

УДК 532.6.08

## ЗАСТОСУВАННЯ ЗРАЗКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ФІКСОВАНИХ ОБЕРТОВИХ КРАПЕЛЬ

**В. Б. Біліщук**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: inst.energy@iung.edu.ua

*Запропоновано використовувати методи аналізу цифрових зображень, які базуються на порівнянні образів, для підвищення результативності визначення координат точок контурів фіксованих обертових крапель. Розроблено зразкові зображення фіксованих обертових крапель, які використовують для ідентифікації місця положення фіксованої обертової краплі на зображенні. Показано, що обчислення кореляції між зразковим зображенням і фрагментом фотографії із фіксованою обертовою краплею є ефективнішим, ніж обчислення різниць яскравості точок цих зображень.*

*Ключові слова:* фіксована обертова крапля, координати точок контура, зображення, яскравість точок.

*Предложено использовать методы анализа цифровых изображений, основанные на сравнении образов, которые позволяют повысить результативность определения координат точек контуров фиксированных вращающихся капель. Разработаны примерные изображения фиксированных вращающихся капель, которые используют для идентификации места положения фиксированной вращающейся капли на изображении. Показано, что вычисления корреляции между образцовым изображением и фрагментом фотографии с фиксированной вращающейся каплей эффективнее, чем вычисление разницы яркости точек этих изображений.*

*Ключевые слова:* фиксированная вращающаяся капля, координаты точек контура, изображения, яркость точек.

*Comparison images methods of digital image analyzing are proposed to enhance the efficiency of determining shapes of fixed rotating drops. Fixed spinning drop model images are developed to using for identify the location of the fixed spinning drop the image. It is shown that the calculation of the correlation between the model image and part of the photo with a fixed spinning drop is more efficient than calculating brightness differences of points of these images.*

*Keywords:* fixed rotating drop, coordinates contour image, brightness points.

**Вступ.** Однією із задач при дослідженні міжфазного натягу рідин методом обертової краплі (ОК) є отримання координат точок контуру ОК із її цифрової фотографії [1, 2]. Описана методика аналізу цифрових фотографій для визначення координат точок контуру фіксованої ОК [2] є достатньо ефективною при обробленні якісних фотографій, на яких відсутні окремі краплі рідини та інші дефекти (рис. 1, а). Отримання таких фотографій вимагає акуратного проведення дослідів, щоб не допустити розділення досліджуваної рідини на окремі краплі. Аналіз фотографій, в яких окремі краплі рідини контактують із поверхнею фіксованої ОК (рис. 1, б), методикою [2] є суттєво ускладненим. В таких випадках часто

стаються помилки в роботі розробленого програмного забезпечення або навіть спостерігається повна його непрацездатність.

**Мета роботи.** Таким чином, існує актуальна задача удосконалення розробленої методики аналізу фотографій фіксованої ОК для підвищення її результативності.

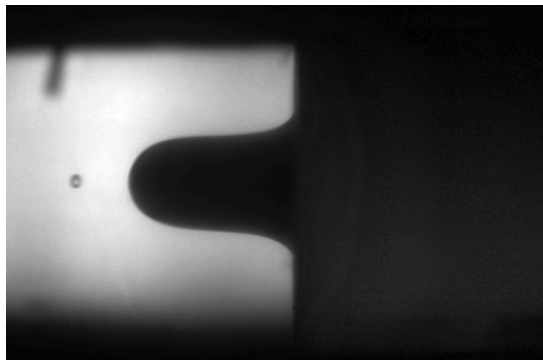
**Теоретичне обґрунтування.** Існують методи аналізу цифрових зображень, які базуються на порівнянні образів. В них зразкове зображення (образ), за спеціальним алгоритмом порівнюється із частиною зображення і визначається ідентичність до зразкового зображення. Таким чином, використовуючи алгоритми порівняння образів

на цифрових зображеннях, можна підвищити результативність аналізу цифрових фотографій фіксованої ОК для визначення координат точок її контуру.

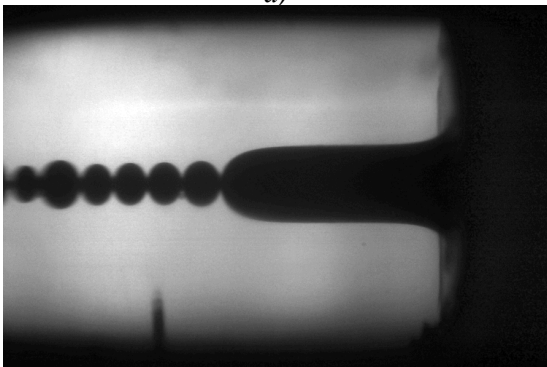
Задача розпізнавання образів (ідентифікації) на зображенні полягає в тому, щоб вирізнити певний конкретний об'єкт серед йому подібних. Традиційна техніка порівняння фрагменту зображення з еталоном ґрунтується на розгляді зображення як двовимірної функції яскравості (дискретних двовимірних матриць інтенсивності). При цьому вимірюється або відстань між зображеннями  $D$ , або міра їх близькості. Для обчислення відстані  $D$  між зображеннями використовується формула, яка є сумою квадратів різниць інтенсивності [3, 4]:

$$D = \frac{\sum_{xd} \sum_{yd} (SP_{xd,yd} - P_{xd,yd})^2}{C_p \cdot 255^2}, \quad (1)$$

де  $xd, yd$  — координати точки образу і фрагменту зображення,  $SP$  і  $P$  — матриці, які містять образ і фрагмент цифрового зображення ОК в градаціях інтенсивності,  $C_p$  — кількість точок у фрагменті.



а)



б)

а — якісна фотографія; б — неякісна фотографія

Рисунок 1 – Фотографії фіксованих ОК

Інша функція, за допомогою якої можна встановлювати міру ідентичності зображень, встановлює кореляцію  $R$  між зображеннями і виглядає так [3]:

$$R = \frac{\sum_{xd} \sum_{yd} (SP_{xd,yd} \cdot P_{xd,yd})}{\sqrt{\sum_{xd} \sum_{yd} (SP_{xd,yd})^2} \cdot \sqrt{\sum_{xd} \sum_{yd} (P_{xd,yd})^2}}. \quad (2)$$

Слід зауважити, що величини  $D$  і  $R$  є взаємооберненими для ідентичних зображень  $D \rightarrow 0$ , а  $R \rightarrow 1$ . Іншою задачею при ідентифікації образів на зображенні є задача вибору такого масштабу і кута нахилу зразкового зображення, які б відповідали аналізованому фрагменту зображення.

Як видно із сказаного вище, потрібно розробити зразкові зображення фіксованої ОК, які будуть використовувати для ідентифікації ОК на фотографії. Очевидно, що в даному випадку зразкове зображення найкраще створювати, використовуючи математичну модель, що описує відповідні фізичні процеси. Контур фіксованої ОК описується відомими диференціальними рівняннями [5]:

$$\frac{d\varphi}{dl_c} = K_c - \frac{y_c^2}{2} - \frac{\sin \varphi}{y_c}, \frac{dy_c}{dl_c} = \cos \varphi, \frac{dx_c}{dl_c} = \sin \varphi, \quad (3)$$

де  $x_c = x/c$ ,  $y_c = y/c$  — безрозмірні координати точок теоретичного контуру обертової краплі;  $x, y$  — розмірні координати точок теоретичного контуру обертової краплі;  $c = \sqrt[3]{\sigma/\Delta\rho\omega^2}$  — обертова стала;  $\Delta\rho$  — різниця густин рідин;  $\omega$  — кутова швидкість обертання;  $\sigma$  — міжфазний натяг на межі розділу двох рідин;  $\varphi$  — кут між віссю обертання трубки та нормаллю, проведеною до контуру обертової краплі в точці з координатами  $x_c, y_c$ ;  $K_c = K \cdot c$ ,  $K$  — безрозмірна і розмірна кривизна поверхні фіксованої обертової краплі у її вершині, відповідно;  $l_c = l/c$ ,  $l$  — безрозмірна і розмірна довжина дуги меридіана профілю фіксованої обертової краплі від її вершини, відповідно.

В результаті розв'язку рівнянь (3) отримують координати точок контуру фіксованої ОК в безрозмірних одиницях. Використовуючи ці дані, можна розрахувати координати точок контуру фіксованої ОК на зразковому зображенні. Для цього потрібно знати значення ще двох коефіцієнтів — перетворення приладу  $K_{opt}$  і оптичного збільшення  $M$ , яке вносить трубка із рідинами. Згідно з [6], в оптичній системі приладу при забезпеченні певних умов коефіцієнт оптичного

збільшення  $M$  рівний коефіцієнту оптичного заломлення важчої рідини. Коефіцієнт перетворення приладу визначає взаємозв'язок розмірів ОК на цифровій фотографії з реальними розмірами ОК. Коефіцієнт перетворення  $K_{opt}$  можна визначити при проектуванні оптичної системи приладу або визначити експериментально під час калібрування приладу за допомогою спеціальних калібрів з нанесеною сіткою або шкалою [7].

Для визначення коефіцієнта перетворення  $K_{opt}$  калібр фотографують таким чином, щоб лінії сітки або поділки шкали калібру були строго вертикальні або горизонтальні і розміщені в центрі зображення. На цифровому зображенні в комп'ютері за допомогою програмного забезпечення відраховують кількість пікселів  $N_p$ , які відповідають певній кількості  $N_c$  поділок калібру. Коефіцієнт перетворення  $K_{opt}$  розраховують за виразом:

$$K_{opt} = \frac{N_c}{N_p}. \quad (4)$$

З врахуванням цих коефіцієнтів взаємозв'язок між розмірами ОК на цифровій фотографії і її реальними розмірами є таким:

$$\begin{cases} xd = \frac{x \cdot M}{K_{opt}} = \frac{x_c \cdot M}{c \cdot K_{opt}}, \\ yd = \frac{y}{K_{opt}} = \frac{y_c}{c \cdot K_{opt}}. \end{cases} \quad (5)$$

Таким чином, здійснюючи розрахунки згідно формул (3) і (5), можна розрахувати координати точок фіксованої ОК на зразковому зображенні. Використовуючи отримані результати розрахунків, можна використати для створення цих зразкових зображень.

Приведені в статті фотографії ОК (рис. 1) були отримані за допомогою приладу ВМН-2 [8] в процесі досліджень водних розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР). Для водних розчинів ПАР коефіцієнт  $M=1,33$ . Для цього приладу коефіцієнт перетворення  $K_{opt}$  був визначений експериментально за допомогою окулярної сітки від мікроскопів МБС в процесі калібрування приладу і рівний  $1/196,7$  мм/піксел. Розв'язуючи рівняння (3) з врахуванням (5) і значень коефіцієнтів  $M$  і  $K_{opt}$ , було створено зразкові зображення ОК (рис. 2). Початкові параметри (кривизна  $K_c$ , обертова стала  $c$ ) для розрахунку зразкових зображень вибирались таким чином, щоб отримати зображення фіксованих ОК рівнозмінних форм.

Як було згадано вище, під час ідентифікації фіксованої ОК на фотографії потрібно змінювати масштаб і кут повороту зразкового зображення. Як видно із рис. 1 і рис. 2, кут нахилу фіксованих ОК на зразкових зображеннях і фотографіях однакові. Отже, при ідентифікації ОК на зображенні не потрібно змінювати кут повороту зразкового зображення. Тоді, потрібно з'ясувати, яке із зразкових зображень (рис. 2) відповідає фіксованій ОК на фотографії і який масштаб цього зразкового зображення.

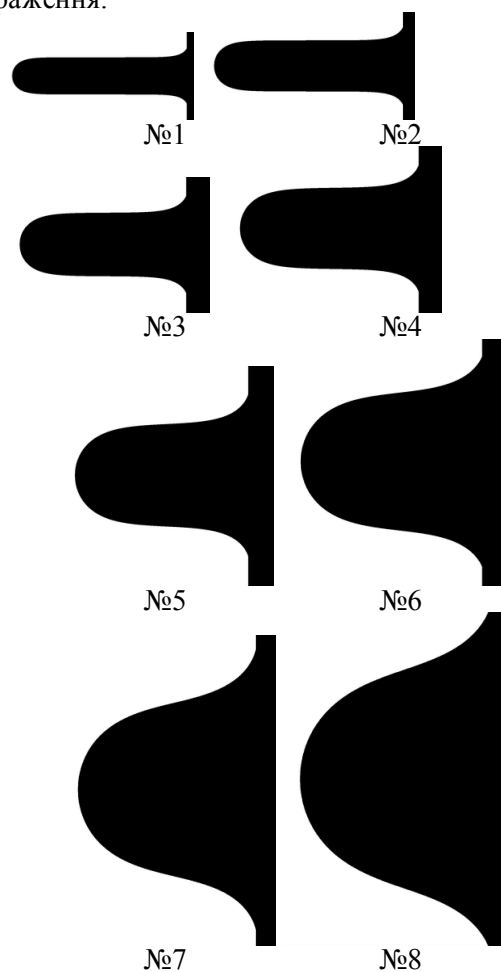


Рисунок 2 – Зразкові зображення фіксованих обертових крапель

Ідентифікацію місця положення ОК на зображенні здійснювали таким чином: почергово вибирали зразкові зображення; змінювали масштаб вибраного зразкового зображення; на фотографії фіксованої ОК виділяли фрагменти, які за розміром співпадали із розміром масштабованого зразкового зображення і розраховували відстань  $D$  і кореляцію  $R$  для кожного фрагменту за формулами (1) і (2). Фрагменти фотографії

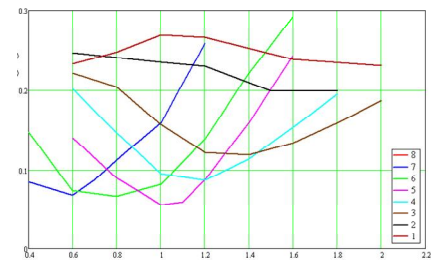
фіксованої ОК вибирали із зміщенням на 8 піксел по рядках і стовпцях. За ідентифіковану частину цифрового зображення, яка містить ОК, обирали фрагмент з найменшим  $D$  (при використанні формули (1)) і з найбільшим  $R$  (при використанні формули (2)).

**Обговорення результатів.** Для зручності було побудовано графіки залежності значень  $D$  і  $R$  від типу зразкового зображення і його масштабу (рис. 3 і рис. 4). Ідентифікація ОК на якісному зображенні за допомогою формул (1) і (2) не викликала великих складностей. Як видно із графіків (рис. 3,а і рис. 4,а), до фотографії фіксованої ОК на рис. 1, а найбільш схожим є зразкове зображення №5 із масштабом  $Z_F=1$  (рис. 2). В той же час на фотографіях, на яких присутні схожі до ОК елементи (окремі краплі рідини) (рис. 1, б), ідентифікація ОК не є настільки однозначною, ніж в порівнянні із фотографією на рис. 1, а. Як видно із рис. 3,б, при використанні формули (1) для оцінки ідентичності фотографії ОК і зразкового зображення дві криві (3-я і 4-а) досягли практично однакових мінімальних значень  $D$ . У випадку обчислення кореляції  $R$  згідно з формулою (2), крива з номером 3 має максимум з невеликим відривом від інших кривих, це дає змогу стверджувати, що зразкове зображення №3 із масштабом  $Z_F=1,5$  є найбільш ідентичним до зображення ОК на фотографії 1,б.

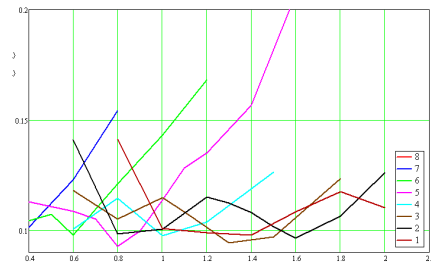
Для повноти аналізу варто також оцінити достовірність визначення місця знаходження ОК на їх фотографіях. Слід відмітити, що при аналізі фотографії фіксованої ОК для визначення координат точок її контуру має велике значення встановлення координат вершини (омбілічної точки) фіксованої ОК на фотографії. Тому, було оцінено похибку визначення координат цієї точки. В табл. 1 наведено координати омбілічної точки фіксованої ОК і межі фотографії, в яких знаходиться ОК. Координати омбілічної точки фіксованої ОК на рис. 1, а були визначені при проведенні досліджень міжфазного натягу [2, 5]. Координати омбілічної точки фіксованої ОК на рис. 1, б були визначені апроксимуванням контуру фіксованої ОК біля омбілічної точки. Межі фотографії, в яких знаходиться фіксована ОК, визначались візуально в програмах для перегляду цифрових зображень.

В табл. 2 і табл. 3 приведені результати визначення місця розташування ОК на фотографіях (рис. 1). Як видно з табл. 2, для зображення №5 величина  $R=0,965$  є максимальною, отже зразкове зображення №5 з

масштабом  $Z_F=1$  є найбільш схожим до ОК на рис. 1, а. Похибка визначення координат омбілічної точки складає 3,61 піксел.



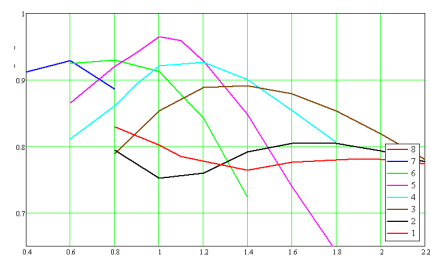
а)



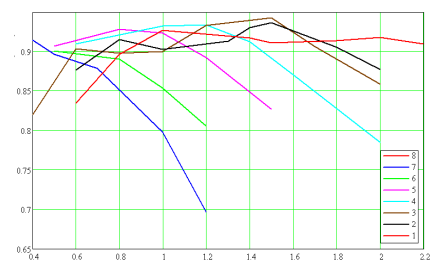
б)

а — якісне зображення; б — неякісне зображення

**Рисунок 3 – Результати розрахунку відстаней  $D$  між зразковим зображенням ОК і зображеннями з рис. 1 залежно від масштабу зразкового зображення**



а)



б)

а — якісне зображення; б — неякісне зображення

**Рисунок 4 – Результати розрахунку кореляції  $R$  між зразковим зображенням ОК і зображеннями з рис. 1 залежно від масштабу зразкового зображення**

Таблиця 1 – Межі рисунка, в яких знаходиться ОК

Зображення	Координати омбілічної точки		Межі краплі			
	рядок	стовпчик	ліва	права	верхня	нижня
Рис. 1, а	170	245	170	399	152	345
Рис. 1, б	300	243	300	615	159	312

Таблиця 2 – Результати визначення меж ОК для рис. 1, а

Зображення	Параметр ідентичності	Координати омбілічної точки, пікселі		Відхилення координат омбілічної точки	Масштаб зразкового зображення	Межі краплі, пікселі			
		рядок	стовпчик			ліва	права	верхня	нижня
Результати розрахунків з використанням формули (2)									
№1	$R=0,829$	207	244	37,0	0,8	190	404	135	353
№2	$R=0,805$	153	251	18,0	1,6	136	564	33	469
№3	$R=0,891$	146	248	24,2	1,4	119	494	57	438
№4	$R=0,927$	166	252	8,06	1,2	136	457	89	415
№5	$R=0,965$	172	248	3,61	1	152	420	112	384
№6	$R=0,929$	183	251	14,3	0,8	158	373	142	360
№7	$R=0,929$	185	252	16,6	0,6	161	321	170	333
Результати розрахунків з використанням формули (1)									
№1	$D=0,231$	25	246	145	2	0	511	0	518
№2	$D=0,199$	33	245	137	1,5	16	418	41	449
№3	$D=0,118$	98	248	72,1	1,4	71	446	57	438
№4	$D=0,087$	142	244	28,0	1,2	81	407	112	433
№5	$D=0,055$	172	248	3,61	1	152	420	112	384
№6	$D=0,066$	183	251	14,3	0,8	158	373	142	360
№7	$D=0,068$	177	244	7,07	0,6	153	313	162	325

Таблиця 1 – Результати визначення меж ОК для рис. 1, б

Зображення	Параметр ідентичності	Координати омбілічної точки		Відхилення координат омбілічної точки	Масштаб	Межі краплі			
		рядок	стовпчик			ліва	права	верхня	нижня
Результати розрахунків з використанням формули (2)									
№1	$R=0,927$	93	247	207,039	1	76	344	111	383
№2	$R=0,937$	241	245	59,043	1,5	224	626	41	449
№3	$R=0,943$	282	249	18,974	1,5	255	657	44	452
№4	$R=0,934$	326	252	27,514	1,2	296	617	89	415
№5	$R=0,928$	428	245	128,016	0,8	408	622	136	353
№6	$R=0,901$	309	245	9,22	0,5	284	418	177	313
№7	$R=0,914$	312	245	12,166	0,4	288	396	191	299
Результати розрахунків з використанням формули (1)									
№1	$D=0,098$	17	245	283	1,4	0	358	55	435
№2	$D=0,096$	201	243	99	1,6	184	612	25	461
№3	$D=0,094$	290	247	10,8	1,3	263	612	70	424
№4	$D=0,098$	261	248	39,3	1	231	499	112	384
№5	$D=0,093$	300	245	2	0,8	280	494	136	353
№6	$D=0,098$	70	172	241	0,6	45	205	90	254
№7	$D=0,101$	304	245	4,47	0,4	280	388	191	299

Порівнюючи межі фотографії з фіксованою ОК (табл. 1) і визначені межі фотографії (табл. 2), видно, що ОК знаходиться всередині визначеної межі. Таким чином, крім ідентифікації форми фіксованої ОК, було вірно визначено її місце розташування на фотографії. Аналогічні результати були отримані при використанні формули (1). Для зображення №5 параметр  $D=0,055$  (в даному випадку він має мінімальне значення). Масштаб зразкового зображення і координати фрагменту фотографії ОК є такими самими. З отриманих результатів можна зробити висновок, що для якісних зображень ОК формули (1) і (2) дають аналогічний результат.

Розглянемо отримані результати для неяккої фотографії фіксованої ОК (табл. 3). З використанням формули (2) було визначено, що найбільш ідентичним до фотографії ОК (рис. 1, б) є зразкове зображення №3 з масштабом  $Z_F=1,5$ . Але похибка визначення координат омбілічної точки складає 19 пікселів. Кращі результати при визначенні координат омбілічної точки були отримані з використанням зразкового зображення №6 (9 пікселів), але це зображення не є ідентичним до фіксованої ОК на фотографії. Незважаючи на це використання формули (2), для ідентифікування фіксованої ОК на фотографії із використанням запропонованих зразкових зображень дає можливість підвищити результативність аналізу фотографій ОК при контролі МН методом фіксованої ОК. При використанні формули (1) для ідентифікації ОК і її місця знаходження отримали практично однакові значення параметрів ідентичності для двох зразкових зображень №3 і №5. З фотографії фіксованої ОК (рис. 1, б) видно, що зразкове зображення №5 не є ідентичним до фіксованої ОК, отже в даному випадку формула (1) не дала потрібного результату. Схожі результати були отримані для інших фотографій ОК.

## ВИСНОВКИ

З вище наведеного матеріалу видно, що використовуючи створені зразкові зображення, можна підвищити результативність аналізу цифрових фотографій фіксованих ОК для визначення координат точок їх контурів при контролі МН методом фіксованої ОК. Для ідентифікації ОК на зображенні і визначення меж фрагменту зображення з ОК слід

розраховувати кореляцію між зразковим зображенням і фрагментом фотографії ,використовуючи формулу (2).

1. Порєв В. А. Виділення контуру обертової краплі методом радіальної розгортки при вимірюванні міжфазного натягу / В. А. Порєв, Г. В. Порєв, Р. І. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - № 6. - С. 32-36.
2. Біліщук В. Б. Методика аналізу цифрових зображень для визначення координат точок контуру фіксованої обертової краплі в міжфазній тензіометрії / В. Б. Біліщук, Б. В. Костів, Р. Т. Боднар // Методи та прилади контролю якості. - 2014. - № 2 (33). - С. 59-65.
3. Д. Протопопов Фурье-вычисления для сравнения изображений <http://habrahabr.ru/post/266129/>.
4. Глузов Н. И. Метод быстрой корреляции с использованием тернарных шаблонов при распознавании объектов на изображениях / Н. И. Глузов, Е. В. Мясников, В. Н. Копенков, М. А. Чичева // Компьютерная оптика – 2008 – Т. 32, №3. – С. 277-283.
5. Кісіль І. С. Вимірювання динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин методикою фіксованої обертової краплі / І. С. Кісіль, В. Д. Михайлюк, В. Б. Біліщук, І. Ю. Хемій // Нафтова і газова промисловість. – 2010. – №6. С. 33–36.
6. Silberberg A. Interfacial Tension and Phase Separation in Two Polymer-Solvent Systems Ph D Thesis // University of Basel (Switzerland). – 1952.
7. Кісіль І. С. Методика калібрування приладу для вимірювання міжфазного натягу методом обертової краплі / І. С. Кісіль, В. Б. Біліщук // Наукові праці конференції "Метрологія та вимірювальна техніка", 14–16 жовтня 2008 р. – м. Харків, Національний науковий центр "Інститут метрології", 2008. – С. 95–97.
8. Kisil I. Device for investigation of dynamic surface tension aqueous surfactant solutions / I. Kisil, V. Bilishchuk, Y. Kuchirka, O. Barna // Informatyka Automatyka Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 2014. – №2. – P. 28–30.

Поступила в редакцію 20.12.2015р.

Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Райтер П.М, докт. техн. наук, проф. Семенцов Г.Н.