне та програмне забезпечення МФА детально описано в роботі [8], де воно було використане для опису стану поверхні напівпровідникових плівок.

Згідно з методом огрублення розбиттів фрактального аналізу, побудова міри кожної комірки простору здійснювалось розбиттям на  $N$  комірок простору, який оточує базову множину міри. У ролі міри комірки  $\mu_i$  приймалась відносна величина площі поверхні, яка потрапляє в дану комірку розбиття:  $\mu_i = S_i/S$ , де  $S_i$  – площа елементарної площадки,  $S = \sum_{i=1}^N S_i$  – площа всієї досліджуваної поверхні, яка знайдена за даними її просторового фотозображення.

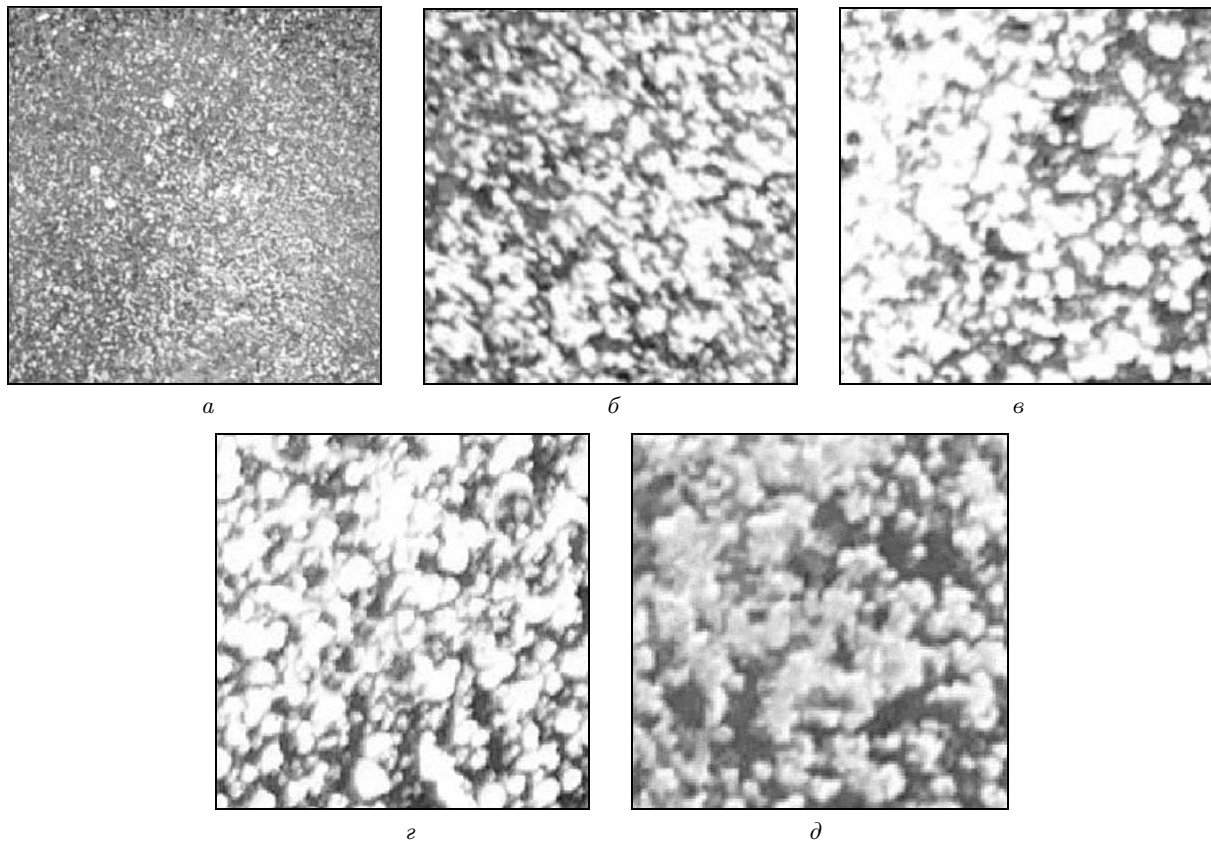
Подальша реалізація методу огрублення розбиттів для обчислення параметрів МФ спектрів здійснювалась за типовою для цього методу процедурою [5–8]. При цьому для комірки заданого розміру формувалась статистична сума  $Z(q, \ell_k) = \sum_{i=1}^k \mu_i^q$ , де  $\ell_k$  – нормована поточна довжина

ребра куба, яка використовувалась на поточному кроці методу огрублення розбиттів,  $q$  – показник, який змінюється в заданих межах під час МФА. Зміна масштабів комірок в розрахунках (збільшення розмірів кубів) здійснювалась згідно з залежністю  $\ell_{k+1} = 2\ell_k$ , ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ).

За наявності в досліджуваній фізичній системі фрактальної симетрії, залежність  $\ln Z(q, \ell_k)$  від  $\ln \ell_k$  являє собою сукупність точок, які групуються вздовж прямих ліній. Для обчислення параметрів лінійної регресії між вказаними параметрами системи використовувався метод найменших квадратів для кожного значення числа  $q$ , яке змінювалось в заданих межах. Дані про коефіцієнти лінійної регресії слугували основою для обчислення всіх функцій, що становлять МФ спектр системи [5–8]. Усі вказані функції були отримані числовим способом. Розроблене обчислювальне забезпечення використовується для аналізу параметрів МФ розподілу площі поверхні відбитків крапель розпиленого палива різного складу, що бомбардує скляну пластинку покриту шаром кіптяви.

### **3. Експериментальна методика**

Експериментальні результати, що слугували вхідною інформацією для проведення МФ аналізу, були отримані за допомогою установки для вивчення процесу розпилення дизельного палива, конструкція і основні характеристики якої такі ж, як і в роботі [4]. Фотографічні зображення, що мають в собі дані за параметрами аерозольної системи, отримувалися на скляних пластинках, поверхні яких було підготовлено наступним чином. Першим шаром, що було нанесено на поверхні скла, був шар окису магнію. Далі поверхня покривалася шаром газової кіптяви товщиною на рівні 0,2 мм. Якщо на поверхню такої пластинки падала крапля палива, то вона пробивала шар кіптяви. Останнє чітко фіксувалося появою на поверхні пластинки білої плями з відповідними геометричними параметрами. Система таких плям і фіксувалася на фотографічному зображенні. Ці дані далі надходили на МФ обробку. Принциповим фрагментом такої методики отримання даних за станом аерозольної системи є формування однорідного за товщиною шару кіптяви. Тому в експериментах підтримувалися однакові умови нанесення шару кіптяви на скляну пластинку в серії отримання фотографічних зображень.



**Рис. 1.** Мікрофотографії відбитків крапель розпиленого палива різного складу, що бомбардували скляну пластинку, поверхня якої покрита шаром кіптяви: *а* – дизельне паливо (ДП):  $D_0 = 2,731$ ,  $\Delta_{80} = 0,426$ ; *б* – суміш 30% метилового ефіру ріпакової олії (МЕРО) та 70% ДП:  $D_0 = 2,618$ ,  $\Delta_{80} = 0,4114$ ; *в* – 50% МЕРО та 50% ДП:  $D_0 = 2,576$ ,  $\Delta_{80} = 0,3585$ ; *г* – суміш 75% МЕРО та 25% ДП:  $D_0 = 2,5989$ ,  $\Delta_{80} = 0,471$ ; *д* – МЕРО:  $D_0 = 2,688$ ,  $\Delta_{80} = 0,445$ . Склад паливної суміші задано в об'ємних відсотках

Не менш критичним параметром при проведенні експериментів є вибір терміну дії (експозиції) крапельного потоку на скляну пластинку. Використаний в установці штормий механізм дозволяв підтримувати час дії крапельного потоку на пластинку сталою величиною в різних експериментах. Термін бомбардування пластинок краплями палива становив 0,02 с.

В конструкції установки використані форсунки від двигуна ЯМЗ-238ДЕ2, тиск впорскування 25 МПа, тиск газу 1 атм. Скляна пластинка, на яку діяв потік краплин палива, була розміщена на відстані 250 мм від сопла форсунки.

Суміші палива різного складу готувались безпосередньо перед експериментом, що дозволило зменшити можливість їх розшарування. Фрагменти отриманих фотографій, які використовувались

при реалізації МФА, зображені на рис. 1. Зазначимо, що крім ретельного контролю за отриманням відбитків крапель палива на скляній пластинці в роботі впродовж проведення експериментів по дослідженню процесу розпилення палива різного складу, умови функціонування установки підтримувалися сталими як за часом, так і за іншими параметрами.

Експерименти по отриманню відбитків крапель для кожного складу дизельного палива повторювалися, як правило, двічі. В той самий час, вкажемо, що для розрахунків МФ спектрів достатньо лише частини фотографії, яка отримана в експерименті. Це пов'язано з можливостями обчислювальної техніки та буде обговорюватися далі. Як правило, в розрахунках використовувалися центральні частини фотографії. Досвід виконаних розрахун-

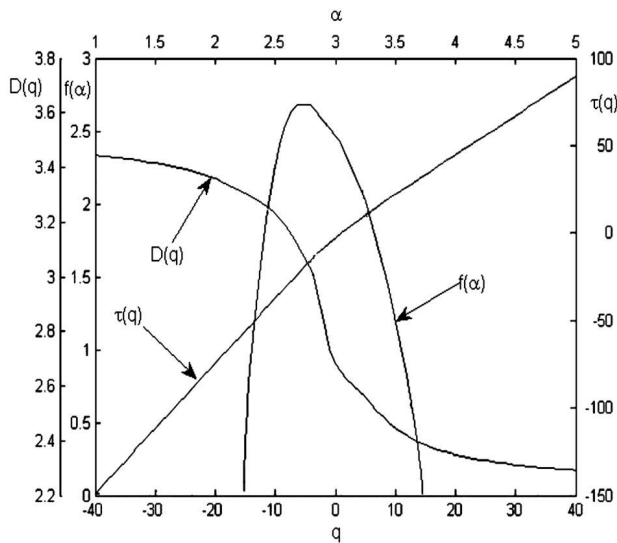


Рис. 2. Характеристичні функції МФ аналізу  $D(q)$ ,  $f(\alpha)$ ,  $\tau(q)$  для зображення, поданого на рис. 1, а

ків показав, що зміна положення, вибраного для розрахунків фрагмента фотографії, призводить до зміни параметрів отриманого МФ спектра. Відповідно до досвіду розрахунків, варіація величин чисел Реньї в даному випадку не перевищувала 0,02. Ця величина була вибрана в ролі кількісної оцінки похибки вказаних параметрів.

Зрозуміло, що фотографічне зображення відбитків дії крапель, що отримані за описаною методикою, відображають миттєвий стан крапельної системи за вибраним перерізом потоку крапель. Параметри відбитків від дії краплі на поверхневий шар скляної пластинки залежать, як мінімум, від геометричних форм крапель та швидкості їх руху. В той самий час у виконаних експериментах термін формування зображення на пластинці (термін дії крапель) вибрано досить малим. Якщо припустити, що швидкості руху основної маси крапель в умовах експерименту все ж не дуже значно відрізняються від свого середнього значення, то з'являється підстава, згідно з якою зі значною долею ймовірності можна стверджувати, що форма відбитків, в першу чергу, відображає геометрію крапель, які їх сформували. Тому при виконанні розрахунків площ плям на фотозображенні, отримані дані слід інтерпретувати як площі поверхонь краплин.

У ролі найбільш інформативних МФ параметрів, що описують структуру поверхні, у відпо-

відності з рекомендаціями [6, 7] були вибрані числа Реньї та параметр впорядкованості  $\Delta_{q \rightarrow \infty} = D_1 - D_{q \rightarrow \infty}$  (міра порушення фрактальної симетрії). У розрахунках даної роботи типове значення параметра  $q$  не перевищувало  $q = 80$ . Виконані обчислення показали, для отриманих у роботі зображень, які містять не більше  $256 \times 256$  пікселів, збільшення параметра  $q$  більше 80 спричинювало зміну значень кожного наступного числа Реньї  $D_{q+1}$  менше, ніж на  $10^{-4}$ . Вкажемо, що збільшення кількості пікселів фотографічного зображення, що приймалося до уваги при виконанні МФ розрахунків, більш  $256 \times 256$  призводило до значного збільшення часу виконання розрахунків. У той же час така ситуація дуже мало впливала на остаточні значення чисел Реньї. Досвід виконання розрахунків зі збільшеною кількістю пікселів у зображенні довів, що така процедура приводить до змін значень чисел Реньї не більше, ніж на 0,01. Остання величина менша, ніж похибка, пов'язана з вибором місця на фотографії для подальшого аналізу.

#### 4. Результати та їх обговорення

Описаний вище підхід дозволив виконати розрахунки МФ спектрів та параметрів для зображень, поданих на рис. 1. Обчислення характеристичних функцій МФА ( $\tau(q)$ ,  $f(\alpha)$ ,  $D(q)$  відповідно до [5–7]) показали, що вони відповідають своїм канонічним формам. Це означає, що послідовність чисел Реньї є спадною, а функція  $f(\alpha)$  має характерний максимум. Типовий вигляд характеристичних функцій МФ аналізу для випадку зображення відбитків від крапель дизельного палива (ДП) наведено на рис. 2.

Зазначимо, що при обробці зображень крапельно-повітряної суміші, сформованих паливом різного складу, не було отримано жодного результату, який би забезпечував отримання псевдоспектра. Згідно з [6] для таких спектрів характерно  $D_0 \leq D_1 \leq \dots \leq D_q$ , тобто послідовність чисел Реньї є зростаючою, а функція щільності ймовірності для фрактальних розмірностей  $f(\alpha)$  має явно виражений мінімум.

На рис. 3, для прикладу, зображені типові залежності статистичних сум  $Z(q, \ell_k)$  від приведеної довжини  $\ell_k$  ребра куба комірки для кількох  $q$  у методі огрублення розбиттів. Представлені дані

відносяться до обробки зображення на рис. 1, а. Числовий вигляд функцій  $Z(q, \ell_k)$  для інших зображень на рис. 1, як і очікувалось, виявляється подібними, хоча кількісні значення інші.

Дані рис. 3 доводять, що експериментальні дані групуються вздовж відповідних прямих ліній. Найбільший розкид відносно прямої лінії мають експериментальні результати, що відносяться до  $q = -3$ . Ці дані вибрано для ілюстрації того, що далеко не для всіх значень числа  $q$  вказані закономірності виявляються дуже чітко. В той самий час, типові значення коефіцієнтів кореляції у методі найменших квадратів для вказаного випадку та взагалі для значень  $q < 4$ , як правило, перевищувало 0,9. Достатньо високі значення кореляційних коефіцієнтів дозволяють стверджувати, що саме МФ, а не монофрактальний спектр є типовим для даних крапельно-повітряних дисперсних систем і саме МФ параметри системи слід використовувати для повного опису стану розпиленого палива.

Відомо, найбільш інформативним в МФА є числа Реньї для  $q = 0, 1, 2$  [5–7]. У той самий час порівняльний аналіз чисел Реньї, отриманих у даній роботі для вказаних  $q$ , показує, що ці величини слабо відрізняються одна від одної. Зокрема, для зображення на рис. 1, а (дизельне паливо) отриманий такий набір чисел Реньї:  $D_0 = 2,731$ ,  $D_1 = 2,703$  і  $D_2 = 2,672$ . Тому враховуючи статистичну основу МФА та, відповідно, точність визначення вказаних величин, можна припустити можливість використання кожного з цих параметрів у подальших порівняльному та термодинамічному аналізах. Зазначимо, що така ситуація не суперечить теоретичним положенням МФА [5–7], але априорі все ж припускалось, що різниці між числами Реньї  $D_0$ ,  $D_1$  і  $D_2$  будуть більш вагомими.

На даному етапі розрахунків таку ситуацію можна пояснити використанням у методі огрублення розбиттів початково малих за розмірами комірок, які навіть при  $q = 0$ , непогано параметризують поверхню розпиленої рідини. Також зазначимо, що самі величини узагальнених чисел Реньї  $D_0$ ,  $D_1$  та  $D_2$  за величиною суттєво перевищують 2. Такий результат відповідає поставленій задачі про опис розмірності площі поверхні, яка є суттєво розпушеною та неплоскою на мікрорівні.

Отримані кількісні дані про МФ параметри розпиленого палива дозволяють здійснити пошук їх

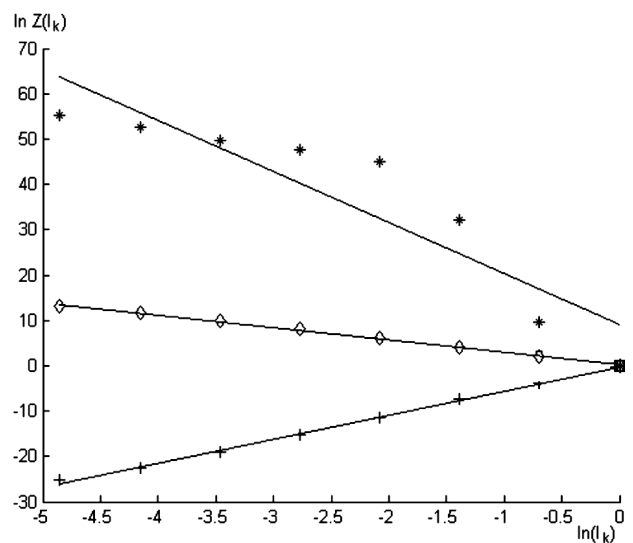


Рис. 3. Залежність статистичних сум  $Z(q, \ell_k)$  від нормованої довжини куба  $\ell_k$  для зображення, поданого на рис. 1, а. Точки з позначками \*, ◇, + відповідають значенням  $q = -3, 0, 3$

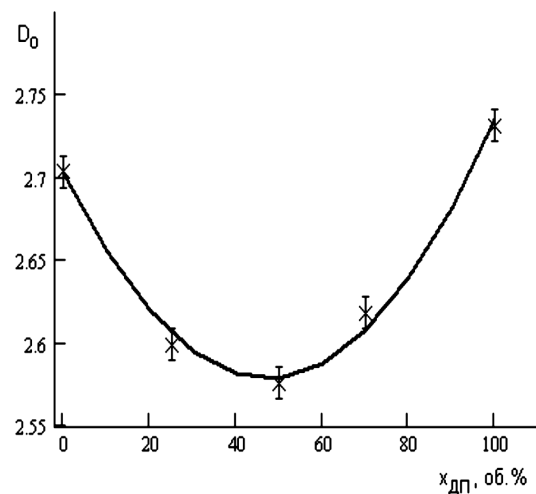
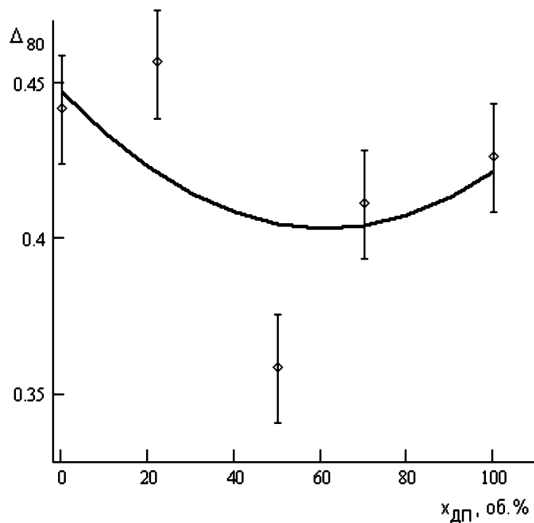


Рис. 4. Залежність чисел Реньї  $D_0$  від об'ємного відсотка дизельного палива в паливній суміші дизельного палива з метиловим ефіром рапсової олії. Експериментальні дані даної роботи позначені символом ×

взаємозв'язків зі складом палива як компонентами дисперсного середовища. Сукупність таких взаємозв'язків між числом Реньї  $D_0$ , параметром упорядкованості  $\Delta(q = 80)$  та складом палива зображені на рис. 4, 5. Важливим аспектом отриманих даних є той факт, що МФ параметри системи отри-



**Рис. 5.** Залежність параметрів упорядкування  $\Delta_{80}$  від об'ємного відсотка дизельного палива в паливній суміші дизельного палива з метиловим ефіром рапсової олії. Символом  $\diamond$  позначені експериментальні дані даної роботи

мані за однакових умов розпилення палива та на одному і тому самому устаткуванні.

Різні значення МФ параметрів для розпилення палива різного складу відображають відмінності між внутрішньою структурою та симетрією крапельно-повітряної суміші, яку сформувала використана технічна система. Так, дані на рис. 4, 5 демонструють наявність стійких зв'язків між МФ параметрами системи та складом використаного палива. Зокрема, на рис. 4 проілюстровано залежність числа Реньї  $D_0$  від складу розпиленого палива. Результати розрахунків показують, що розмірність площі поверхні розподілу фаз газ-система краплин палива в досліджуваній дисперсній системі досягає мінімального значення для рівнодольних складів паливної суміші, що розпилюється. На практиці такий результат означає, що змішування біодизельного палива з дизельним в однакових пропорціях спричинює зменшення можливої площі контакту крапель палива з повітряним середовищем, тобто зменшує розпушеність системи крапля-навколишнє повітря. Виникнення такої ситуації при додаванні біопалива до дизельного необхідно враховувати при забезпеченні оптимальних умов згоряння останнього.

На рис. 5 подано результат обчислень параметра фрактального впорядкування в крапельно-

повітряній суміші залежно від складу розпиленого палива. Обчислення показують, що залежність параметра фрактального впорядкування, так само як для числа Реньї  $D_0$ , має екстремальний характер. З рис. 5 випливає, що у цілому додавання біопалива в дизельне спричинює стиск МФ спектра системи, що свідчить про прагнення дисперсного середовища, утвореного сумішшю приблизно рівних частин початкових компонент, сформувати більш впорядковану монофрактальну структуру. Можна припустити, що ускладнення складу палива за рахунок додавання до нього додаткових компонент спричинює зростання загальної ентропії рідкої фази через зростання її комбінаційної складової. Останнє знайшло своє відображення в зміні властивостей симетрії структури. На користь останнього твердження говорить відоме з МФА положення про зв'язок між числом Реньї  $D_1$  та ентропією системи [5–7].

Отримані результати застосування МФА до опису стану крапельно-повітряної суміші показують, що вихідна кількісна інформація, отримана із таких розрахунків, може бути використана як для математичного опису стану даної системи, так і для спрямованого управління її властивостями.

## 5. Висновки

Таким чином, у роботі описані результати застосування мультифрактального аналізу до обробки зображень відбитків дії крапель паливно-повітряних сумішей, утворених шляхом розпилення дизельного палива різного хімічного складу. Відбитки крапель палива отримані на поверхні скляної пластинки, що покрита шаром кіптяви. Розраховано та проаналізовано параметри мультифрактальних спектрів в аерозольних системах, які сформовані розпиленням паливом різного складу. Показано, що числа Реньї і параметри неупорядкованості знаходяться в тісній кореляції з хімічним складом дизельного палива, яке формує крапельно-повітряну суміш.

1. S. Grout, C. Dumouchel, J. Cousin, and H. Nuglisch, *Int. J. Multiphase Flow* **33**, 1023 (2007).
2. C. Dumouchel, *Exp. Fluids* **45**, 371 (2008).
3. S. Sazhin, M. Qubeissi, R. Kolodnytska *et al.*, *Fuel* **115**, 559 (2014).
4. А.В. Иващенко, В.Н. Горячкин, *Двигатели внутреннего сгорания* **2**, 41 (2011).

5. Е. Федер, *Фракталы* (Мир, Москва, 1991).
6. Г.В. Встовский, А.Г. Колмаков, И.Ж. Бунин, *Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов* (Центр “Регулярная и хаотическая динамика”, Москва, 2001).
7. С.В. Божокин, Д.А. Паршин, *Фракталы и мультифракталы* (НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Ижевск, 2001).
8. П.П. Москвин, В.Б. Крыжановский, Л.В. Рашковецкий, П.М. Литвин, Н.В. Вуйчик, *Журн. физич. химии* **88**, (7–8), 1194 (2014).
9. S. Klement, J. Nittman, K.W. Kratky, and W.P. Acito, *Aerosol Sci. Technol.* **20**, 100 (1994).
10. V.D. Rusov, R. Pic, R. Jacimovic, V.N. Pavlovich, Y.A. Bondarchuk *et al.*, *Atmosph. Climate Sci.* **1**, 120 (2011).

Одержано 02.08.15

*Р.В. Колодницкая, В.Б. Крыжановский, П.П. Москвин*

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЛЕДОВ  
УДАРОВ КАПЕЛЬ РАСПЫЛЕННОГО ДИЗЕЛЬНОГО  
ТОПЛИВА РАЗНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

## Резюме

Реализован метод мультифрактального (МФ) анализа площади поверхности следов ударов распыленного дизельного топлива, которые сформированы на поверхности закопченной стеклянной пластинки. Входной информацией для МФ анализа служили фотографические изображения этих следов. Найдены параметры МФ спектров площади поверх-

ности следов в зависимости от состава смеси дизельного и биотоплива. Показано, что МФ функции системы соответствуют своим каноническим формам, а разработанная вычислительная методика может применяться для количественных оценок и анализа параметров состояния площади пространственных фрактальных форм, образующихся в аэрозольной топливно-воздушной системе. Найдены количественные взаимосвязи между параметрами МФ спектров и химическим составом распыленного топлива.

*R. V. Kolodnytska, V. B. Kryzhanivskyy, P. P. Moskvina*

MULTIFRACTAL ANALYSIS OF MARKS  
LEFT BY DROPLETS OF DISPERSED DIESEL FUELS  
WITH VARIOUS CHEMICAL COMPOSITIONS

## Summary

The multifractal analysis of the photos of droplet marks left by droplets of dispersed diesel fuels on the surface of a glass plate covered with a soot layer is performed. The dependences of the parameters for the multifractal spectra of mark areas on the component ratio in a mixture of diesel fuel and biofuels are found. The correspondence of the multifractal characteristics to their canonical forms is demonstrated. The developed numerical method can be used for the quantitative evaluation and analysis of the parameters characterizing the spatial fractal forms generated in air-fuel aerosols. Quantitative relationships between the parameters of multifractal spectra and the chemical composition of dispersed fuels are revealed.