

Метрологічні дослідження вимірювання міжфазного натягу рідин методом обертової краплі

В.Б. Біліщук

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, 76019, Івано-Франківськ, Україна
inst.energy@gmail.com

Анотація

Розглянуто вдосконалену методику вимірювання міжфазного натягу рідин методом обертової краплі. В удосконаленій методиці пропонується визначити координати точок контуру обертової краплі з цифрового зображення із застосуванням ітераційного розрахунку координат точок відповідного контуру обертової краплі.

Визначено джерела невизначеності вимірювання міжфазного натягу рідин удосконаленим методом обертової краплі та приладом, що його реалізує. Розроблено математичну модель оцінювання невизначеності вимірювання. Показано, що методика має вищу чутливість до невизначеностей коефіцієнта оптичного збільшення скляної трубки і коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу. Також показано, що невизначеністю розрахунку координат точок і радіусу контуру обертової краплі методом Рунге-Кутта можна знехтувати.

Розраховано значення оцінки невизначеності вимірювань на прикладі вимірювання міжфазного натягу 0,02% водного розчину стінолу на межі з гасом. Отримане значення розширеної невизначеності підтверджує ефективність застосування методу розрахунку міжфазного натягу рідин з використанням множини координат точок контуру краплі.

Ключові слова: невизначеність вимірювання; міжфазний натяг; обертова крапля.

Отримано: 11.08.2020

Відредаговано: 09.10.2020

Схвалено до друку: 23.10.2020

1. Вступ

З метою збільшення об'ємів нафтогазовидобутку в Україні широко використовуються поверхнево-активні речовини, які дозволяють змінювати міжфазний натяг рідин або розчинів. За допомогою водяних та інших розчинів поверхнево-активних речовин здійснюється обробка привибійних зон пластів експлуатаційних і нагнітальних свердловин, а також підтримування пластових тисків на нафтових родовищах для інтенсифікації видобутку нафти.

2. Аналіз джерел

Наразі як в Україні, так і за кордоном розроблені й випускаються дрібними разовими партіями прилади для вимірювання міжфазного натягу двох взаємно нерозчинних рідин. У принцип роботи таких приладів закладено метод обертової краплі, який використовують для визначення низьких значень міжфазного натягу (до 0,001 мН/м). Суть методу полягає в тому, що в герметично закритій трубці міститься важча рідина і крапля легшої рідини. При обертанні трубки навколо горизонтальної осі важча рідина витісняється до периферії, а крапля легшої рідини – до осі трубки. Крапля легшої рідини набуває видовженої форми вздовж

осі обертання. В різних методиках (Б. Воннегута, Дж. Слаттері, Принсена, Р. Кісіля) для розрахунку міжфазного натягу рідин використовують різні інформативні параметри – радіус, довжину, об'єм краплі, координати певних точок на контурі краплі [1–4].

Метою роботи є вдосконалення методики вимірювання і дослідження метрологічних характеристик методики та приладу для визначення міжфазного натягу рідин методом обертової краплі.

3. Теоретичний виклад

Спочатку розглянемо суть удосконаленої методики визначення міжфазного натягу рідин.

У процесі обертання крапля легшої рідини витісняється важчою рідиною до осі обертання, вільний кінець краплі витягується вздовж осі обертання, а іншим кінцем крапля легшої рідини утримується на твердій поверхні корка завдяки силам адгезії. У стаціонарному процесі обертання крапля легшої рідини набуває форми, зображеної на рис. 1.

Скляна трубка з важчою рідиною діє як сферична лінза, яка викликає спотворення видимих контурів обертової краплі всередині трубки. Видимі радіальні розміри краплі через скляну труб-

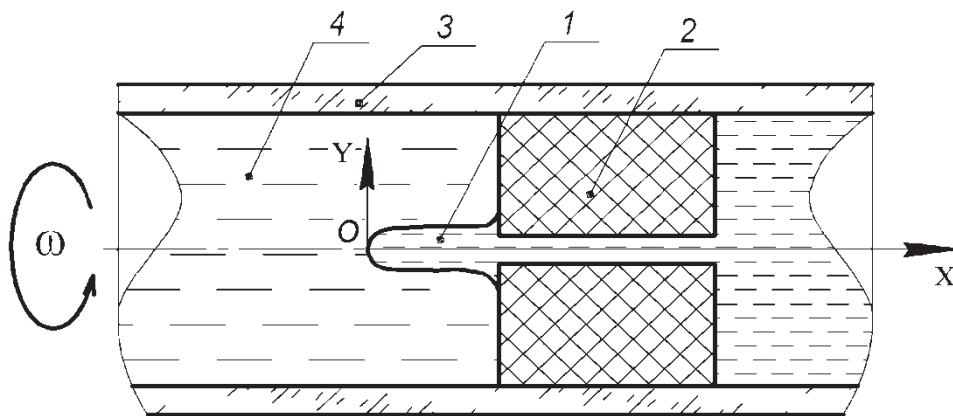


Рис. 1. Форма фіксованої краплі легшої рідини на вертикальній твердій поверхні корка всередині трубки з важчою рідиною в процесі її обертання: 1 – крапля легшої рідини; 2 – корок; 3 – скляна трубка; 4 – важча рідина

ку є більшими, ніж насправді. Координати точок контуру обертової краплі із зображення визначають з урахуванням оптичного збільшення скляної трубки з важчою рідиною, яке залежить від оптичних властивостей важчої рідини, матеріалу трубки, навколишнього середовища, розмірів трубки, розмірів краплі всередині трубки. У роботах [3, 5] показано, що оптичне збільшення трубки M із важчою рідиною практично рівне коефіцієнту оптичного заломлення важчої рідини для скляних трубок із відношенням внутрішнього діаметра до зовнішнього, рівним 0,5.

У розглянутій методиці отримують цифрові зображення обертової краплі в трубці під час обертання, з яких визначають координати точок контуру обертової краплі з використанням субпіксельного методу [6]. Далі здійснюють перерахунок координат точок $[x_{pi}, y_{pi}]$ цифрового зображення (пікселів) у координати точок із розмірністю метрів $[x_i, y_i]$ з урахуванням коефіцієнта перетворення оптичної системи K_{opt} . Значення коефіцієнта K_{opt} отримують після калібрування приладу за допомогою калібрів із нанесеною сіткою або шкалою. При здійсненні процедури калібрування на цифровому зображенні в комп'ютері відраховують кількість пікселів N_3 , які відповідають певній кількості L_{em} поділок калібру. Коефіцієнт перетворення K_{opt} розраховують так:

$$K_{opt} = \frac{L_{em}}{N_3}. \quad (1)$$

З урахуванням коефіцієнтів перетворення оптичної системи й оптичного збільшення вирази розрахунку координат точок мають такий вигляд:

$$x_i = \frac{x_{pi} K_{opt}}{M}, y_i = y_{pi} K_{opt}. \quad (2)$$

Далі розраховують координати точок $[x_{ci}, y_{ci}]$ такого контуру обертової краплі, який відповідає координатам точок контуру на цифровому зображенні. Для розрахунку розв'язують такі диференціальні рівняння:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dl_c} = K_c - \frac{x_c^2}{2} - \frac{\sin \varphi}{x_c}; \\ \frac{dx_c}{dl_c} = \cos \varphi; \\ \frac{dy_c}{dl_c} = \sin \varphi, \end{cases} \quad (3)$$

де $x_c = x/c$, $y_c = y/c$ – безрозмірні координати точок контуру обертової краплі; x , y – розмірні координати точок контуру обертової краплі; $c = \sqrt[3]{\sigma/\Delta\rho\omega^2}$ – обертова стала; $\Delta\rho$ – різниця густин рідин; ω – кутова швидкість обертання; σ – міжфазний натяг на межі розділу двох рідин; φ – 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 обертової краплі у її вершині, відповідно; $l_c = l/c$, l – безрозмірна і розмірна довжина дуги меридіана профілю обертової краплі від її вершини, відповідно.

Розрахунок координат точок контуру краплі на основі рівнянь (3) здійснюють числовим методом інтегрування Рунге-Кутта 4-го порядку з корекцією на кроці. Цим методом розраховують значення функції з поточним і в два рази меншим кроком інтегрування. Оцінюють різницю в обчисленнях на кроці [7] за виразом:

$$E_{Ti} = \frac{16}{15} (f_{i(h/2)} - f_{i(h)}), \quad (4)$$

де $f_{i(h)}$, $f_{i(h/2)}$ – отримані значення функції з поточним і в два рази меншим кроком інтегрування. Крок інтегрування коригують таким чином, щоб обчислене значення E_{Ti} на кроці входило в наперед задані межі. За необхідності обчислення на кроці повторюють. Через значний об'єм обчислень розрахунок реалізовано в програмі комп'ютера.

Розрахунок координат точок контуру обертової краплі здійснюють ітераційною методикою, через неможливість визначення кривизни K_c із зображення. В ході такого розрахунку програма

Результати експериментальних досліджень міжфазного натягу 0,02% водного розчину стінолу на межі з гасом

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
σ_r , мН/м	1,778	1,796	1,761	1,748	1,836	1,827	1,774	1,781
№ п/п	9	10	11	12	13	14	15	16
σ_r , мН/м	1,793	1,755	1,796	1,761	1,791	1,731	1,723	1,827

комп'ютера підбирає такі значення K_c , щоб розраховані координати точок контуру краплі відповідали контуру на зображенні.

Розрахунок міжфазного натягу обертової краплі здійснюють за допомогою такого рівняння вимірювань:

$$\sigma = \Delta\rho\omega^2 \left(\frac{R_e \cdot K_{\text{опт}}}{M \cdot R_c} \right)^3, \quad (5)$$

де R_e і R_c – радіуси контурів обертової краплі на зображенні та з розв'язку рівняння (3). Радіуси R_e і R_c визначають у відповідних перетинах цих контурів.

Невизначеностями вхідних величин є: невизначеність вимірювання різниці густин досліджуваних рідин, невизначеність вимірювання частоти обертання трубки із рідинами, невизначеність координат точок і радіусу контуру обертової краплі на зображенні, невизначеність розрахованих координат точок і радіусу контуру обертової краплі.

4. Експериментальні дослідження

Для розрахунку стандартної невизначеності типу А виконали багаторазові вимірювання міжфазного натягу 0,02% водного розчину стінолу на межі з гасом (див. табл. 1). Вимірювання здійснювалися для таких умов: частота обертання трубки $\omega = 390$ рад/с, різниця густин рідин $\Delta\rho = 180$ кг/м³, коефіцієнт оптичного збільшення $M = 1,33$.

Середнє значення вимірювань рівне $\bar{\sigma} = 1,779 \times 10^{-3}$ Н/м. Стандартна невизначеність вимірювань дорівнює:

$$u_A(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{16} (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n(n-1)}} = 8,3 \times 10^{-3} \text{ Н/м}. \quad (6)$$

Розглянемо невизначеності типу В.

Визначення різниці густин досліджуваних рідин здійснювали густиноміром ВІП-2М. Абсолютна похибка вимірювання густини рідин становить $\Delta\rho = \pm 0,1$ кг/м³ [8], а стандартна невизначеність $u_B(\rho) = 0,06$ кг/м³.

Вимірювання частоти обертання трубки з рідинами здійснюється мікропроцесорним блоком приладу, на основі підрахунку кількості імпульсів від тахометра двигуна за визначений проміжок часу. Тахометр двигуна приладу має вигляд диска з десятьма отворами, отже дискретність відліку становить 0,1 об/с, а стандартна невизначеність

$u_B(f_1) = 0,028$ об/с. Зразковий інтервал часу, впродовж якого відбувається підрахунок імпульсів тахометра, задається таймером мікропроцесора з дискретністю 16 мкс. Стандартна невизначеність через дискретність зразкового інтервалу часу $u_B(f_2) = 4 \times 10^{-7}$ об/с.

Таймер мікроконтролера калібрували з використанням частотоміра ЧЗ-63, в якому похибка вимірювання частоти в діапазоні 10 кГц рівна 10^{-4} Гц [9]. Оскільки прилад реєструє частоту сигналу генератора діленою на 10, то похибка калібрування становила 10^{-5} об/с, а стандартна невизначеність $u_B(f_3) = 2,8 \times 10^{-6}$ об/с. $u_B(f_2)$ і $u_B(f_3)$ є набагато меншими за $u_B(f_1)$, і ними можна знехтувати. Стандартна невизначеність частоти обертання трубки $u_B(\omega) = 0,17$ рад/с.

На невизначеність визначення координат точок контуру обертової краплі на зображенні, згідно з (2), мають вплив невизначеності коефіцієнтів $K_{\text{опт}}$ і M .

Невизначеність розрахунку коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу $K_{\text{опт}}$ залежить від характеристик калібрувальної сітки і здійснення відліку відстані на цифровому зображенні. Для розрахунку коефіцієнта $K_{\text{опт}}$ використовували калібрувальну сітку мікроскопа МБС. Згідно з [10], відстань між лініями сітки дорівнює $1 \pm 1 \times 10^{-3}$ мм, а стандартна невизначеність рівна $u_B(L_{em}) = 0,6 \times 10^{-6}$ м. Похибка відліку на цифровому зображенні становила ± 1 піксель, що відповідає стандартній невизначеності $u_B(N_3) = 0,6$ пікселя. Відлік кількості $N_3 = 1967$ пікселів на зображенні здійснювали для 10 ліній сітки, що відповідає відстані $L_{em} = 10$ мм. Розраховане значення $K_{\text{опт}} = 10^{-3}/196,7$ м/піксель.

З (1) отримуємо такий вираз для розрахунку сумарної стандартної невизначеності калібрування оптичної системи:

$$u_B(K_{\text{опт}}) = \sqrt{\frac{1}{N_3^2} u_B^2(L_{em}) + \frac{L_{em}^2}{N_3^4} u_B^2(N_3)}. \quad (7)$$

Розраховане значення $u_B(K_{\text{опт}}) = 1,6 \times 10^{-9}$ м/піксель.

Коефіцієнт оптичного збільшення M дорівнює коефіцієнту оптичного заломлення важчої рідини. Коефіцієнт M вимірювали рефрактометром з похибкою 1×10^{-4} [11]. Стандартна невизначеність $u_B(M) = 0,6 \times 10^{-4}$.

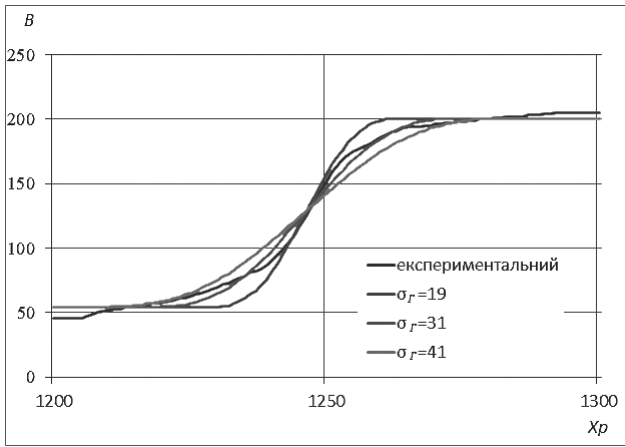


Рис. 2. Зміна яскравості точок зображення на межі контуру обертової краплі

Невизначеність визначення координат точок контуру обертової краплі залежить від кількості пікселів світлочутливої матриці відеокамери. Застосування методу субпіксельного визначення меж контуру обертової краплі дозволяє суттєво знизити цю невизначеність [12]. На визначення координат точок контуру обертової краплі має вплив розфокусування зображення. Аналітичні розрахунки невизначеності визначення координат точок контуру обертової краплі є складними, але можна розрахувати цю невизначеність методом моделювання, як описано у роботі [12].

Для розрахунку невизначеності було створено тестові цифрові зображення обертової краплі із різними величинами розсіювання з використанням фільтра Гауса. Оцінку відповідності цифрового зображення експериментального контуру обертової краплі до модельованого було зроблено на основі порівняння зміни яскравості пікселів на зображеннях (рис. 2). Як видно з рис. 2, чіткість експериментальних зображень відповідає тестовим зображенням, із фільтром Гауса з середнім квадратичним розсіюванням $\sigma_f = 31$.

Залежність різниці між дійсними і визначеними координатами точок контурів обертових кра-

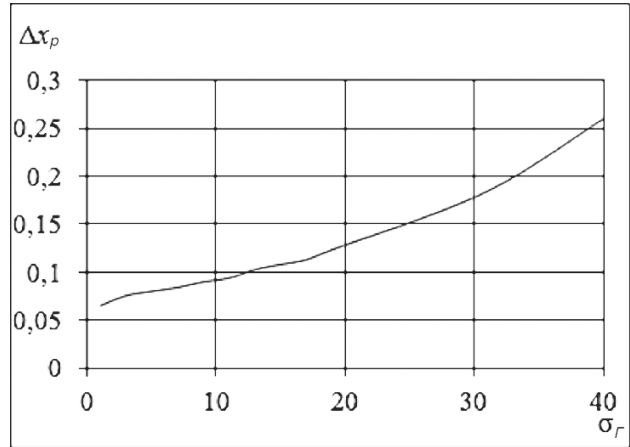


Рис. 3. Залежність абсолютної похибки Δx_p визначення координат точок від розсіювання фільтра Гауса σ_f

пель на модельованих зображеннях від значення середнього квадратичного відхилення розсіювання фільтра Гауса σ_f наведено на рис. 3. Для $\sigma_f = 31$ ця різниця становить $\Delta y_p = \pm 0,18$ пікселя, а невизначеність $u_B(y_p) = 0,1$ пікселя. Оскільки радіус краплі визначають $R_e = 0,5(y_{p1} - y_{p2})$, то сумарна стандартна невизначеність радіусу краплі тоді становить:

$$u_B(R_e) = \sqrt{0,25 \cdot u_B^2(y_{p1}) + 0,25 \cdot u_B^2(y_{p2})} \quad (8)$$

Розраховано значення $u_B(R_e) = 0,07$ пікселя.

Детальний аналіз похибки обчислень координат точок контуру обертової краплі як методом Рунге-Кутта, так і через заокруглення чисел при розрахунках здійснювали у роботі [13]. На основі зробленого аналізу максимальне значення сумарної стандартної невизначеності розрахунку не може перевищувати значення $u_B(R_e) = 6 \times 10^{-8}$.

Результат вимірювання отримують опосередковано з рівняння вимірювань (5). Сумарну стандартну невизначеність розраховують з урахуванням коефіцієнтів ваги як часткових похідних від рівняння (5):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \rho} = \omega^2 \left(\frac{R_e \cdot K_{\text{онт}}}{M \cdot R_c} \right)^3, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial \omega} = 2 \Delta \rho \omega \left(\frac{R_e \cdot K_{\text{онт}}}{M \cdot R_c} \right)^3, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial R_e} = 3 \Delta \rho \omega^2 R_e^2 \left(\frac{K_{\text{онт}}}{M \cdot R_c} \right)^3,$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial K_{\text{онт}}} = 3 \Delta \rho \omega^2 K_{\text{онт}}^2 \left(\frac{R_e}{M \cdot R_c} \right)^3, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial M} = -\frac{3 \Delta \rho \omega^2}{M^4} \left(\frac{R_e \cdot K_{\text{онт}}}{R_c} \right)^3, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial R_c} = -\frac{3 \Delta \rho \omega^2}{R_c^4} \left(\frac{R_e \cdot K_{\text{онт}}}{M} \right)^3.$$

Стандартну невизначеність типу В розраховують таким чином:

$$u_B(\sigma) = \left[\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \Delta \rho} \right)^2 u_B^2(\Delta \rho) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \omega} \right)^2 u_B^2(\omega) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial R_e} \right)^2 u_B^2(R_e) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial K_{\text{онт}}} \right)^2 u_B^2(K_{\text{онт}}) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial M} \right)^2 u_B^2(M) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial R_c} \right)^2 u_B^2(R_c) \right]^{1/2} = 6 \times 10^{-6} \text{ Н/м.} \quad (9)$$

Сумарна невизначеність вимірювань рівна:

$$u_c(\sigma) = \sqrt{u_A^2(\sigma) + u_B^2(\sigma)} = 1,04 \times 10^{-5} \text{ Н/м.} \quad (10)$$

Розширена невизначеність вимірювань для довірчого рівня 99% рівна $U(\sigma) = 1,04 \times 10^{-5} \times 2,13 = 2,2 \times 10^{-5} \text{ Н/м}$, а результат вимірювань $\sigma = 1,778 \pm 0,022 \text{ мН/м}$.

5. Обговорення результатів

Для оцінки впливу різних невизначеностей на результат розрахуємо їх числові значення. Значення коефіцієнтів чутливості такі:

$$\begin{aligned} \partial\sigma/\partial\Delta\rho &= 1,7 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}^2, \quad \partial\sigma/\partial\omega = 1,5 \times 10^{-5} \text{ кг/с}, \quad \partial\sigma/\partial R_c = \\ &= 4 \times 10^{-5} \text{ кг}/(\text{с}^2 \cdot \text{піксель}), \quad \partial\sigma/\partial K_{\text{опт}} = 1,7 \times 10^3 \text{ піксель}/ \\ &\text{м} \cdot \text{кг}/\text{с}^2, \quad \partial\sigma/\partial M = -7 \times 10^{-3} \text{ кг}/\text{с}^2, \quad \partial\sigma/\partial R_c = -5 \times 10^{-3} \text{ кг}/\text{с}^2. \end{aligned}$$

Розглянута методика вимірювання є чутливою до $u_B(K_{\text{опт}})$, $u_B(M)$ і $u_B(R_c)$. Тому необхідно забезпечувати прецизійність визначення цих величин. Значення складових сумарної невизначеності такі:

$$\begin{aligned} \partial\sigma/\partial\Delta\rho \cdot u_B(\Delta\rho) &= 1 \times 10^{-6} \text{ Н/м}, \\ \partial\sigma/\partial\omega \cdot u_B(\omega) &= 2,7 \times 10^{-6} \text{ Н/м}, \\ \partial\sigma/\partial R_c \cdot u_B(R_c) &= 3 \times 10^{-6} \text{ Н/м}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial\sigma/\partial K_{\text{опт}} \cdot u_B(K_{\text{опт}}) &= 2,8 \times 10^{-6} \text{ Н/м}, \\ \partial\sigma/\partial M \cdot u_B(M) &= -4 \times 10^{-7} \text{ Н/м}, \\ \partial\sigma/\partial R_c \cdot u_B(R_c) &= 2,7 \times 10^{-10} \text{ Н/м}. \end{aligned}$$

Стандартна невизначеність $u_B(R_c)$ є набагато меншою порівняно з іншими, отже цією складовою можна нехтувати. Відомо, що метод обертової краплі чутливий до вібрацій, які виникають як у приладі, так і ззовні. Вібрації мають випадковий характер, і врахувати їхній вплив на результат аналітичними методами складно. Оцінка впливу вібрацій на результат вимірювань може бути темою подальших досліджень.

6. Висновки

Здійснено аналіз складових невизначеностей удосконаленого методу і приладу для визначення міжфазного натягу рідин методом обертової краплі. Отримано й оцінено числові значення складових невизначеностей на прикладі вимірювання міжфазного натягу 0,02% водного розчину стінолу на межі з гасом. Отримане значення розширеної невизначеності підтверджує ефективність застосування методу розрахунку міжфазного натягу рідин з використанням множини координат точок контуру краплі.

Метрологические исследования измерения межфазного натяжения жидкостей методом вращающейся капли

В.Б. Билищук

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, 76019, Ивано-Франковск, Украина
inst.energy@gmail.com

Аннотация

Рассмотрена усовершенствованная методика измерения межфазного натяжения жидкостей методом вращающейся капли. В усовершенствованной методике предлагается определять координаты точек контура вращающейся капли с цифрового изображения с применением итерационного расчета координат точек соответствующего контура вращающейся капли.

Определены источники неопределенности измерения межфазного натяжения жидкостей усовершенствованным методом вращающейся капли и реализующим его прибором. Разработана математическая модель оценки неопределенности измерений. Показано, что методика имеет высокую чувствительность к неопределенности коэффициента оптического увеличения стеклянной трубки и коэффициента преобразования оптической системы прибора. Также показано, что неопределенностью расчета координат точек и радиуса контура вращающейся капли методом Рунге-Кутты можно пренебречь.

Рассчитано значение оценки неопределенности измерений на примере измерения межфазного натяжения 0,02% водного раствора стінолу на границе с керосином. Полученное значение расширенной неопределенности подтверждает эффективность применения метода расчета межфазного натяжения жидкостей с использованием множества координат точек контура капли.

Ключевые слова: неопределенность измерения; межфазное натяжение; вращающаяся капля.

Metrological study of measuring the interfacial tension of liquids by the method of a rotating drop

V. Bilishchuk

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Karpatska Str., 15, 76019, Ivano-Frankivsk, Ukraine
inst.energy@gmail.com

Abstract

An improved procedure for measuring the interfacial tension of liquids by the rotating drop method is considered. In the improved method it is proposed to determine the coordinates of the points of the contour of the rotating drop from the digital image using iterative calculation of the coordinates of the points of the corresponding contour of the rotating drop. The coordinates of the points of the drop shape are calculated by the numerical method of Runge-Kutta integration of the 4th order with step correction.

The sources of uncertainty of measuring the interfacial tension of liquids are determined by the improved method of a rotating drop and the device that realizes it. Uncertainties of input values are the following: uncertainty of measuring the difference of densities of investigated liquids, uncertainty of measuring the frequency of rotation of the tube with liquids, uncertainty of coordinates of points and radius of the rotating drop contour in the image, uncertainty of calculated coordinates of points and radius of rotating drop contour. A mathematical model for estimating measurement uncertainty has been developed. It is shown that the procedure has a higher sensitivity to the uncertainties of the optical magnification of the glass tube and the conversion factor of the optical system of the device. It is also shown that the uncertainty of the calculation of the coordinates of the points and the radius of the contour of the rotating drop by the Runge-Kutta method can be neglected.

The value of the measurement uncertainty estimate was calculated on the example of measuring the interfacial tension of 0.02% aqueous solution of "Stinol" at the boundary with kerosene. The obtained value of the expanded uncertainty confirms the effectiveness of the method of calculating the interfacial tension of liquids using the set of coordinates of the points of the drop shape.

Keywords: uncertainty of measurement; interfacial tension; rotating drop.

Список літератури

1. Vonnegut B. Rotating bubble method for the determination of surface and interfacial tensions. *Rev. Sci. Instrum.*, 1942, vol. 13, pp. 6–9. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1769937>
2. Princen H.M., Zia I.Y.Z., Mason S.G. Measurement of interfacial tension from the shape of a rotating drop. *J. Colloid Interface Sci.*, 1967, vol. 23, no. 1, pp. 99–107.
3. Slattery J.C., Chen J.D. Alternative solution for spinning drop interfacial tensiometer. *J. Colloid Interface Sci.*, 1978, vol. 64, no. 2, pp. 371–373.
4. Кісіль Р.І., Чеховський С.А. Удосконалена методика і прилад для вимірювання міжфазного натягу методом обертової краплі. *Методи та прилади контролю якості*. 1999. № 4. С. 36–39.
5. Coucoulas L.M., Dawe R.A., Mahers E.G. The refraction correction for the spinning drop interfacial tensiometer. *J. Colloid Interface Sci.*, 1983, vol. 93, no. 1, pp. 281–284.
6. Білішчук В.Б., Костів Б.В., Боднар Р.Т. Методика аналізу цифрових зображень для визначення координат точок контуру фіксованої обертової краплі в міжфазній тензіометрії. *Методи та прилади контролю якості*. 2014. № 2(33). С. 59–65.
7. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на фортране. Москва: Мир, 1977. 583 с.
8. Измеритель плотности жидкостей Термех ВИП-2МР. URL: https://www.nv-lab.ru/catalog_info.php?ID=2221&Full=1 (дата звернення: 06.10.2020 р.).
9. Частотомір ЧЗ-63. URL: <http://standart-m.com.ua/elektroizmeritelnoe-oborudovanie/laboratornyye-pribory/chastotomery/chastotomer-ch3-63?mova=uk> (дата звернення: 21.05.2019 р.).
10. Микроскоп стереоскопический МБС-9. Паспорт. URL: <http://www.laboratorium.dp.ua/item/12/manual> (дата звернення: 21.10.2017 р.).
11. Рефрактометр цифровой автоматический DR6000. URL: <https://spectrolab.com.ua/p608750093-refraktometr-tsifrovoj-avtomaticheskij.html> (дата звернення: 06.10.2020 р.).
12. Rocket P. The accuracy of sub-pixel localisation in the Canny edge detector. *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, Nottingham, UK, 1999, pp. 392–401.

13. Біліщук В.Б., Боднар Р.Т. Аналіз похибок методик розрахунку контурів обертових крапель в процесі вимірювання міжфазного натягу рідин. *Методи та прилади контролю якості*. 2009. № 22. С 37–42.

References

- Vonnegut B. Rotating bubble method for the determination of surface and interfacial tensions. *Rev. Sci. Instrum.*, 1942, vol. 13, pp. 6–9. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1769937>
- Princen H.M., Zia I.Y.Z., Mason S.G. Measurement of interfacial tension from the shape of a rotating drop. *J. Colloid Interface Sci.*, 1967, vol. 23, no. 1, pp. 99–107.
- Slattery J.C., Chen J.D. Alternative solution for spinning drop interfacial tensiometer. *J. Colloid Interface Sci.*, 1978, vol. 64, no. 2, pp. 371–373.
- Kisil R.I., Chekhovskiy S.A. Udoskonalena metoda i prylad dlia vymiriuvannia mizhfaznogo natiahu metodom obertovoi krapli [Advanced technique and device for measuring interphase tension by the method of a rotating drop]. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*, 1999, no. 4, pp. 36–39 (in Ukrainian).
- Coucoulas L.M., Dawe R.A., Mahers E.G. The refraction correction for the spinning drop interfacial tensiometer. *J. Colloid Interface Sci.*, 1983, vol. 93, no. 1, pp. 281–284.
- Bilishchuk V.B., Kostiv B.V., Bodnar R.T. Metodyka analizu tsyfrovoykh zobrazen dlia vyznachenia koordynat tochok konturu fiksovanoj obertovoi krapli v mizhfaznii tenziometrii [Method of digital image analysis for determination of coordinates of points of a contour of a fixed rotating drop in interphase tensiometry]. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*, 2014, no. 2(33), pp. 59–65 (in Ukrainian).
- Mak-Kraken D., Dorn U. Chislennyye metody i programmirovaniye na fortrane [Numerical methods and programming on Fortran]. Moscow, Mir Publ., 1977. 583 p. (in Russian).
- Izmeritel plotnosti zhidkostey Termex VIP-2MR [Liquid density meter Termex VIP-2MR]. Available at: https://www.nv-lab.ru/catalog_info.php?ID=2221&Full=1 (accessed 06.10.2020).
- Chastotomir Ч3-63 [Frequency meter Ч3-63]. Available at: <http://standart-m.com.ua/elektrozmeritelnoe-oborudovanie/laboratornyye-pribory/chastotomery/chastotomer-ch3-63?mova=uk> (accessed 21.05.2019).
- Mikroskop stereoskopicheskij MBS-9. Passport [Stereoscopic microscope MBS-9. Passport]. Available at: <http://www.laboratorium.dp.ua/item/12/manual> (accessed 21.10.2017).
- Refraktometr tsyfrovoy avtomaticheskij DR6000 [Refractometer digital automatic DR6000]. Available at: <https://spectrolab.com.ua/p608750093-refraktometr-tsifrovoy-avtomaticheskij.html> (accessed 06.10.2020).
- Rocket P. The accuracy of sub-pixel localisation in the Canny edge detector. *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, Nottingham, UK, 1999, pp. 392–401.
- Bilishchuk V.B., Bodnar R.T. Analiz pokhybok metodyk rozrakhunku konturiv obertovykh krapel v protsesi vymiriuvannia mizhfaznogo natiahu ridyn [Analysis of errors of methods of calculation of contours of rotating drops in the course of measurement of interfacial tension of liquids]. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*, 2009, no. 22, pp. 37–42 (in Ukrainian).