

PACS number: 52.70.Ds

## ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ЗОБРАЖЕНЬ РІДИННО-ФАЗНИХ ОБ'ЄКТІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ГАЗОРОЗРЯДНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

*А.Б. Завгородній, Л.Д. Писаренко*

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
вул. Політехнічна, 16 корп.12, 03056, Київ-56, Україна  
E-mails: [komeska@mail.ru](mailto:komeska@mail.ru); [pisarenko@edd.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:pisarenko@edd.ntu-kpi.kiev.ua)

*Проведено аналіз параметричних методів оцінки зображень, отриманих методом газорозрядної візуалізації (ГРВ). Запропоновано нові кількісні параметри для визначення геометричних та фрактальних властивостей ГРВ-грам рідиннофазних об'єктів. Наведено модифікований алгоритмізований механізм їх розрахунку.*

**Ключові слова:** ЕФЕКТ КІРЛІАН, ГАЗОРОЗРЯДНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ (ГРВ), РІДИННО-ФАЗНИЙ ОБ'ЄКТ, ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ, ФРАКТАЛ.

*(Одержано 15.03.2010, у відредагованій формі – 22.04.2010)*

### 1. ВСТУП

В арсеналі сучасної науки наявність чисельних діагностично-метрологічних методів та методик пояснюється різноманіттям базових фізичних принципів та явищ, на яких вони ґрунтуються. В основу методу газорозрядної візуалізації (ГРВ), який знайшов свої застосування в медико-біологічній та фізико-технічній практиці, покладено можливості отримання інформації про внутрішні структурні, топологічні, енергетичні та інші властивості об'єктів шляхом аналізу фото та/чи відео зображень приповерхневого свічення газового розряду в електричних полях високої напруженості. Але широкому впровадженню ГРВ заважає її описово-якісний характер, який за відсутності чітких кількісних характеристик, не дозволяє уникнути довільного трактування дослідниками результатів експериментів.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Основною метою статті є огляд особливостей окремих вживаних кількісних параметрів ГРВ-грам та аналіз перспектив їх застосування, в першу чергу, в контексті роботи з рідиннофазними об'єктами. В роботі запропоновано декілька нових параметрів, які дозволяють більш детально аналізувати кількісні характеристики рідиннофазних об'єктів дослідження: технічних, біотехнічних та біологічних рідин. Інформаційна цінність та незалежність кожного з параметрів визначається методом кореляційного аналізу експериментальних даних, накопичених при виконанні роботи.

### 3. КЛАСИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ГРВ-ГРАМ

Аналіз зображення полягає у вивченні особливостей окремих характеристик, складових частин, фрагментів або окремих об'єктів у полі зображення. На цей час в науковій літературі відсутнє однозначне

визначення терміну «аналіз зображення». В нашому випадку під аналізом зображення ми будемо розуміти вимірювальний аспект обробки фото- чи відеоданих. Відповідно, аналіз зображення буде полягати у визначенні певних кількісних параметрів зображення.

Формальною моделлю півтонового зображення є двовимірна матриця  $\|B_{ij}\|$  де  $i = 1, 2, 3, \dots, X$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, Y$ ;  $X, Y$  – розміри зображення, а кожний елемент характеризується яскравістю  $B_{ij}$ .

Під час цифрової обробці відбувається квантування яскравості зображення, тобто функція  $B_{ij}$  приймає значення тільки зі скінченного набору чисел  $\mathbf{B}_{ij} = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$ . В нашому випадку  $\mathbf{B}_{ij} = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$   $\mathbf{B}_{ij} = \{1, 2, \dots, 225\}$ . Мінімальним складовим елементом зображення є піксел. Він може бути пустим (фон) або значущим (той, що містить елемент зображення).

В роботі [1] запропоновано всю сукупність кількісних параметрів ГРВ-грам розділити на групи: інтегральні, спектральні, фрактальні, структурні та динамічні параметри.

У зв'язку з появою нового напрямку в цій сфері – динамічної ГРВ-графії (див. роботу [2]), можна виділити ще одну групу параметрів:

#### 4. ІНТЕГРАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ

##### 4.1 Площа засвіти зображення (площа почорніння фотопластини).

Значення цього параметру обчислюється за формулою:

$$S = \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y p_{ij}$$

де  $p_{ij} = 1$  якщо  $b_{ij} > L$  (яскравість певного елемента перевищує наперед задане порогове значення яскравості фону), або ж  $p_{ij} = 0$  якщо  $b_{ij} \leq L$  (яскравість елемента не перевищує порогового значення яскравості фону),  $X, Y$  – розміри матриці  $\|B_{ij}\|$ .

Інформаційна цінність цього параметру неодноразово доведена в ряді публікацій [2-4]. Однак слід зауважити, що цей параметр значною мірою залежить від площі поверхні контакту та довжини лінії контуру досліджуваного об'єкту. Саме тому використання площі засвіти при порівнянні твердофазних об'єктів з різними геометричними формами та/чи розмірами, що відзначають окремі автори (див. наприклад [1]), значно знижує, а в деяких випадках і повністю нівелює інформаційну цінність цього параметру.

У випадку роботи з рідинно-фазними об'єктами рівність величини площі поверхні контакту та довжини контуру у різних зразків досягається шляхом точного дозування досліджуваної рідини за допомогою пікет-дозаторів. Але важливим аспектом, який необхідно враховувати при роботі з такими об'єктами, це факт змочування/незмочування досліджуваним об'єктом поверхні електроду (див. рис. 1):

Кількісним критерієм змочування є крайовий кут змочування, який визначається як

$$\cos \theta = (\sigma_{TG} - \sigma_{TP}) / \sigma_{PG},$$

де  $\sigma_{TG}$  – поверхневий натяг твердого тіла на границі з газовим середовищем;  $\sigma_{TR}$  – поверхневий натяг рідини на границі з твердим тілом;  $\sigma_{RG}$  – поверхневий натяг рідини на границі з газовим середовищем.

Розрізняють наступні ступені змочування:

- при  $\cos \theta = 1$ ,  $\theta = 0$  – повне змочування поверхні електроду;
- при  $1 > \cos \theta > 0$ ,  $0 < \theta < 90^\circ$  часткове змочування (зазвичай  $30^\circ < \theta < 40^\circ$ );
- при  $\cos \theta = 0$ ,  $\theta = 90^\circ$  – незмочування (капля збирається у кульку).

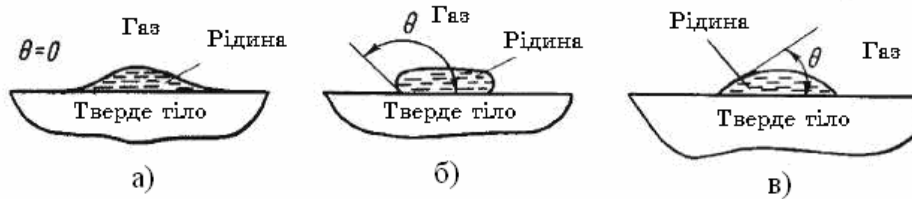


Рис. 1 – Положення краплі рідини на поверхні електроду: повне змочування (а); незмочування (б) та часткове змочування (в)

Враховуючи вищесказане, а, також, лінійну залежність площі засвіти зображення від площі контакту та довжини контуру, досить неважко зробити відповідну поправку при аналізі рідин з різними крайовими кутами змочування електроду.

#### 4.2 Дисперсія площі засвіти зображення

Параметр розраховується для серії з  $n$  дослідів за формулою:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2$$

де  $S_i$  – величина площі засвіти зображення в кожному досліді;  $\bar{S}$  – математичне очікування площі засвіти зображення.

Використання значення дисперсії площі засвіти зображення саме в якості окремого інформаційного параметру вперше пропонується в цій роботі. До цього згадки про дисперсію площі засвіти, які можна знайти, наприклад, в роботах [1, 2], зустрічаються тільки в контексті визначення точності при обчисленні самої площі засвіти. В якості окремого інформаційного параметру значення дисперсії не вживалось. Однак результати кореляційного аналізу залежності дисперсії площі засвіти ГРВ-грами для різних розчинників (див. таблицю 1) дозволяють встановити однозначний взаємозв'язок між цими двома параметрами, що може служити в якості одного з критеріїв оцінки при компонентному аналізі рідиннофазних об'єктів.

**4.3 Довжина периметру області засвітки**

Параметр, що визначає довжину обвідної розгортки найбільшої плями засвіти. Для отримання значення цього параметра зображення розбивається на окремі плями засвіти, після чого визначається площа засвіти  $S$  кожної з них та обирається найбільша. При цьому важливо перевірити виконання умови  $S_{max} \gg S_{other}$ , що є необхідним компонентом при роботі з цим параметром. Для безпосереднього обчислення значення параметру можна скористатися різними алгоритмами, наведеними, наприклад, в [1], [5].

Якщо обмежити область обчислення значення параметра границями найбільшої плями засвіти, розподілити усі пікселі цієї плями на дві категорії: граничні (ті, що межують з пікселями фону) та внутрішні (ті, що межують тільки з пікселями зображення), то довжину периметру області засвіти можна визначити за формулою:

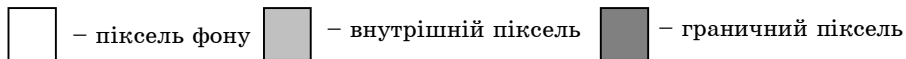
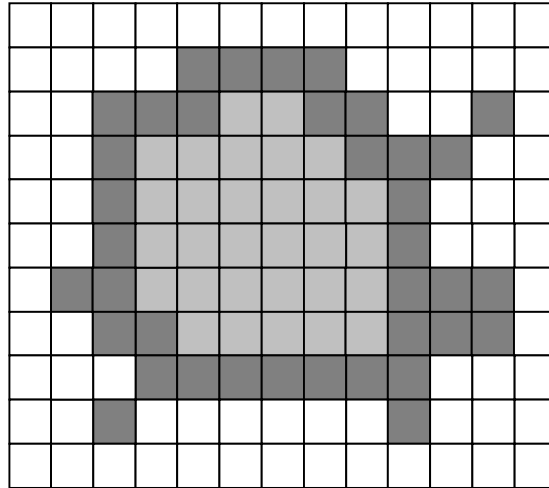
**Таблиця 1 – Результати кореляційного аналізу залежності дисперсії площі засвіти ГРВ-грами для різних розчинників**

	H <sub>2</sub> O	NaCl (0,9% водний розчин/ фізіологічний розчин)	NaCl (1% водний розчин)	NaCl (2% водний розчин)	KCl (1% водний розчин)	KCl (2% водний розчин)	KOH (1% водний розчин)	KOH (1% водний розчин)	NH <sub>4</sub> Cl (2% водний розчин)	NH <sub>3</sub> (25% водний розчин/ аміачна вода)	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> CaO <sub>14</sub> (1% водний розчин)	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> (1% водний розчин)	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> (5% водний розчин)	KNO <sub>3</sub> (5% водний розчин)
H <sub>2</sub> O	-	0,67	0,64	0,59	0,51	0,49	0,59	0,59	0,5	0,32	0,54	0,81	0,19	0,17
NaCl (0,9% водний розчин/ фізіологічний розчин)	0,67	-	0,78	0,62	0,61	0,6	0,51	0,51	0,45	0,31	0,27	0,72	0,21	0,39
NaCl (1% водний розчин)	0,64	0,78	-	0,64	0,61	0,59	0,48	0,61	0,5	0,33	0,29	0,61	-0,01	-0,21
NaCl (2% водний розчин)	0,59	0,62	0,64	-	0,55	0,68	0,51	0,48	0,61	0,29	0,51	0,54	0,21	0,09
KCl (1% водний розчин)	0,51	0,61	0,61	0,55	-	0,68	0,52	0,61	0,51	0,3	0,47	0,6	-0,3	-0,14
KCl (2% водний розчин)	0,49	0,6	0,59	0,68	0,68	-	0,54	0,49	0,59	0,33	0,4	0,49	0,45	0,23
KOH (1% водний розчин)	0,59	0,51	0,48	0,51	0,52	0,54	-	0,41	0,49	0,29	0,37	0,55	-0,13	-0,25
NH <sub>4</sub> Cl (1% водний розчин)	0,59	0,51	0,61	0,48	0,61	0,49	0,41	-	0,53	0,27	0,44	0,31	0,01	0,01
NH <sub>4</sub> Cl (2% водний розчин)	0,5	0,45	0,5	0,61	0,51	0,59	0,49	0,53	-	0,3	0,43	0,41	-0,09	0,09
NH <sub>3</sub> (25% водний розчин/ аміачна вода)	0,32	0,31	0,33	0,29	0,3	0,33	0,29	0,27	0,3	-	0,21	0,71	0,21	0,11
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> CaO <sub>14</sub> (1% водний розчин)	0,54	0,27	0,29	0,51	0,47	0,4	0,37	0,44	0,43	0,21	-	0,64	0,17	-0,22
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> (1% водний розчин)	0,81	0,72	0,61	0,54	0,6	0,49	0,55	0,31	0,41	0,71	0,64	-	-0,15	0,23
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> (5% водний розчин)	0,19	0,21	-0,01	0,21	-0,3	0,45	-0,13	0,01	-0,09	0,21	0,17	-0,15	-	-0,24
KNO <sub>3</sub> (5% водний розчин)	0,17	0,39	-0,21	0,09	-0,14	0,23	-0,25	0,01	0,09	0,11	-0,22	0,23	-0,24	-

$$l = \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y p_{ij},$$

де  $p_{ij} = 1$  якщо вказаний піксель є граничним, або ж  $p_{ij} = 0$  якщо піксель належить до внутрішніх,  $X, Y$  – розміри матриці  $\|B_{ij}\|$ . Модифікація відомих [1], [5] алгоритмів в роботі пропонується вперше.

Графічний приклад застосування модифікованого алгоритму наводиться на рис. 2.



*Рис. 2 – Приклад виділення границь зображення*

#### 4.4 Коефіцієнт активності засвіти

Значення параметру визначається як відношення площі засвіти до площі проекції краплі рідини на поверхню електроду. Величину останньої можна отримати за допомогою згаданого вище алгоритму обчислення площі фотозображення краплі досліджуваної рідини безпосередньо перед початком ГРВ-аналізу, або шляхом теоретичних розрахунків за методикою, наведеною в [6]. Новий параметр, який пропонується ввести для аналізу ГРВ-грам рідиннофазних об'єктів, для опису емісійних властивостей поверхні, що можуть виступати відображенням певних внутрішніх фізико-хімічних, структурних, енергетичних та ряду інших властивостей об'єкту (наприклад, концентрація розчину, наявність певних домішок в технічних та біологічних рідинах та ін.).

## 5. СПЕКТРАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ

### 5.1 Ширина спектру яскравості

Визначається як різниця яскравостей найяскравішого та найтемнішого пікселів плями засвіти (ця величина зазвичай задається пороговим рівнем фону, обраним в системі), або самого яскравого та самого темного пікселів зображення загалом. В такому випадку величину яскравості останнього зазвичай буває близькою до нуля.

## 5.2 Інтегральна яскравість плями засвіти

Для визначення цього параметру необхідно виділити в окремий одномірний масив  $\|A_i\|$  усі елементи з двомірної матриці яскравостей  $\|B_{ij}\|$ , для яких  $b_{ij} > L$  (яскравість певного елемента перевищує наперед задане порогове значення яскравості фону). Обчислення інтегральної яскравості ведеться за наступною формулою:

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i,$$

де  $N$  – кількість ненульових (значущих) елементів в масиві  $\|A_i\|$ . Слід зауважити, що в роботах деяких авторів (див. наприклад [1]) пропонується застосування цього параметру до всього зображення повністю, а не лише до плями засвіти. Однак в такому випадку очевидна його залежність від величини самого об'єкту дослідження, розмірів фотофіксуючого елемента (ПЗЗ матриці чи іншого) та ряду інших факторів. Це унеможливує порівняння даних за цим параметром, отриманих для об'єктів різних розмірів чи на різному обладнанні.

## 6. ФРАКТАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ

### 6.1 Фрактальність за Мандельбротом

Параметр, який вперше зустрічається в роботі [1], визначається як відношення периметрів зображення свічення при різних масштабах зображення. При використанні алгоритму, запропонованого в цій роботі значення цього параметру завжди дорівнюватиме 1 та не нестиме інформаційного навантаження. Однак в роботі [1] приводиться інша методика обчислення периметру зображення: за допомогою масиву радіусів ліній, обвідних зображення. В такому випадку дійсно можливі девіації показнику фрактальності. Однак досить сумнівним є факт їхньої інформаційної цінності, оскільки природою цих девіацій служать не певні внутрішні властивості, притаманні самому об'єкту, а сам процес отримання та обробки цифрового зображення.

### 6.2 Коефіцієнт форми зображення.

Параметр визначається як відношення квадрату довжини периметру області засвіти до загальної площі свічення [1]. Параметр характеризує, в першу чергу, емісійні властивості поверхні досліджуваної рідини, які впливають на ширину „корони” навколо контурів об'єкту. Значення цього параметру досить сильно корелюють з показником відносної діелектричної проникності об'єктів. Наприклад, значення коефіцієнту кореляції відносної діелектричної проникності для вибірки з 8 речовин ( $N_2$ ,  $NH_3$ ,  $C_3H_6O$ ,  $H_2O$ ,  $H_2SO_4$ ,  $CH_2O_2$ ,  $C_2H_6O$ , фізіологічний розчин) складає близько 0,7. Дані по відносній діелектричній проникності цих рідин взяті з [7, 8].

## 7. СТРУКТУРНІ ПАРАМЕТРИ

В окремих випадках для зручності цифрової обробки, передачі та аналізу ГРВ-грам необхідно задавати отримане зображення не в піксельному

(растровому) вигляді, а переходити до функціонального (векторного) формату. Це можна зробити кількома способами: задати обвідну функцію контуру у вигляді матриці, або поліному, як це пропонується в роботі [1]; визначити аналітично, як тривимірну поверхню, матрицю розподілу яскравостей  $\|B_{ij}\|$ . Слід розуміти, що перший підхід є допоміжним і він не може застосовуватися окремо, оскільки в результаті цієї процедури втрачається частина інформації, що міститься в початковій матриці.

Для опису функцій, отриманих за допомогою будь-якого з вищенаведених способів звичайно використовують стандартні процедури теорії ймовірності: розрахунки математичного очікування, дисперсії та вищих центрованих моментів.

За аналогією з інформаційною ентропією можна визначити ентропію наступним чином:

$$E = k \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y b_{ij} \log_2 b_{ij},$$

а для функції заданої всією матрицею загалом, чи окремо для матриці-функції контуру:

$$E = k \sum_{i=1}^L l_i \log_2 l_i.$$

В обох випадках ентропія характеризуватиме ступінь хаотичності системи по розглянутому параметру.

Автокореляційна функція виступає характеристикою регулярності процесу, яку можна визначити за формулою:

$$c(u) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-u} (x_t - \bar{x})(x_{t+u} - \bar{x}),$$

де

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t.$$

Автокореляційна функція може використовуватися як по відношенню до функції яскравостей лінії контуру, так і до інших компонентів плями засвіти.

## 8. ДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ

### 8.1 Динамічна дисперсія площі засвітки.

На цей час основним інформаційним параметром ГРВ-грам є площа засвіти. Як було відзначено вище, застосуванню цього параметру в *статичній* ГРВ-графії присвячена найбільша кількість робіт. Доведено [3, 9] зв'язок параметру площі засвіти з багатьма внутрішніми характеристиками об'єктів. Саме тому можна очікувати певних результатів від дослідження зміни параметру площі засвіти з часом. З цією метою в роботі пропонується новий параметр – динамічна дисперсія площі засвіти, що визначається за формулою:

$$\sigma(t) = \sum_{t=1}^n (S(t) - S_0),$$

де  $S(t)$  – величина площі засвіти в кожний конкретний момент часу;  $S_0$  – величина площі засвіти в початковий момент часу (перший кадр).

### 8.2 Інкремент часового зростання динамічної дисперсії площі засвітки

Параметр, що визначає швидкість росту параметру дисперсії площі засвітки, можна визначити за формулою:

$$\delta = \ln \sigma_1 / \sigma_2,$$

де  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$  – значення дисперсії площі засвіти в різні моменти часу через певний, наперед заданий часовий інтервал.

Відомо, що при виникненні газового розряду між електродом та досліджуванним об'єктом однією електронною лавиною переноситься заряд порядку  $10^{-10} \div 10^{-12}$  Кл та енергія  $10^{-7} \div 10^{-9}$  Дж [9]. Ця енергія розподіляється по всьому об'єму досліджуваного об'єкту і викликає його часткове випаровування або згорання. В статичній ГРВ-графії, коли час експозиції не перевищує кількох секунд цим ефектом можна знехтувати. Однак при використанні динамічного підходу саме застосування параметру інкременту для аналізу рідиннофазних об'єктів дає змогу визначити питому теплоту пароутворення (питому теплоту згорання) для об'єкту дослідження, що може бути використано в компонентному аналізі, при визначенні енергетичної цінності продуктів та інше.

## 9. ВИСНОВКИ

1. Наведено класифікацію та призначення основних кількісних параметрів аналізу ГРВ-грам фізичних (зокрема, рідинно-фазних) об'єктів, подано аналіз перспектив їх застосування.
2. Запропоновано модифікований алгоритм обчислення окремих кількісних характеристик для визначення геометричних та фрак-тальних властивостей зображень (ГРВ-грам) рідинно-фазних об'єктів.
3. Запропоновано нові кількісні параметри для аналізу зображень (ГРВ-грам) рідиннофазних об'єктів.
4. Показано, що застосування параметрів дисперсії площі засвіти, коефіцієнту активності засвіти, динамічної дисперсії площі засвіти, інкременту часового зростання дисперсії площі засвіти дозволяє проводити кількісний аналіз статичних та динамічних ГРВ-грам та визначати ряд характеристик досліджуваного об'єкту, які важко або неможливо отримати іншими фізичними методами.
5. Отримані результати є певним кроком на шляху вирішення проблеми дослідження інформаційних властивостей фізичних (зокрема, рідинно-фазних) об'єктів.

### PARAMETRIC ANALYSIS OF THE LIQUID-STATE OBJECTS IMAGES OBTAINED BY GAS DISCHARGE VISUALIZATION METHOD

*A.B. Zavgorodniy, L.D. Pysarenko*

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",  
16, Polytehnichna Str., build.12, 03056, Kiev-56, Ukraine  
E-mails: [komeska@mail.ru](mailto:komeska@mail.ru); [pisarenko@edd.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:pisarenko@edd.ntu-kpi.kiev.ua)



*Analysis of the parametric methods for the liquid-state objects images estimation obtained by gas discharge visualization (GDV) method was done. New quantitative parameters for geometric and fractal properties of GDV-grams determination was offered. Modified algorithm for their calculation was shown.*

**Keywords:** KIRLIAN EFFECT, GAS DISCHARGE VISUALIZATION (GDV), LIQUID-STATE OBJECT, PARAMETRIC ANALYSIS, FRACTAL.

### **ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЖИДКОСТНО-ФАЗНЫХ ОБЪЕКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

**А.Б. Завгородний, Л.Д. Писаренко**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
ул. Политехническая, 16, к. 12, 03056, Киев-56, Украина  
E-mails: [komeska@mail.ru](mailto:komeska@mail.ru); [pisarenko@edd.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:pisarenko@edd.ntu-kpi.kiev.ua)

*Проведен анализ параметрических методов оценки изображений, полученных методом газоразрядной визуализации (ГРВ). Предложены новые количественные параметры для определения геометрических и фрактальных свойств ГРВ-грам жидкофазных объектов. Приведен модифицированный алгоритм их расчета.*

**Ключевые слова:** ЭФФЕКТ КИРЛИАН, ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ (ГРВ), ЖИДКОФАЗНЫЙ ОБЪЕКТ, ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, ФРАКТАЛ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. К.Г. Коротков, Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). Серия: Информационные, вычислительные и управляющие системы **6**, 153 (2002).
2. Э.В. Крыжановский, Метод контроля жидкофазных объектов на основе газоразрядной визуализации (СПб.: ГИТМО (ТУ): 2003).
3. А.Б. Завгородний, Фізичні процеси і поля технічних і біологічних об'єктів, 314 (Кременчук: КДУ ім. М. Остроградського: 2009).
4. К.Г. Коротков, Радиотехника и электроника **31**, 625 (1986).
5. А.А. Сирота, Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии **1**, 58 (2008).
6. Р. Финн, Равновесие капиллярных поверхностей (М.: Мир: 1989).
7. Т.А. Жилиякова, Прикладная радиоэлектроника **2**, 84 (2003).
8. А.А. Равдель, А.М. Пономарева, Краткий справочник физико-химических величин (СПб.: Иван Федоров: 2003).
9. А.Б. Завгородний, Вторая конференция молодых ученых «Электроника-2009», 26 (Киев: КПИ: 2009).