

УДК 532.6.08

**МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ
КООРДИНАТ ТОЧОК КОНТУРУ ФІКСОВАНОЇ ОБЕРТОВОЇ КРАПЛІ В МІЖФАЗНІЙ
ТЕНЗІОМЕТРІЇ****В. Б. Біліщук, Б. В. Костів, Р. Т. Боднар**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел.: (03422) 4-60-77, e-mail:
zarichna@nung.edu.ua*

Представлена розроблена методика аналізу цифрових зображень фіксованої обертової краплі для визначення координат точок контурів таких крапель. Пропонується використовувати метод Кенні виділення контурів на цифрових зображеннях із субпіксельним розрахунком координат точок цих контурів. Це дозволило розробити програмне забезпечення для дослідження динамічного міжфазного натягу рідин методом фіксованої обертової краплі.

Ключові слова: поверхнево-активна речовина, міжфазний натяг, метод Кенні, піксел, субпіксельний метод.

Представлена разработанная методика анализа цифровых изображений фиксированной вращающейся капли для определения координат точек контуров таких капель. Предлагается использовать метод Кенни выделения контуров на цифровых изображениях с субпиксельным расчетом координат точек этих контуров. Это позволило разработать программное обеспечение для исследования динамического межфазного натяжения жидкостей методом фиксированной вращающейся капли.

Ключевые слова: поверхностно-активное вещество, межфазное натяжение, метод Кенни, пиксел, субпиксельный метод.

The purpose of the paper is the developing methods of digital images analyzing of fixed rotating drops to determine the coordinates of shape points of the drops. In the developed technique is proposed to use the method of Kenney edge detection in digital images with sub-pixel calculation of coordinates of points of the contour. The technique has allowed developing software for the research of dynamic interfacial tension of liquids using a fixed rotating drop.

Keywords: surfactant, interfacial tension, Kenny method, pixel, sub-pixel method.

Вступ. Відомий метод фіксованої обертової краплі (ФОК) пропонують використовувати для дослідження міжфазного натягу (МН) на межі розділу розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР) з іншими рідинами, при підборі компонентів і концентрації ПАР у цих розчинах [1,2]. Такі дослідження необхідні у нафтовидобутку, при виробництві миючих засобів та в інших галузях промисловості. Метод обертової краплі визначення МН між взаємонерозчинними рідинами відомих густин полягає у наступному. Скляну трубку заповнюють важчою рідиною, в яку вводять краплю легшої рідини, приводять трубку з рідинами в обертання, вимірюють потрібні розміри обертової краплі легшої рідини, частоту обертання і при відомій різниці густин рідин

визначають МН. Найбільшого розповсюдження набув метод обертової краплі, в якому крапля вільно розміщується у скляній трубці із важчою рідиною [3,4]. В методі ФОК обертова крапля одним кінцем контактує із поверхнею твердого тіла (рис. 1). В якості такого тіла використовують один із корків трубки.

Метод ФОК передбачає відеозйомку або фотографування ФОК для отримання цифрового зображення цієї краплі. Отримане цифрове зображення аналізують певним чином за допомогою розробленого програмного забезпечення з метою отримання контуру ФОК, на основі якого визначають розміри ФОК і розраховують МН на межі розділу двох рідин. Контур краплі на цифровому зображенні представлений лінією перепаду інтенсивності

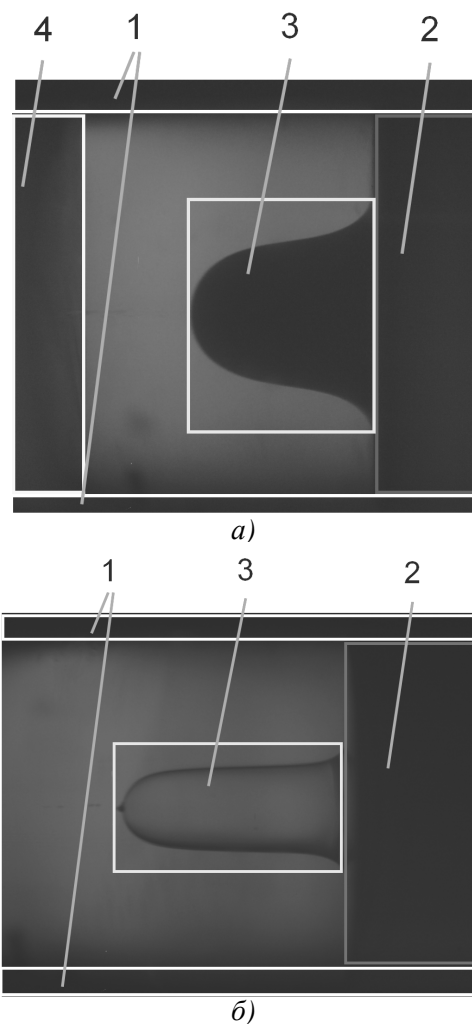
освітленості між краплею і фоном, а саме цифрове зображення представляється як сукупність його елементів — пікселів. При цьому кожний піксель характеризується певною кількістю рівнів яскравості. Пікселі зображень переданих градаціями сірого мають 256 рівнів. Пікселі кольорового зображення складаються з триад — субпікселів червоного, зеленого і синього кольорів. Кожний субпіксель також має 256 рівнів яскравості.

Метою роботи є розроблення методики аналізу отриманого цифрового зображення ФОК, яка передбачала б сканування цього зображення з метою пошуку точок зображення, що належать контуру ФОК, визначення координат цих точок для побудови контуру ФОК, який в подальшому використовувався б для визначення МН.

Виклад основного матеріалу. В роботі [5] для визначення координат точок контуру обертової краплі із цифрового зображення пропонується використовувати метод радіальної розгортки. Використання цього методу для контуру обертової краплі є прийнятним тому, що така крапля має замкнутий контур. Контур ФОК є розімкнутим (рис. 1), у випадку непрозорої ФОК відсутня чітка межа між ФОК і корком, з яким вона контактує. Остання обставина суттєво обмежує використання методу радіальної розгортки для пошуку точок контуру ФОК. Важливе значення має автоматизація процесу пошуку точок контуру ФОК і наявність інших елементів на приведених зображеннях — корків і стінок трубки, що зумовлює необхідність розроблення принципово нової методики аналізу цифрових зображень із ФОК.

Існуючі методи виділення країв об'єктів на зображенні діляться на чотири основні групи: порогові, диференційні, порівняння з шаблоном, просторового перетворення. Порогові методи виділення країв є найпростішими в реалізації, але вимагають задавання правильного порогового рівня яскравості для відділення об'єкту від фону (при зміні порогового рівня яскравості змінюються розміри виділеного об'єкта на зображенні через плавну зміну яскравості точок зображення біля контуру). Ці методи ставлять жорсткіші вимоги до якості отриманого зображення: рівномірної яскравості фону і об'єкту, відсутності локальних змін яскравості зображення біля контуру об'єкта. Диференційні методи використовують оцінку локального значення градієнта або його проекції у відповідному напрямку. Реалізують метод диференціювання градієнтні оператори:

Робертса, Собела, Превітта, Лапласіан-Гаусіана. Недоліком диференційних методів є чутливість до шумів, що вимагає попереднього фільтрування зображення. Методи порівняння з шаблоном використовують порівняння шаблонів краю із зображенням, кожен з яких є краєм у деякій орієнтації. В методах порівняння з шаблоном використовують оператори Робінсона, Кірша, Превітта і Собела. Ці методи вимагають значних обчислень. Особливістю методів просторового перетворення є перехід від картини інтенсивності до інших багатовимірних просторів. Реалізують ці методи детектори Хюккеля, Бекера, Хука та ін. [6, 7].



1 — стінки трубки; 2 — корок, до якого фіксується крапля; 3 — фіксована обертова крапля; 4 — корок

Рисунок 1 – Зображення непрозорої (а) і прозорої (б) фіксованих обертових крапель

Серед диференційних методів найбільшого розповсюдження набув метод Кенні [8], що

пов'язано із відносною простотою реалізації цього методу і достатньою його ефективністю. Суть такої фільтрації полягає у поступовому скануванні цифрового зображення "вікном" (рис. 2) із непарною кількістю елементів. Фільтрація оператором Собела реалізується шляхом почергового проходження фільтруючого вікна по кожному пікселю. Під час кожного кроку із яскравості пікселів, які потрапили у "вікно", розраховують значення градієнта у вертикальному G_y і горизонтальному G_x напрямках як суму яскравостей пікселів, домножених на відповідний коефіцієнт матриць Собела [8]. Абсолютне значення градієнта G розраховують згідно такого виразу:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} . \quad (1)$$

Максимум градієнта, обчисленого згідно (1), відповідає межі розшукуваного контуру. Цифрове зображення є дискретним, тому максимум градієнта в рідких випадках співпадає із координатами пікселя. Для методу ФОК має суттєве значення похибка визначення розмірів обертової краплі. Тому для зменшення цієї похибки потрібно використовувати метод субпіксельного визначення координат точок контуру ФОК. При використанні методів субпіксельного визначення меж ФОК можна похибку визначення розмірів ФОК зменшити в 5–100 разів [7]. В роботі [2] пропонується апроксимувати зміну градієнта поліномом 3-го степеня, а координату пікселя розраховувати за похідною від цього полінома.

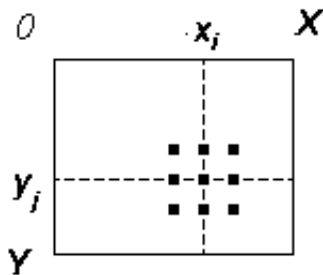


Рисунок 2 – Вікно для виконання фільтрації зображення оператором Собела

В даній роботі зображення ФОК були отримані на макеті приладу ВМН-2 (рис. 3), в якому для фотозйомки використовують цифровий фотоапарат Nikon D40 із світлочутливою матрицею розміром 6 млн. елементів. Відповідно розмір отриманих цифрових зображення складає 2000x3000 пікселів.



Рисунок 3 – Загальний вигляд макету приладу ВМН-2

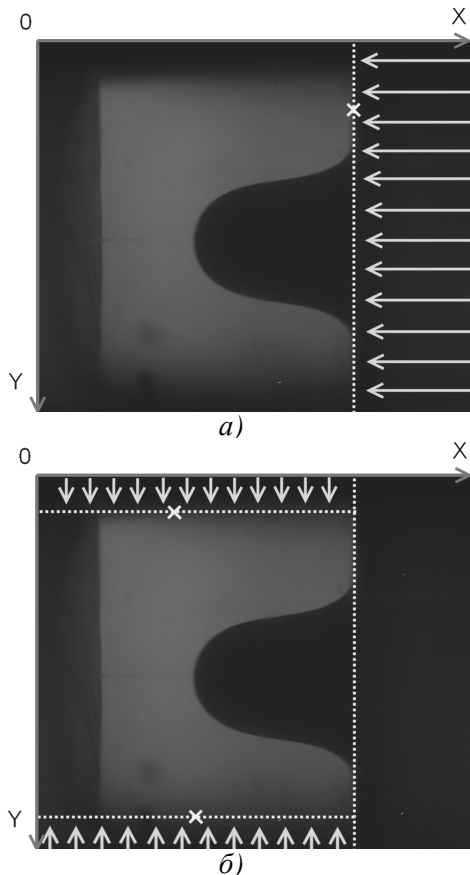
В загальному методика аналізу зображень ФОК передбачає виявлення на зображенні місця розташування різних елементів: корку, стінок трубки, точок контуру ФОК. Зображення непрозорі і прозорі ФОК (рис.1) мають елементи, які на обох типах зображень виглядають однаково. Цими елементами є корок і стінки трубки. Тому пошук цих елементів зображення здійснюють за однаковою методикою. Пошук точок контурів непрозорих і прозорих ФОК здійснюють різними методиками, що зумовлено різним виглядом цих крапель на зображенні.

Спочатку розглянемо методику аналізу цифрового зображення з метою пошуку меж корку і стінок трубки. Межі цих елементів зображення визначають для того, щоб обмежити подальшу зону зображення, в якій відбудуватиметься пошук точок контуру ФОК. Таке обмеження дозволяє перевіряти в процесі аналізу зображення правильність роботи розробленого програмного забезпечення, що підвищує ефективність знаходження точок контуру ФОК згідно із розробленою методикою. Пошук меж корку і стінок трубки достатньо здійснювати простим методом розділення зображення на об'єкт і фон по яскравості. Похибки знаходження цих меж в декілька пікселів цілком достатньо для отримання задовільного результату.

Пошук межі корку полягає у скануванні чутливим маркером по рядках зображення. Напрями сканування показані на рис. 4,а. Чутливий маркер має вигляд вікна розміром 5x5 пікселів, в межах якого розраховують середнє значення яскравості зображення $B_{avr, x,y}$. Це значення яскравості порівнюють із пороговим рівнем B_{lvl} . Якщо $B_{avr, x,y} > B_{lvl}$, то координату x маркера запам'ятовують. За положення

горизонтальної межі корку приймають найбільше значення із запам'ятованих раніше координат маркера. Пошук меж стінок трубки здійснюють скануванням зображення ФОК у верхній і нижній частинах зображення. Напрямки сканування і місця розташування інформативних точок показані на рис. 4,б. В результаті зроблених сканувань (рис. 4,б) суттєво зменшується зона зображення, в якій здійснюється пошук точок контуру ФОК.

Подальша обробка зображень із непрозорою і прозорою ФОК відрізняється. Розглянемо методику сканування зображення непрозорої ФОК. На початкових етапах пошуку точок контуру непрозорої ФОК її можна відділяти від фону по яскравості, що суттєво спрощує процедуру оброблення зображення. Процедура пошуку точок контуру ФОК проходить в декілька етапів.



× — місце розташування інформативної точки; ← — напрям сканування; ····· — визначена межа елемента зображення

Рисунок 4 – Напрямки сканування зображень ФОК для пошуку меж корку і стінок трубки

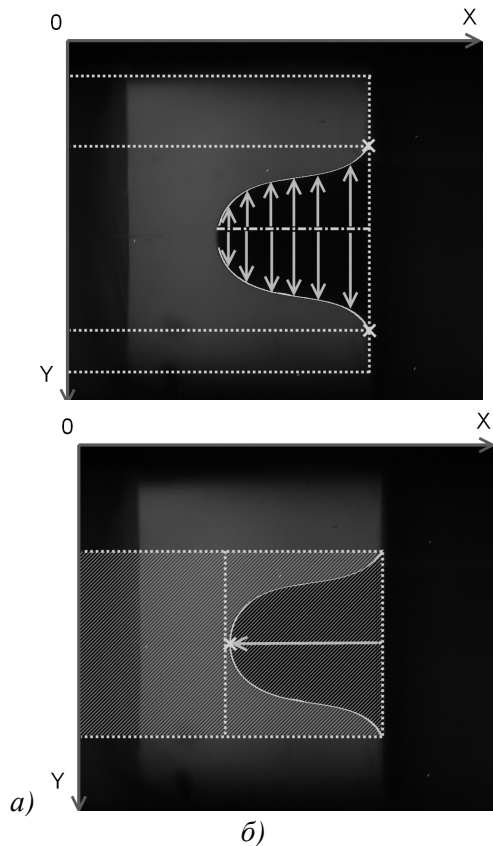
Спочатку визначають лінію зображення, яка

відповідає осі обертання. Визначення лінії осі обертання полягає у розрахунку коефіцієнтів полінома 1-го порядку, яким ця лінія описується. Визначення лінії осі обертання має важливе значення тому, що на цій лінії знаходиться вершина краплі, яку називають омбілічною точкою. Вісь обертання є лінією симетрії ФОК і тому від цієї лінії зручно здійснювати подальший аналіз зображення для визначення координат точок контуру ФОК. Для визначення лінії осі обертання зображення умовно розбивають на дві половини лінією (штрих-пунктирна лінія на рис. 5,а). Від цієї лінії відбувається сканування зображення у вертикальному напрямку у верхній і нижній частинах зображення (на рис. 5,а показано стрілками). Сканування відбувається чутливим маркером-вікном 5x5 пікселів, у якому розраховують середню яскравість зображення $V_{avr\ x,y}$. Коли маркер доходить до точки, в якій яскравість $V_{avr\ x,y}$ є більшою за пороговий рівень яскравості V_{lvl} , то координати цієї точки зображення запам'ятовують у відповідному масиві (на рис. 5,а ці точки показані кривою на межі краплі). Координати точок верхньої частини контуру записують у масив TP , а нижньої у масив VTM . Ці масиви містять інформацію про координати точок зображення, які відповідають контуру ФОК і мають вигляд таблиць $[[x_1,y_1],[x_2,y_2], \dots, [x_N,y_N]]$. Разом із визначенням координат точок контуру ФОК на даному етапі уточнюють верхню і нижню межі зображення, в яких знаходиться ФОК. Для цього використовують координати точок, які відповідають кінцевим точкам контуру ФОК, інформація про координати цих точки знаходиться у останніх елементах масивів TP і VTM (на рис. 5,а ці точки показані хрестоподібними маркерами).

У визначених на даному етапі межах зображення (освітлена область на рис. 5,б) розраховують градієнти згаданим вище методом Кенні. В околі точок зображення, координати яких зберігаються в масивах TP і VTM , перепад градієнта зображення апроксимують поліномом 3-го порядку у вертикальному напрямку. Координату у точки контуру ФОК визначають з похідної від полінома, прирівнявши її до нуля. Нові значення ординат у записують у масиви TP і VTM , таким чином ці масиви містять абсциси x координат точок, визначені попіксельно, а ординати у з субпіксельною точністю.

На даному етапі в масивах TP і VTM містяться координати точок тільки частини контуру ФОК, але цієї кількості точок цілком достатньо для визначення лінії осі обертання.

Рівняння осі обертання ФОК визначають наступним чином. Координати точок зображення, які відповідають осі обертання, зберігають у масиві SP і розраховують їх наступним чином: $x_{i SP} = x_{i TP} = x_{i BTM}$, $y_{i SP} = 0,5(y_{i TP} + y_{i BTM})$. Розраховані координати в масиві SP апроксимують лінійною залежністю.



× — місце розташування інформативної точки; ← — напрям сканування; ····· — визначена межа елемента зображення; — — визначені точки контуру ФОК

Рисунок 5 – Сканування зображення для пошуку точок контуру непрозорої ФОК (а) і омбілічної точки (б)

Пошук омбілічної точки ФОК здійснюють скануванням зображення вздовж лінії осі обертання (на рис. 5,б показано стрілкою). Аналогічно до процедури пошуку координат точок контуру ФОК, координати омбілічної точки визначають в два етапи: спочатку методом розділення зображення на об'єкт і фон по яскравості, а потім апроксимацією градієнта в горизонтальному напрямку. В результаті отримують координати $[x_0, y_0]$ омбілічної точки ФОК (перехресний маркер на рис. 5,б). Частина визначеного контуру ФОК має розрив біля

омбілічної точки (рис. 5,а). Щоб зменшити цей розрив зображення ФОК сканується у вертикальному напрямку від лінії осі обертання вгору і вниз, аналогічно до пошуку інших координат точок контуру ФОК так, як це було описано вище. Визначені координати точок додаються в масиви TP і BTM . Методика оброблення даних в масивах TP і BTM для непрозорої і прозорої фіксованих крапель є однаковою і тому буде розглянута після опису методики сканування зображення із прозорою краплею.

Порядок сканування зображення із прозорою краплею є аналогічним до вище описаного. Відмінність полягає у методиці визначення меж краплі на зображенні, що пов'язано із виглядом цієї краплі (рис.1,б). Для розроблення алгоритму визначення межі контуру прозорої ФОК було проаналізовано зміну яскравості зображення біля контуру прозорої ФОК. Ця частина зображення має вигляд затемненої ділянки, яка по формі близька до контуру краплі. Оптичні промені, які проходять через шари рідини краплі під її поверхнею заломлюються таким чином, що, виходячи зі скляної трубки, не приймають участі у формуванні зображення на чутливій матриці камери, якою отримують цифрове зображення. Тому темна частина зображення біля контуру ФОК відповідає внутрішній частині краплі. Зовні контуру краплі зображення є світлим — ця частина зображення формується оптичними променями, які проходять зовні поверхні обертової краплі і попадають на матрицю камери. Контур обертової краплі на зображенні формується оптичними променями, які проходять по дотичній до поверхні краплі [9,10]. Перехід від темної ділянки зображення до світлої є поступовим (рис. 6). Це пояснюється тим, що крапля освітлюється дифузним джерелом освітлення і на її поверхню падають оптичні промені під різними але невеликими кутами і кількість променів, які пройшли по дотичній до поверхні краплі по мірі віддалення від її поверхні зростає поступово. Звідси можна зробити висновок, що межа краплі на зображенні розміщена в точках зображення, які знаходяться між точкою з мінімальною яскравістю і точкою, яскравість якої відповідає фону зображення.

З метою розроблення ефективного алгоритму пошуку межі прозорої ФОК було побудовано графічні залежності зміни яскравості B в різних стовпцях зображень у середовищі MathCad (рис. 6). Як видно із графіків, контур прозорої краплі має вигляд

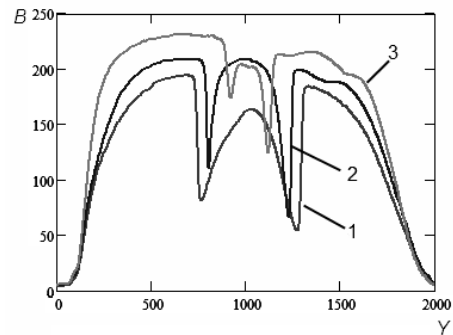
визначення перепаду рівня яскравості, різного по ширині і по інтенсивності. На графіках лінія 1 відповідає зміні яскравості біля основи краплі, 2 — в центральній частині краплі, 3 — біля вершини. Простий метод розділення зображення по рівню яскравості в даному випадку використати не можна: частина контуру краплі, яка має менший перепад яскравості, буде пропущена. Особливо це помітно для стовпців зображення біля вершини краплі (графік 3 на рис. 6). В такому випадку необхідно використовувати методикою пошуку точок контуру краплі, яка б аналізувала зміну яскравості на невеликій ділянці зображення.

Як видно з графіків (рис. 6,а) спостерігаються мінімуми яскравості на краях зображення і два мінімуми біля межі контуру краплі. Ці мінімуми яскравості точок зображення можна використати при пошуку межі краплі. Зміна яскравості у стовпцях зображення є симетричною, тому зображення розділюють на дві частини в горизонтальному напрямку і кожен частину оброблюють незалежно від іншої. На графіку (рис. 6,а) точки з координатами x від 0 до 1000 відповідають верхній частині зображення, а точки від 1000 до 2000 нижній частині.

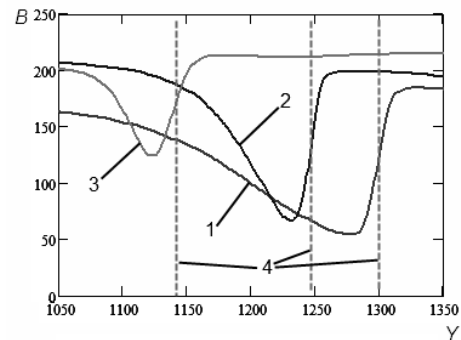
Розглянемо методикою пошуку межі прозорої краплі в нижній частині зображення. При пошуку межі краплі необхідно визначити координати точки зображення у його стовпці, яка має локальний мінімум яскравості B_{min} (рис. 7). Для пошуку мінімуму яскравості точок зображення біля межі краплі пропонується використовувати чутливий маркер, в якому на значній відстані (50 пікселів) порівнюється яскравість B_1 і B_2 крайніх точок маркера. Цю відстань між крайніми точками маркера було визначено експериментально під час аналізу локальних змін яскравості (рис. 6) для зображень із прозорими краплями. Якщо яскравість $B_1 \geq B_2$, то сканування зображення продовжується. Якщо $B_1 < B_2$, то сканування зображення маркером припиняється і відбувається сканування зображення в межах маркера. При цьому в межах маркера здійснюється пошук точки зображення з найменшою яскравістю B_{min} .

Від цієї точки сканується зображення у стовпцю по напрямку руху маркера і в процесі цього сканування визначають максимальний рівень B_{max} яскравості в іншій частині стовпця. Межу контуру краплі субпіксельним методом шукають біля точки з яскравістю $B_{avr} = 0,5(B_{min} + B_{max})$. Для цього знову перескановують частину стовпця зображення від точки з яскравістю B_{min} , в результаті чого

визначають координати точки, яка має яскравість B_{avr} . В околі цієї точки розраховують градієнт і визначають координати межі краплі у стовпці субпіксельним методом аналогічно як для непрозорої краплі. Такою методикою визначають координати точок контуру краплі у верхній частині зображення, скануючи зображення по стовпцях, а також координати облікової точки, скануючи рядок зображення вздовж осі обертання.



а)



б)

1 — $x=1750$; 2 — $x=1300$; 3 — $x=680$; 4 — межа краплі; а — зміна яскравості вздовж усього стовпця зображення; б — зміна яскравості біля контуру прозорої ФОК

Рисунок 6 – Зміна яскравості зображення прозорої ФОК в різних стовпцях зображення

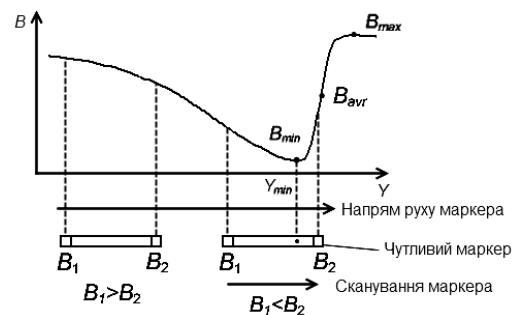


Рисунок 7 – Сканування зображення чутливим маркером

На зображеннях (рис. 1) ФОК може бути повернутою не невеликий кут α , що допускається при настроюванні дослідної установки. Величину кута α визначають під час процедури аналізу зображення при визначенні рівняння осі обертання. Вісь обертання описується прямою і відповідно перша похідна від рівняння прямої рівна тангенсу кута α нахилу лінії осі обертання на зображенні обертової краплі. Для подальшого розрахунку МН згідно методу ФОК [1,2] початок координат контуру ФОК повинен знаходитись в омбілічній точці, яка має координати на зображенні $[x_0, y_0]$. З урахуванням кута α і координат омбілічної точки значення координат $[x_{ni}, y_{ni}]$ точок контуру ФОК розраховують згідно виразу

$$\begin{bmatrix} x_{ni} \\ y_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \left(\arctg \left(\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right) - \alpha \right) \\ \sin \left(\arctg \left(\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right) - \alpha \right) \end{bmatrix} \times \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}. \quad (2)$$

На основі координат $[x_{ni}, y_{ni}]$ точок контуру ФОК згідно ітераційної методики [1,2] розраховують теоретичний контур ФОК, який відповідає отриманому контуру із зображення. На основі цих двох контурів розраховують міжфазний натяг досліджуваних рідин.

ВИСНОВКИ

На основі розглянутої методики аналізу зображень ФОК було розроблено алгоритм і програмне забезпечення для автоматизованого визначення координат точок контурів ФОК з подальшим розрахунком МН рідин, що спростило процес вимірювання. Із застосуванням розробленого програмного забезпечення було розроблено прилад ВМН-2 для вимірювання динамічного МН рідин методом ФОК. Вказані прилад і програмне забезпечення можуть бути використаними для дослідження параметрів розчинів ПАР, підбору типу і концентрації ПАР у розчинах, які використовують в різних технологічних процесах.

1. Кісіль І. С. Вимірювання динамічного міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин методикою фіксованої обертової краплі / І. С. Кісіль, В. Д. Михайлюк, В. Б. Білицук, І. Ю. Хемій // *Нафтова і газова промисловість*. – 2010. – №6. С. 33–36. 2. Кісіль І. С. Використання регресійних методик для визначення поверхневого натягу рідин / І. С. Кісіль, Р. Т. Боднар, В. Б. Білицук, Б. В. Костів, О. Б. Барна // *Методи та прилади контролю якості*. – 2012. – №1 (28). С. 91–99. 3. Русанов А. И. *Межфазная тензиометрия* / А. И. Русанов, В. А. Прохоров – СПб: Химия, 1994. – 400с. 4. Кісіль Р. І. Удосконалена методика і прилад для вимірювання міжфазного натягу методом обертової краплі./ Р. І. Кісіль, С. А. Чеховський // *Методи та прилади контролю якості*. – 1999. – №4. – С. 36–39. 5. Порев В. А. Виділення контуру обертової краплі методом радіальної розгортки при вимірюванні міжфазного натягу / В. А. Порев, Г. В. Порев, Р. І. Кісіль // *Методи та прилади контролю якості*. – 2000. – № 6. – С. 32–36. 6. Білінський Й. Й. *Класифікація методів крайового детектування зображень* / Білінський Й. Й. // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2007. – № 1. – С.161–169. 7. Fisher R. B. A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection / R. B. Fisher, D. K. Naidu // *Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision*. – Springer-Verlag, 1996. – P. 205–229. 8. Canny J. A Computation Approach to Edge Detection. // *IEEE Trans. Pat-tern Anal. Mach. Intell* – 1986. – Vol. 8, №6. – P. 679–698. 9. Coucoulas L. M. The Refraction Correction For The Spinning Drop Interfacial Tensiometer / L. M. Coucoulas, R. A. Dawe, E. G. Mahers // *J. Colloid Interface Sci.* – 1983. – Vol. 93. – № 1. – P.281-284. 10. Puig J. E. Optical Analysis of the Spinning Drop / J. E. Puig, Y. Seeto, C. V. Pesheck, L. E. Scriven. / *Journal Colloid and Interface Science*. – 1992. – №. 2 (148). – P. 459-468.

Поступила в редакцію 30.11.2014р.

Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Білінський Й.Й. та докт. техн. наук, проф. Кісіль І. С.