

PACS numbers: 42.30.Ms, 47.35.Tv, 47.80.Jk, 61.20.Qg, 82.45.Bb, 82.47.Wx, 83.60.Np

Оптичні дослідження періодичного руху електроліту в магнетному полі

Д. М. Самченко, Г. М. Кочетов, Д. О. Дереча^{*,**}, Ю. Б. Скірта^{*,***},
І. В. Герасимчук^{*,***}, А. В. Грузевич^{****}

*Київський національний університет будівництва і архітектури,
просп. Повітрофлотський, 31,
03037 Київ, Україна*

**Інститут магнетизму НАН та МОН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36^б,
03142 Київ, Україна*

***Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 34/1,
03142 Київ, Україна*

****Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Перемоги, 37,
03056 Київ, Україна*

*****Трипільська ТЕС,
Обухівський р-н, Київська область,
08720 Українка, Україна*

Corresponding author: Dmytro Oleksandrovych Derecha
E-mail: dderecha@gmail.com

*Kyiv National University of Construction and Architecture,
31, Povitroflots'kyi Ave., UA-03037 Kyiv, Ukraine*

**Institute of Magnetism under N.A.S. and M.E.S. of Ukraine,
36^b Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

***Physico-Technological Institute of Metals and Alloys, N.A.S. of Ukraine,
34/1 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

****National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute',
37 Beresteyskyi Ave., UA-03056 Kyiv, Ukraine*

*****TPS of Trypillia,
UA-08720 Ukrainka, Obukhov District, Kyiv Region, Ukraine*

Citation: D. M. Samchenko, G. M. Kochetov, D. O. Derecha, Yu. B. Skirta, I. V. Gerasimchuk, and A. V. Hruzevych, Optical Studies of Periodic Motion of Electrolyte in a Magnetic Field, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 11: 1269–1280 (2023) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.45.11.1269](https://doi.org/10.15407/mfint.45.11.1269)

Досліджено періодичний рух продуктів реакції розчинення крицевої кулі в азотній кислоті у магнетному полі. Використано відеознімання як у природньому світлі, так і в когерентному випромінненні червоного напівпровідникового лазера. Обробку результатів проведено за допомогою перетвору Фур'є та методами спекл-контрасту. Визначено характерні частоти періодичного руху продуктів реакції та розподіл їхніх відносних швидкостей.

Ключові слова: магнетна гідродинаміка, електрохімічні реакції, періодичний рух, перетвір Фур'є, когерентне світло, спекли.

We investigate the periodic motion of the reaction products of the dissolution of a steel ball in nitric acid in a magnetic field. Video recording is used in both the natural light and the coherent radiation of a red semiconductor laser. The video recording results are processed using the Fourier transform. Coherent-radiation photography and its processing with speckle-contrast methods are also used. As a result of the work, we find the characteristic frequencies of the periodic motion of the reaction products and the distribution of their relative velocities.

Key words: magnetohydrodynamics, electrochemical reactions, periodic motion, Fourier transform, coherent light, speckles.

(Отримано 14 липня 2023 р.; остаточн. варіант — 25 липня 2023 р.)

1. ВСТУП

Вплив магнетного поля на перебіг електрохімічних реакцій привертає велику увагу вчених. Під дією постійного магнетного поля спостерігається значне пришвидшення корозії металевих зразків у електролітах і виникнення вихрових структур під час руху продуктів реакції [1–9]. У роботі [1] було побудовано теоретичний модель, який пояснює виникнення вихрових потоків електроліту біля поверхні металевого циліндра за його корозії в присутності зовнішнього магнетного поля. З цього моделю випливає, що виникнення навіть невеликої, порядку мВ, різниці потенціалів електричного поля на поверхні циліндричної електроди у зовнішньому магнетному полі приводить до виникнення вихрових потоків електроліту зі швидкостями близько 1 мм/с. Особливості впливу залежать від величини та градієнтів поля, магнетних властивостей і форми електрод та складу електроліту. У наших дослідках спостерігався обертовий рух продуктів реакції під час розчинення крицевої кульки в розчині азотної кислоти у присутності градієнтного поля постійного магнету. За допомогою оптичних методів, з використанням звичайного білого світла та лазерного випроміннення досліджувався розподіл інтенсивності руху продуктів реакції по об'єму електроліту та частотні характеристики їхнього обертового руху. Запропоно-

ваний нами спосіб уможливило проводити вимірювання швидкості руху потоку електроліту без введення маркерних частинок або інших змін у характері реакції.

У наших попередніх роботах [1–9] ми спостерігали вихровий рух продуктів реакції розчинення крицевої кульки в азотній кислоті у присутності постійного магнетного поля. Було теоретично пояснено виникнення вихрового руху [1–5]. Також нами було розроблено методику знаходження характерних частот за відеознімання у звичайному природньому світлі [6–9]. У цій роботі ми додатково використовували когерентне випромінення червоного напівпровідникового лазера та метод спекл-контрасту, який застосовується, зокрема у медицині [10] для дослідження руху крові в організмі. Мета цієї роботи полягає у розробці методів безконтактного дослідження швидкостей руху продуктів електрохімічних реакцій за допомогою природнього та лазерного світла і порівняння їх між собою.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі ми досліджували розчинення крицевої кульки в азотній кислоті у зовнішньому неоднорідному магнетному полі. Реакція перебігала у скляній чашці Петрі діаметром у 100 мм і висотою у 20 мм. Крицева кулька мала діаметер у 10 мм і була виготовлена відповідно до ГОСТ 801-78 з криці ШХ-15. У реакції використовувалася азотна кислота концентрацією у 14%. Магнетне поле створювалося неодимовим магнетом розмірами 40×20×5 мм, розташованим під чашкою Петрі; напруженість магнетного поля на дні чашки безпосередньо над магнетом — 2 кЕ. Крицева кулька утримується магнетним полем і знаходиться прямо над магнетом. Освітлення стенду здійснюється зверху білою світлодіодною лампою, а також напівпровідниковим червоним лазером з довжиною хвилі у 650 нм.

Для спостереження процесу розчинення та визначення параметрів руху продуктів реакції використовувалися фото- та відеознімання за допомогою камери Canon IXUS 70. Режим відеознімання — 30 кадрів у секунду, розмір кадру — 640 на 480 пікселів; за фотозйомки — кадри розміром 3072 на 2304 пікселів. Знімання проводилось у білому світлі, світлі червоного лазера та у змішаному освітленні. Аналізувались окремі фотографії та відеофрагменти тривалістю у 60 с, які складалися з 1800 кадрів.

Основні відмінності даного досліду від описаних у роботах [6–9] полягають у іншому взаємному розташуванні магнетного та гравітаційного полів — паралельному у цьому випадку та перпендикулярному до попередніх, значно більшій неоднорідності магнетного поля та використанні для освітлення як звичайного, так і когерентного випромінень. Обрана нами схема досліду дає велику площу вільної поверхні електроліту без скляних стінок, що полегшує дослі-

дження перебігу реакції оптичними методами. Під час проходження реакції у чашці Петрі спостерігається обертання електроліту навколо кульки у горизонтальній площині, що нагадує описане у [6] явище, але має певні особливості.

На рисунку 1 показано окремі кадри з відео, зняті за різних видів освітлення. У білому видимому світлі продукти реакції, що обертаються, помітні тільки у безпосередній близькості від кульки. У змішаному світлі добре видно розподіл продуктів реакції, які мають форму спіралі, що розкручується навколо кульки. У чистому лазерному світлі можна побачити ділянки, які відповідають продуктам реакції, але їхню внутрішню структуру видно помітно гірше, ніж у випадку змішаного освітлення. Продукти реакції розчинення заліза у азотній кислоті мають червоно-бурий колір; комбінуючи біле та червоне світло у різних пропорціях, можна одержати чітке зображення розподілу продуктів реакції у чашці Петрі. У даному випадку важлива тільки довжина хвилі лазера; когерентність його випромінювання значення не має.

Для аналізу одержаних відео й одержання характеристик періодичного руху рідини ми використовували алгоритми, розроблені

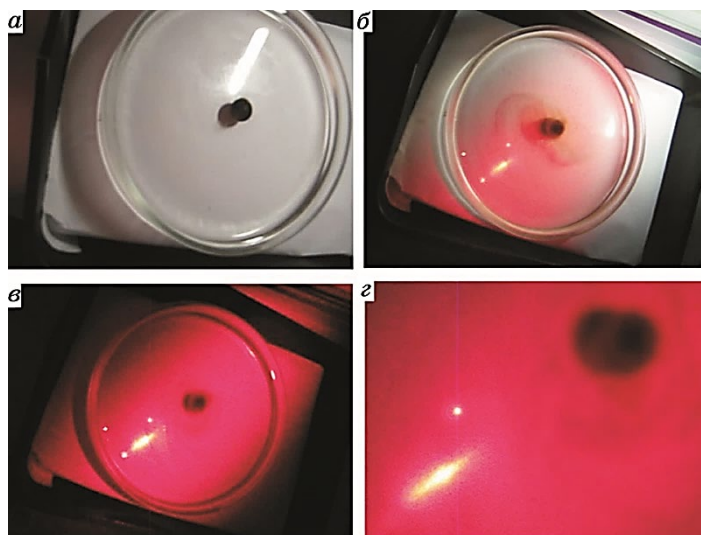


Рис. 1. Зображення електрохімічної реакції за різних варіантів освітлення білими світлодіодами та червоним напівпровідниковим лазером з довжиною хвилі у 650 нм: світлодіоди (*a*), змішане освітлення (*б*), лазер (*в*), лазер та оптичне збільшення (*з*).

Fig. 1. Image of an electrochemical reaction with different lighting options by white LEDs and a red semiconductor laser with a wavelength of 650 nm: LEDs (*a*), mixed lighting (*б*), laser (*в*), laser and optical magnification (*з*).

нами раніше [6–9]. За допомогою програми-конвертора FFmpeg [11] відео були розкладені на окремі кадри. З кожної послідовності кадрів за допомогою розробленої нами програми будується залежність яскравості окремих пікселів зображення від часу. Водночас за яскравість береться сума інтенсивностей всіх трьох кольорових компонент; зображення розглядається як градації сірого; окремі кольори не досліджуються. Після цього ми розраховуємо для кожної точки зображення середньоквадратичний відхил яскравості — інтенсивність зміни яскравості пікселя упродовж всього часу зйомки. Чим більша зміна, тим інтенсивніший рух рідини в околі цієї точки. Якщо побудувати зображення розподілу середньоквадратичного відхилення, можна побачити ділянки найбільш швидкого руху електроліту; під час руху змінюється оптична густина рідини, а разом з тим і яскравість пікселя:

$$I_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i, \quad (1)$$

де I_0 — середнє значення яскравості пікселя, N — кількість пікселів у послідовності, I_i — яскравість i -го елемента послідовності;

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (I_i - I_0)^2}, \quad (2)$$

де σ — середньоквадратичний відхил яскравості пікселя. Кожному пікселю одержаного зображення дисперсії присвоюється значення σ .

Для обробки виділяють частину зображення, де рух електроліту найбільш швидкий. За зображенням середньоквадратичного відхилення виділяють ті пікселі, значення для яких більше заданої величини, та будують карту, на якій вони виділені білим, а всі інші пікселі чорні. Для подальшої обробки використовують тільки білі точки карти, що дає змогу більш чітко побачити особливості руху електроліту. Зображення відхилення та відповідні зображення карти для проведених дослідів показано на рис. 2; на картах білим зображено точки, середньоквадратичний відхил для яких більше за 0,74 від максимального (рис. 2).

Для кожного пікселя на карті було взято відповідну залежність яскравості від часу та проведено дискретний перетвір Фур'є цієї функції [12]. Перетвір Фур'є — різновид інтегрального перетвору, що створює функцію частоти з функції від часових або просторових координат. Перетвір Фур'є уможливує виявити характерні частоти досліджуваного процесу. У початкових послідовностях було 1800 елементів, у частотній залежності дискретність — роздільча здатність за частотою, що становила 0,0167 Гц. Фур'є-перетвір функції, визначеної на кінцевому інтервалі, призводить до виникнення спотворень у частотному діапазоні. Для зменшення їх ми застосовували

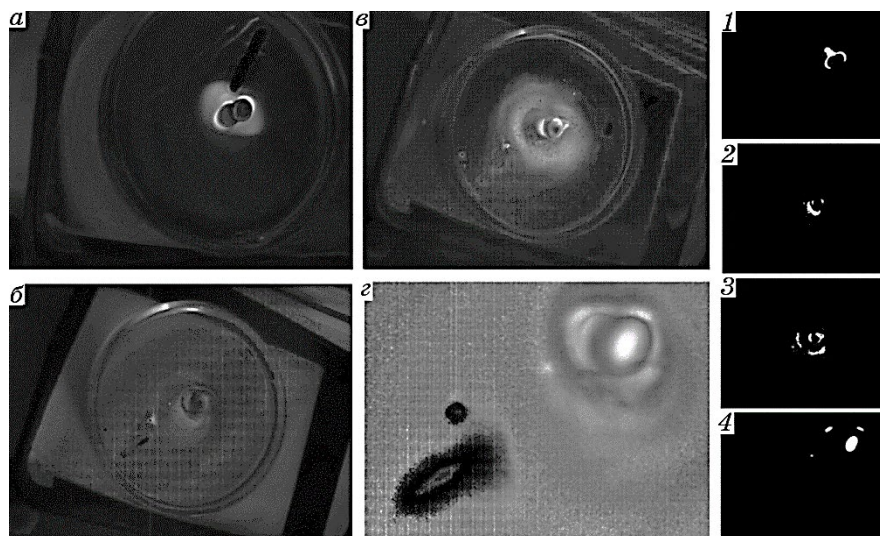


Рис. 2. Зображення середньоквадратичного відхилу відеофрагментів, які відповідають рис. 1. На фрагментах 1–4 показано ділянки з відхилом, більшим за 0,74 від максимуму, які використовувалися для дослідження характерних частот.

Fig. 2. The image of the mean square deviation of the video fragments, which correspond to Fig. 1. Fragments 1–4 show areas with a deviation greater than 0.74 of the maximum, which were used to study the characteristic frequencies.

віконний перетвір Фур'є з вікном Хеммінга. Для кожного відео були знайдені частотні залежності всіх виділених пікселів і проведено усереднення їхніх амплітудних значень. Фазові значення залежностей не аналізувалися, оскільки між осциляціями окремих пікселів спостерігається значний зсув фаз. Одержані частотні залежності показано на рис. 3 (відео для звичайного білого світла, змішаного освітлення, лазерного освітлення) та рис. 4 (відео з лазерним освітленням і додатковим збільшенням, на якому помітні деякі особливості освітлення когерентним випроміненням). Постійну складову частотної залежності відкинуто для ліпшого сприйняття графіків.

Під час спостереження у лазерному когерентному світлі об'єкту, який дифузно відбиває світло, його поверхня буде здаватися зернистою, покритою великою кількістю світлих і темних, хаотично розташованих плям. Ці структури називаються спеклами. Фізично спекли виникають у результаті інтерференції багатьох світлових хвиль, які відбиваються від різних точок об'єкту. Середній розмір спеклу буде залежати від довжини хвилі лазера, розмірів об'єкта, розмірів неоднорідностей і віддалі від об'єкту до площини спостереження [13]. Залежність контрастності спеклів від швидкості руху середо-

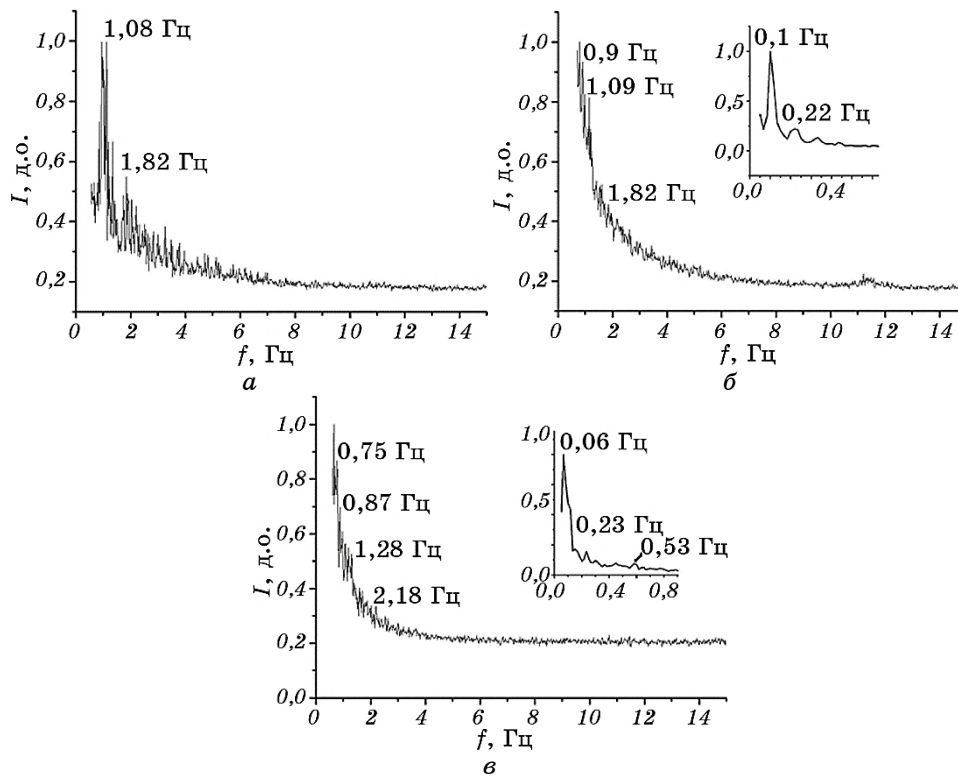


Рис. 3. Спектр частот обертання продуктів реакції, одержаний для випадків *a–в*, показаних на рис. 1. Графіки побудовано для ділянок з максимальною інтенсивністю руху електроліту. На вставках — діапазон наднизьких частот до 1 Гц.

Fig. 3. The spectrum of rotation frequencies of the reaction products obtained for experiments *a–в* shown in Fig. 1. Graphs are plotted for areas with the maximum intensity of electrolyte motion. A range of ultralow frequencies up to 1 Hz is shown on the inserts.

вища використовується у спекл-контрастній візуалізації, наприклад у медицині для дослідження руху крові по судинах [10]. Яскравість кожного спекла змінюється з часом і залежить від швидкості руху неоднорідності, на якій утворюється спекл. Чим більша швидкість, тим менший час кореляції, за який неоднорідність зміщується на віддаль довжини хвилі зондувального лазерного випромінення. Якщо проводити фотографування зображення, на якому присутні спекли, то спекл-контраст можна описати формулою [10]:

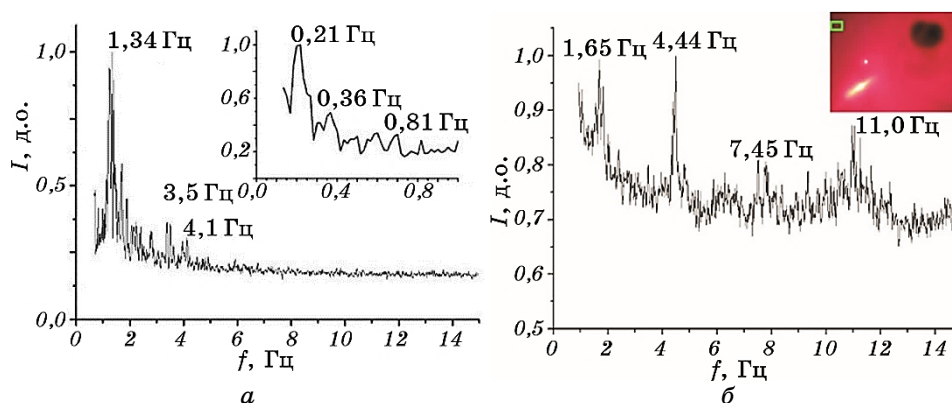


Рис. 4. Спектр частот обертання продуктів реакції, одержаних для досліду, що відповідає рис. 1, *z*: для ділянки з найбільшою інтенсивністю руху (*a*), для ділянки з великою густиною спеклів (*б*). На вставках — діяпазон частот до 1 Гц і ділянка зображення, для якої побудовано графік *б*.

Fig. 4. Spectrum of rotation frequencies of reaction products obtained for experiment corresponding to Fig. 1, *z*: for the area with the greatest intensity of motion (*a*), for the area with a high density of speckles (*б*). The insets show the frequency range up to 1 Hz and the area of the image, for which graph *б* is plotted.

$$\frac{\sigma_s}{I_0} = \sqrt{\frac{\tau_c}{2T} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_c}{2T}\right) \right]}, \quad (3)$$

де σ_s — середньоквадратичний відхил яскравості пікселів у вікні, I_0 — середня яскравість пікселів у вікні, τ_c — час кореляції, T — час експозиції кадру. Для обробки зображення можна використати спеціальний фільтер, який буде виділяти ділянки з різним контрастом спеклів. Кожен піксель зображення вважається центром квадрата зі стороною у N пікселів (краї зображення шириною у $N/2$ пікселів відкидаються). Для кожного квадрата знаходиться середня яскравість I та середній квадратичний відхил яскравості σ . Співвідношення σ/I вважається значенням контрасту та задається як значення яскравості цього пікселя у новому зображенні, яке буде показувати інтенсивність спеклів. Значення N залежить від розміру спеклів і підбирається експериментально; одержані значення контрасту нормуються на максимальну яскравість пікселя — у нашому випадку зображення у градаціях сірого на значення 255.

3. РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 3, *a* наведено спектер частот обертання продуктів реакції за зйомки у білому світлі. Видно дві характерні частоти: 1,08 Гц і 1,82 Гц, що відповідають характерним частотам обертання електроліту навколо крицевої кулі; схожу картину спектру ми описували у роботах [6–9]. На рисунку 3, *б* наведено спектер частот обертання продуктів реакції за зйомки у змішаному освітленні. Спостерігаються характерні частоти у 0,9 Гц, 1,09 Гц, 1,82 Гц, а також частоти 0,1 Гц і 0,22 Гц у діапазоні частот, менших 1 Гц (показано на окремії вставці). На рисунку 3, *в* наведено спектер частот обертання продуктів реакції за зйомки у когерентному освітленні. Спостерігаються максимуми на частотах у 0,75 Гц, 0,87 Гц, 1,28 Гц, 2,18 Гц, а також 0,06 Гц, 0,23 Гц, 0,53 Гц.

Максимуми за змішаного та лазерного освітлень менш виражені, ніж за освітлення білим світлом. Максимуми з частотами, значно меншими 1 Гц, не спостерігаються за освітлення білим світлом і не спостерігалися нами в попередніх дослідах. Їхня природа потребує подальшого вивчення. Можливо, це пов'язане з самим процесом розчинення крицевого зразка та зміною його поверхні, на що когерентне випромінення реагує сильніше за некогерентне; можливо, справа просто у деякій нестабільності роботи самого напівпровідникового лазера.

Зйомка останнього відео проводилася за того самого когерентного освітлення, що й у попередньому випадку, але у цьому разі використовувалося 3-кратне оптичне збільшення. Це привело до ліпшої видимості спеклів на кадрах відео і більшого впливу їх на частотні характеристики. Було розраховано частотні характеристики як в ділянці зі значною інтенсивністю руху рідини, так і для ділянки, де цей рух порівняно незначний (ділянка, позначена на вкладці до рис. 4, *б*). У першому випадку видно характерні частоти у 0,21 Гц, 0,36 Гц, 0,81 Гц, 1,34 Гц, які близькі до тих, що спостерігалися раніше, а також порівняно невеликі максимуми на 3,5 та 4,1 Гц (у другому випадку — частоти у 1,65 Гц, 4,44 Гц (найбільш інтенсивна складова), 7,45 Гц, 11 Гц). Можна припустити, що частоти від 3,5 Гц і вище пов'язані не з особливостями руху рідини, а з формуванням спеклів. Відносна інтенсивність складових, пов'язаних зі спеклами, збільшується зі зменшенням швидкості руху рідини.

Для дослідження відносної швидкості руху продуктів реакції методом спекл-контрасту нами було знято зображення розміром 3072 на 2304 пікселі за освітлення червоним лазером, на якому були ділянки з різною швидкістю руху рідини. Саме зображення та результати його обробки наведено на рис. 5. Зі збільшенням на ньому можна розрізнити окремі спекли, контраст яких є різним на різних ділянках зображення. Рисунок 5, *б* відповідає ділянці з повільним рухом рідини, рис. 5, *в* — з більш швидким. Було проведено фільтрацію зображення описаним вище фільтром для різних зна-

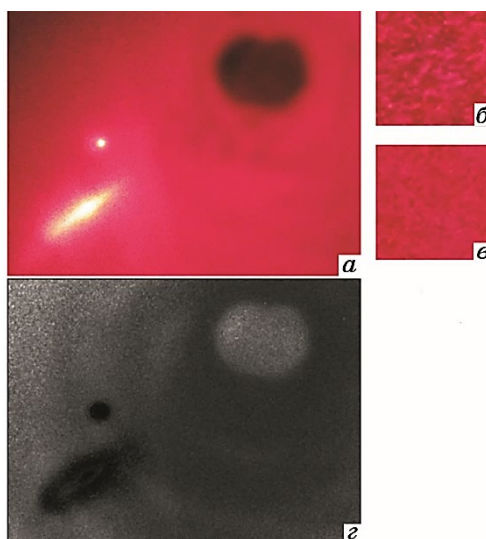


Рис. 5. Зображення рідини у лазерному випромінненні з довжиною хвилі у 650 нм: початкове зображення (*a*), збільшене зображення спеклів (*б*, *в*) (*б* — нерухома частина електроліту, *в* — ділянка з інтенсивним вихровим рухом), зображення після фільтрації (*z*).

Fig. 5. Image of a liquid in laser radiation with a wavelength of 650 nm: initial image (*a*), enlarged image of speckles (*b*, *c*) (*b*—immobile part of the electrolyte, *c*—area with intense vortex motion), image after filtering (*z*).

чень розміру вікна N ; експериментально встановлено, що найліпше виділення спекл-контрасту для нашого дослідження досягається для $N = 15$. Профільтроване зображення наведено на рис. 5, *z*. Яскравість цього зображення залежить від швидкості руху рідини: більш швидкі ділянки темніші, більш повільні — яскравіші.

4. ВИСНОВКИ

Проведені нами дослідження показали наявність вихрового руху електроліту під час розчинення крицевої кульки у азотній кислоті під дією магнетного поля. Обертальний рух електроліту багато в чому аналогічний тому, що спостерігався у роботах [5–9], але має особливості, зумовлені відмінностями в умовах експерименту. Було встановлено характерні частоти обертання продуктів реакції. Для визначення динамічних характеристик були використані як методика обробки відео з використанням перетвору Фур'є, розроблена нами раніше [6–9], так і додаткові алгоритми, пов'язані з особливостями когерентного випроміннення. Характерні частоти найбільш чітко проявляються за спостереження у некогерентному білому сві-

тлі. Суміш білого світла та червоного лазерного випромінення дає можливість більш докладно побачити просторовий розподіл продуктів реакції. Знімки у чистому когерентному лазерному випроміненні доцільно обробляти фільтром, який виділяє інтенсивність спеклів, що дає змогу знайти розподіл швидкостей руху продуктів реакції. Ця методика не вносить спотворень у перебіг реакції та може бути адаптованою для дослідження частотних характеристик руху рідин, газів і дрібних об'єктів без прямого впливу на досліджуване середовище.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. О. Ю. Горобець, *Металлофиз. новейшие технол.*, **29**, № 5: 611 (2007).
2. О. Ю. Горобець, Д. А. Дереча, *Металлофиз. новейшие технол.*, **27**, № 9: 1179 (2005).
3. O. Yu. Gorobets, A. K. Zvezdin, and O. N. Bylo, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, **36**, No. 3: 79 (2009).
4. M. Yu. Ilchenko, O. Yu. Gorobets, I. A. Bondar, and A. M. Gaponov, *J. Magn. Magn. Mater.*, **322**: 2075 (2010).
5. О. Ю. Горобець, Д. А. Дереча, *Металлофиз. новейшие технол.*, **32**, № 10: 1429 (2010).
6. D. O. Derecha, Yu. B. Skirta, and I. V. Gerasimchuk, *J. Phys. Chem. B*, **118**, Iss. 50: 14648 (2014).
7. D. O. Derecha, Yu. B. Skirta, and I. V. Gerasimchuk, *Nanoscale Res. Lett.*, **10**: 440 (2015).
8. Yu. I. Gorobets, O. Yu. Gorobets, D. O. Derecha, Yu. B. Skirta, I. V. Gerasimchuk, V. V. Konovalova, and A. A. Kyba, *Appl. Nanosci.*, **9**, Iss. 5: 859 (2019).
9. D. O. Derecha, Y. B. Skirta, I. V. Gerasimchuk, and A. V. Hruzevych, *J. Electroanal. Chem.*, **873**: 114399 (2020).
10. M. A. Vilensky, O. V. Semyachkina-Glushkovskaya, P. A. Timoshina, J. V. Kuznetsova, I. A. Semyachkin-Glushkovskii, D. N. Agafonov, and V. V. Tuchin, *Quantum Electron.*, **42**, No. 6: 489 (2012).
11. <https://www.ffmpeg.org>
12. R. C. Gonzalez, R. E. Woods, and S. L. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB* (Gatesmark Publishing: 2009).
13. М. Франсон, *Оптика спеклов* (Москва: Мир: 1980) (пер. з англ.).

REFERENCES

1. O. Yu. Gorobets, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **29**, No. 5: 611 (2007) (in Ukrainian).
2. O. Yu. Gorobets and D. O. Derecha, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **27**, No. 9: 1179 (2005) (in Russian).
3. O. Yu. Gorobets, A. K. Zvezdin, and O. N. Bylo, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, **36**, No. 3: 79 (2009).
4. M. Yu. Ilchenko, O. Yu. Gorobets, I. A. Bondar, and A. M. Gaponov, *J. Magn.*

- Magn. Mater.*, **322**: 2075 (2010).
5. O. Yu. Gorobets and D. O. Derecha, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **32**, No. 10: 1429 (2010) (in Russian).
 6. D. O. Derecha, Yu. B. Skirta, and I. V. Gerasimchuk, *J. Phys. Chem. B*, **118**, Iss. 50: 14648 (2014).
 7. D. O. Derecha, Yu. B. Skirta, and I. V. Gerasimchuk, *Nanoscale Res. Lett.*, **10**: 440 (2015).
 8. Yu. I. Gorobets, O. Yu. Gorobets, D. O. Derecha, Yu. B. Skirta, I. V. Gerasimchuk, V. V. Konovalova, and A. A. Kyba, *Appl. Nanosci.*, **9**, Iss. 5: 859 (2019).
 9. D. O. Derecha, Y. B. Skirta, I. V. Gerasimchuk, and A. V. Hruzevych, *J. Electroanal. Chem.*, **873**: 114399 (2020).
 10. M. A. Vilensky, O. V. Semyachkina-Glushkovskaya, P. A. Timoshina, J. V. Kuznetsova, I. A. Semyachkin-Glushkovskii, D. N. Agafonov, and V. V. Tuchin, *Quantum Electron.*, **42**, No. 6: 489 (2012).
 11. <https://www.ffmpeg.org>
 12. R. C. Gonzalez, R. E. Woods, and S. L. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB* (Gatesmark Publishing: 2009).
 13. M. Françon, *Optika Speklov* [Speckle Optics] (Moskva: Mir: 1980) (Russian translation).