

УДК 532.61

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН ПРИЛАДОМ, ЩО РЕАЛІЗУЄ УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД РОЗГОРНУТОГО МЕНІСКА

І.С. Кісіль, О.Б. Барна

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: zarichna@nung.edu.ua*

Здійснений метрологічний аналіз приладу, який реалізує удосконалений метод розгорнутого меніска біля вертикально зануреного у досліджувану рідину циліндра для визначення поверхневого натягу на межі розділу рідина – повітря. Оцінені стандартні невизначеності всіх впливових факторів на результати вимірювання поверхневого натягу вказаним приладом, а також сумарна і розширена невизначеності отриманих результатів вимірювання.

Ключові слова: поверхневий натяг, вимірювання, невизначеність, прилад, розгорнутий меніск, рідина, метрологічний аналіз, удосконалений метод.

Проведенный метрологический анализ прибора, который реализует усовершенствованный метод развернутого мениска у вертикально погруженного в исследуемую жидкость цилиндра для определения поверхностного натяжения на границе раздела жидкость - воздух. Оценены стандартные неопределенности всех влияющих факторов на результаты измерения поверхностного натяжения указанным прибором, а также суммарная и расширенная неопределенности полученных результатов измерения.

Ключевые слова: поверхностное натяжение, измерения, неопределенность, прибор, развернутый мениск, жидкость, метрологический анализ, усовершенствованный метод.

There is made the metrological analysis of the device that implements an improved method of external meniscus near vertically immersed in the test liquid cylinder to determine the surface tension at the interface between the liquid - air. Standard uncertainties of all factors influencing on the measurement results of the surface tension of the device, and also the total expanded uncertainty of measurement results are estimated.

Keywords: surface tension, measurement uncertainty, device, external meniscus, liquid, metrological analysis, an improved method.

Вступ

Поверхневий натяг (ПН) на межі розділу рідина – газ відіграє важливу роль у багатьох технологічних процесах нафтогазовидобутку, виробництва миючих засобів, сільському господарстві, медицині тощо. Особливо актуальним є питання визначення ПН при дослідженні і використанні розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР). Характерною особливістю розчинів ПАР є те, що їх ПН на межі розділу із газом (повітрям) змінюється (зменшується) з часом існування межі розділу фаз. Причому для багатьох водних розчинів ПАР суттєві зміни ПН відбуваються протягом перших 10 – 20 с, після чого на межі розділу фаз досягається рівноважний поверхневий натяг (РПН). Для інших водних

розчинів, де ПАР є більш в'язкими, РПН досягається за значно більший проміжок часу (до 1 год. і більше). До моменту досягнення РПН має місце так званий динамічний ПН (ДПН).

З урахуванням вказаного серед відомих методів вимірювання ПН є такі, які дозволяють досліджувати ДПН, починаючи від долей секунди існування досліджуваної межі розділу рідина (розчин ПАР) – повітря до декількох хвилин їх існування (методи максимального тиску у бульбашці, лежачої і висячої крапель тощо), і є такі, які дозволяють досліджувати ДПН, починаючи від 10 с існування межі розділу до декількох годин їх існування (методи капілярного підняття, розгорнутих менісків біля твердих тіл різної форми тощо).

Метод розгорнутого меніска біля зануреного

у досліджувану рідину вертикального циліндра і його удосконалена модифікація, яка буде аналізуватись нижче, дозволить в більшості випадків досліджувати ДПН розчинів ПАР, починаючи від 10 с існування контрольованої межі розділу фаз до декількох годин її існування.

Аналіз відомих публікацій і досліджень

Серед відомих методів вимірювання ПН на межі розділу рідина – газ метод розгорнутого меніска (РМ) не був особливо розповсюджений із-за необхідності вимірювання з малою абсолютною похибкою (до 2 мкм) відповідних двох чи трьох лінійних розмірів профіля РМ, утвореного між бічної стінкою вертикально зануреного у досліджувану рідину круглого циліндра і горизонтальною поверхнею цієї рідини [1]. При цьому є потреба у використанні відповідних таблиць, а процес вибору вказаних двох чи трьох лінійних розмірів безпосередньо для їх подальшого вимірювання вимагає досить складних процедур [2-4].

Авторами раніше був розроблений удосконалений метод розгорнутого меніска для визначення ПН рідин [5], для реалізації якого необхідно експериментально отримати весь профіль РМ, після чого шляхом виконання ітераційної процедури (змінюють ПН і крайовий кут змочування) підбирають такий теоретичний профіль, який відповідає експериментальному профілю. При цьому вважають, що значення ПН, при якому теоретичний і

експериментальний профілі співпадають з найменшими відхиленнями, є шуканим значенням ПН.

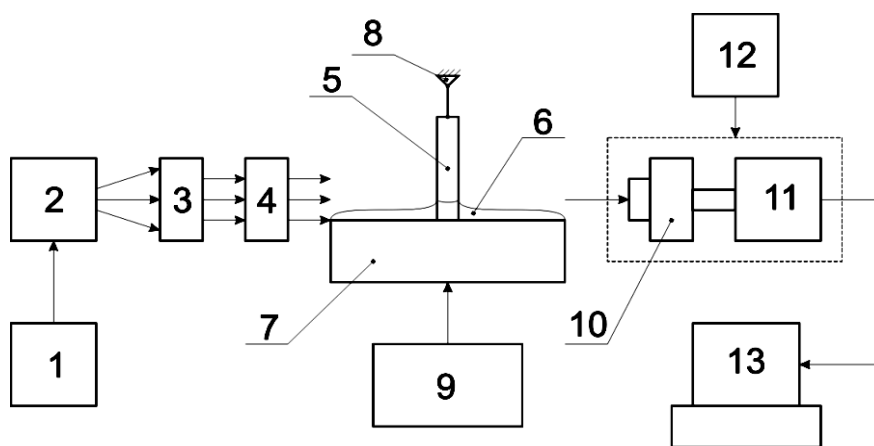
В роботі [6] здійснена оцінка сумарної невизначеності виділення контуру експериментального розгорнутого меніска в процесі проведення дослідження ПН рідин. Показано, що ця невизначеність при використанні в якості цифрової камери цифрового мікроскопа USB Digital Microscope із роздільною здатністю 2 мегапікселя становить приблизно 1,16 пікселя, що при переході до одиниць ПН становить 0,03 мН/м.

Однак при визначенні ПН приладом, який реалізує вказаний удосконалений метод розгорнутого меніска і який включає вказану вище цифрову камеру, на отримані результати ПН впливають ще ряд інших факторів, оцінку впливу яких необхідно здійснити.

Мета даної роботи полягає у визначенні сумарної і розширеної невизначеностей результатів вимірювання ПН чистих рідин і розчинів ПАР розробленим приладом [5], який реалізує метод розгорнутого меніска з урахуванням всіх факторів впливу, які мають місце у процесі проведення вимірювання ПН.

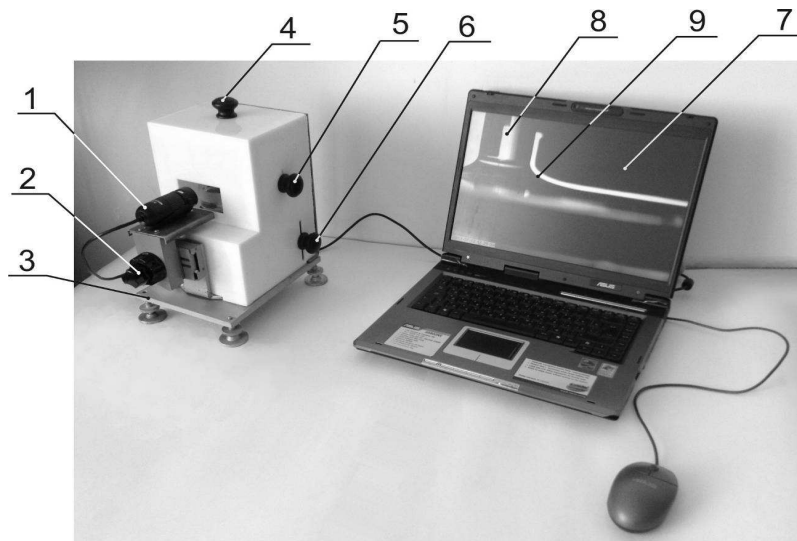
Виклад основного матеріалу

Структурна схема приладу, який реалізує удосконалений метод розгорнутого меніска, приведена на рис. 1, а його зовнішній вигляд – на рис. 2.



1 – блок живлення; 2 – освітлювач, побудований на матриці із шести SMD світлодіодів білого світла; 3 – світлорозсіювальне молочне скло; 4 – непрозора діафрагма; 5 – скляний стержень; 6 – досліджувана рідина; 7 – посудина; 8 – підвіс; 9 – підіймальний столик; 10, 11 – цифровий мікроскоп (USB Digital Microscope); 12 – двопозиційний механізм регулювання положення цифрового мікроскопа; 13 – персональний комп'ютер

Рисунок 1 – Структурна схема приладу для дослідження поверхневих властивостей рідин методом розгорнутого меніска



1 – цифрова камера; 2 – ручка двопозиційного механізму; 3 – масивна основа приладу; 4, 5 – ручки для налаштування положення шторки 7; 6 – ручка підіймального столика із посудиною; 8 – частина скляного стержня; 9 – досліджуваний розгорнутий меніск рідини

Рисунок 2 – Загальний вигляд приладу

Оскільки у запропонованому методі вимірювання ПН рідин відсутня явна аналітична залежність між вихідною величиною (значення ПН) та вхідними величинами, то був проведений детальний аналіз впливу всіх вхідних величин та їхніх невизначеностей на отриманий результат вимірювання.

В процесі аналізу процедури вимірювання ПН методом РМ було встановлено, що на результат вимірювання ПН цим методом впливають такі стандартні невизначеності вхідних величин (рис. 3):

– невизначеність визначення різниці густин $\Delta\rho$ фаз рідина і газ $u(\sigma(\Delta\rho))$, що включає невизначеності попереднього визначення густини досліджуваної рідини $u(\rho_\alpha)$ і повітря над нею $u(\rho_\beta)$;

– невизначеність вимірювання радіуса r зануреного скляного стержня $u(\sigma(r))$, яка включає невизначеність засобу вимірювання радіуса циліндра $u_B(r)$ і невизначеність результату визначення радіуса циліндра $u_A(r)$ на основі статистичних даних;

– невизначеність виділення контуру розгорнутого меніска із отриманого його цифрового зображення $u(\sigma(x, z))$, що включає невизначеність отримання координат контуру профіля меніска у цифровому форматі $u_{pix}(x, z)$ та невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи $u(K_{opt})$. Невизначеність

$u_{pix}(x, z)$ включає невизначеність $u_A(E_{xz})$ типу А відхилень координат точок x і z експериментального контуру РМ від цих же координат математично розрахованого контуру РМ, невизначеність $u_A(I_{xz})$ типу А відхилень координат точок x і z експериментального контуру РМ від цих же координат розмитого розрахованого контуру РМ і невизначеність $u_B(pix)$ типу В внаслідок отримання зображення у цифровому (дискретному) форматі. Невизначеність коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу $u(K_{opt})$ включає невизначеність $u_B(n_{pix})$ відліку віддалі між лініями сітки на її цифровому зображенні і невизначеність $u_B(n_k)$ технології виготовлення сітки;

– невизначеність чисельного методу Рунге–Кутта розв'язку системи диференціальних рівнянь, що описують РМ, з метою побудови теоретичного контуру розгорнутого меніска $u(\sigma_{RK})$, яка включає невизначеності $u_B(x_{RK})$ і $u_B(z_{RK})$ результатів чисельного інтегрування при визначенні координат x і z контуру;

– невизначеність підбору теоретичного контуру, подібного до експериментального $u(\sigma(E_{xz}))$;

– невизначеність заокруглення результатів при їх обчисленні на ЕОМ $u(\sigma(rnd))$.

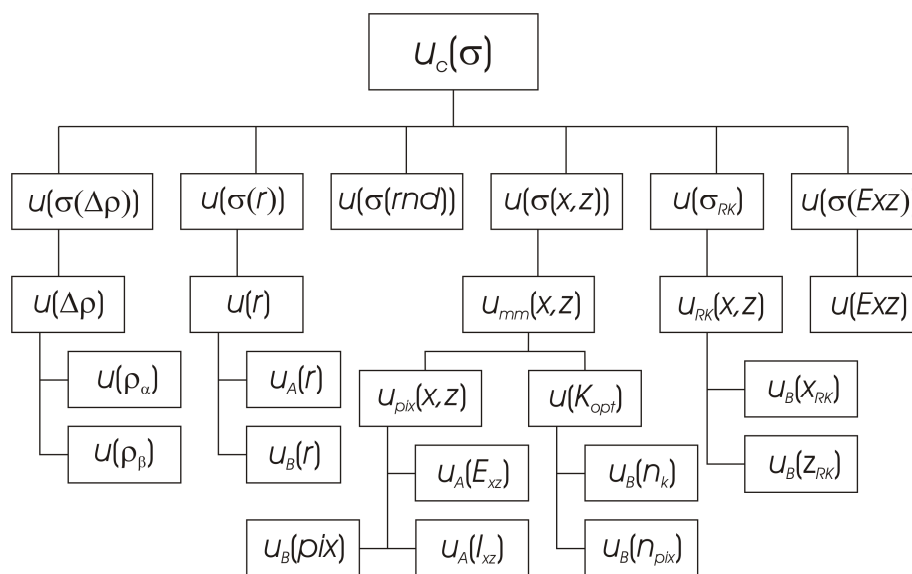


Рисунок 3 – Складові сумарної стандартної невизначеності результатів вимірювань поверхневого натягу і приладом, що реалізує удосконалений метод розгорнутого меніска

Для визначення різниці густин контактуючих фаз $\Delta\rho$ використовують серійні густиноміри. Стандартне відхилення результатів вимірювання густини рідинного середовища ρ_α за допомогою густиноміра ВИП-2М становить $\Delta\rho_\alpha = \pm 0,1$ кг/м³ [7], а стандартне відхилення результатів вимірювання густини газового середовища ρ_β за допомогою густиноміра ИПРБ-01 $\Delta\rho_\beta = \pm 0,005$ кг/м³ [8]. Враховуючи, що всередині заданих меж значення густин підпорядковуються рівномірному закону розподілу, складовими невизначеності вимірювання різниці густин контактуючих фаз є невизначеності типу В вимірювання густини кожної із фаз, тобто:

$$u_B(\rho_\alpha) = 0,1/\sqrt{3} = 0,057735 \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

$$u_B(\rho_\beta) = 0,005/\sqrt{3} = 0,002887 \text{ кг/м}^3. \quad (2)$$

Тоді стандартна невизначеність $u(\Delta\rho)$ вимірюваної різниці густин контактуючих фаз $\Delta\rho$ буде такою:

$$u(\Delta\rho) = \sqrt{u_B(\rho_\alpha)^2 + u_B(\rho_\beta)^2} = 0,057807 \text{ кг/м}^3. \quad (3)$$

Для оцінювання стандартної невизначеності результатів вимірювання радіуса r зануреного скляного циліндра було проведено багаторазове вимірювання його діаметра ($n = 30$ вимірювань)

за допомогою мікрометра МК 25–50 із ціною поділки 0,01 мм. Причому вимірювання проводилися в тій його частині, яку в подальшому передбачається занурювати у досліджувану рідину.

Найкраща доступна оцінка математичного сподівання чи очікуваного значення радіуса \bar{r} скляного стержня розраховувалась як середнє значення проведених вимірювань і є такою:

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^n r_i / n = 2,3856 \text{ мм}, \quad (4)$$

де r_i – вимірне значення радіуса циліндра при i -му спостереженні.

Стандартна невизначеність за типом А значення радіуса циліндра була обчислена таким чином [9]:

$$u_A(\bar{r}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2 / (n(n-1))} = 0,002 \text{ мм}. \quad (5)$$

Оскільки зчитування показів діаметра циліндра проводилися із аналогової шкали мікрометра, то, приймаючи рівномірний закон розподілу значень результатів вимірювання діаметра всередині заданих меж, оцінювання невизначеності типу В було розраховано за формулою [10, 11]:

$$u_B(r) = \frac{(r+q/2) - (r-q/2)}{2\sqrt{3}} = \frac{q}{2\sqrt{3}} = 0,0029 \text{ мм}, \quad (6)$$

де q – ціна поділки шкали приладу.

Сумарна стандартна невизначеність результатів вимірювання радіуса зануреного циліндра буде такою:

$$u(r) = \sqrt{u_A(\bar{r})^2 + u_B(r)^2} = 0,00353 \text{ мм.} \quad (7)$$

Сумарна невизначеність $u_{pix}(x,z)$ отриманих координат контуру (в пікселях), що виникає внаслідок отримання зображення у цифровому вигляді при виділенні контуру меніска була оцінена раніше [6] і з урахуванням вказаних вище складових є такою:

$$u_{pix}(x,z) = \sqrt{u_A(E_{xz})^2 + u_A(I_{xz})^2 + u_B(pixel)^2} = \sqrt{0,924^2 + 0,643^2 + 0,289^2} = 1,162 \text{ пікселя.} \quad (8)$$

Для знаходження невизначеності розрахунку коефіцієнта перетворення оптичної системи, а також для знаходження невизначеності внаслідок астигматичності зображення, використовували калібрувальну сітку, яка входить у комплект мікроскопів МБС, лінії якої нанесені через $1 \pm 0,01$ мм [12]. Для визначення коефіцієнта перетворення K_{opt} калібрувальну сітку фотографували 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_{pix} , які відповідають певній кількості n_k поділок калібру. Коефіцієнт перетворення K_{opt} розраховують за виразом $K_{opt} = n_k/n_{pix}$. Було розраховано, що 10-м поділкам калібрувальної сітки із ціною поділки 1 мм ($n_k = 10$ мм) відповідало у даному випадку $n_{pix} = 752$ пікселя (тобто $K_{opt} = 0,0133$ мм/пікс.).

Невизначеність розрахунку коефіцієнта перетворення оптичної системи приладу K_{opt} залежить також і від точності виготовлення сітки і точності здійснення відліку відстані між лініями сітки на її зображенні. Згідно з [12] абсолютна похибка Δn_k відстаней між лініями сітки, яку було використано для калібрування оптичної системи приладу, становить $\pm 0,01$ мм. Тоді невизначеність типу В для заданих границь при рівномірному законі розподілу $u_B(n_k) = \Delta n_k/\sqrt{3} = 5,774 \cdot 10^{-3}$ мм. Абсолютна похибка Δn_{pix} , з якою здійснюють відлік відстані між лініями сітки на цифровому

зображенні становить ± 1 піксель.

Невизначеність типу В для заданих границь при рівномірному законі розподілу рівна $u_B(n_{pix}) = \Delta n_{pix}/\sqrt{3} = 0,5774$ пікселя. Тоді сумарна стандартна невизначеність при обчисленні коефіцієнта оптичного перетворення системи K_{opt} буде такою:

$$\begin{aligned} u(K_{opt}) &= \sqrt{\left(\frac{\partial K_{opt}}{\partial n_k} u_B(n_k)\right)^2 + \left(\frac{\partial K_{opt}}{\partial n_{pix}} u_B(n_{pix})\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(u_B(n_k)/n_{pix}\right)^2 + \left(n_k u_B(n_{pix})/n_{pix}^2\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left[(5,774 \cdot 10^{-3})/752\right]^2 + \left[(10 \cdot 0,5774)/752^2\right]^2} = \\ &= 1,283 \cdot 10^{-5} \text{ мм/пікс.} \end{aligned} \quad (9)$$

Для отримання координат точок контуру у розмірному форматі (мм) значення координат у пікселях множать на коефіцієнт оптичного перетворення. Тоді сумарна стандартна невизначеність при виділенні координат точок експериментального контуру розгорнутого меніска з урахуванням $u_{pix}(x,z)$ і $u(K_{opt})$ буде такою:

$$\begin{aligned} u_{mm}(x,z) &= \sqrt{\left(K_{opt} u_{pix}(x,z)\right)^2 + \left(0,1 n_{pix} u(K_{opt})\right)^2} = \\ &= \sqrt{(0,0133 \cdot 1,162)^2 + (75,2 \cdot 1,283 \cdot 10^{-5})^2} = 0,0155 \text{ мм.} \end{aligned} \quad (10)$$

У розробленій програмі для обчислення контурів РМ використовують тип числа з фіксованою крапкою Real, розмір мантиси якого складає 16 цифр. Таким чином 16-та значуща цифра буде заокруглюватись під час обчислень. Абсолютна похибка ΔE заокруглення в такому випадку не буде перевищувати 10^{-14} .

Невизначеність заокруглення $u(rnd)$ в результаті обчислень на ЕОМ, враховуючи рівномірний закон розподілу, буде такою: $u(rnd) = \Delta E/\sqrt{3} = 10^{-14}/\sqrt{3} = 5,77 \cdot 10^{-15}$, що, у порівнянні з іншими невизначеностями, є незрівнянно малою величиною. Тому вкладом даної невизначеності у сумарну невизначеність нехтуємо, тобто приймаємо, що $u(\sigma(rnd)) \cong 0$.

Сумарні значення невідповідності заокруглення знаходять як суму значень похибок у процесі інтегрування. При меншому кроці інтегрування кількість кроків зростає, зростають сумарні значення похибки заокруглення, а значення похибки обмеження зменшується. Таким чином, вибравши

оптимальне значення кроку інтегрування, можна досягнути мінімального значення невизначеності числового інтегрування системи диференціальних рівнянь капілярності, що описують розгорнутий меніск [1].

Інформативним параметром для оцінення точності методу є сумарна невідповідність (заокруглення і обмеження) у кінці інтервалу, оскільки невідповідність заокруглення і обмеження накопичуються на кожному кроці і досягають свого максимального значення при останньому кроці інтегрування.

Враховуючи кінцеві умови інтегрування системи диференціальних рівнянь капілярності, кінцева загальна невідповідність для функції $z(\varphi)$ в залежності від величини кроку на інтервалі $[\varphi_0, 0]$ матиме вигляд:

$$E_{int}(z_{(\varphi=0)}, h) = |z_{(\varphi=0)} - 0| = z_{(\varphi=0)}, \quad (11)$$

а її невизначеність буде такою:

$$u(z_{RK}) = E_{int}(z_{(\varphi=0)}, h) / \sqrt{3} = z_{(\varphi=0)} / \sqrt{3}. \quad (12)$$

Значення кінцевої загальної невідповідності для $x(\varphi)$ при інтегруванні із кроком h рівне:

$$E_{int}(x_{(\varphi=0)}, h) = |x(\varphi=0) - x_h| = \frac{|x_h - x_{2h}|}{15}, \quad (13)$$

а невизначеність інтегрування по координаті x

$$u(x_{RK}) = E_{int}(x_{(\varphi=0)}, h) / \sqrt{3} = \frac{|x_h - x_{2h}|}{15\sqrt{3}}. \quad (14)$$

Були розраховані значення невизначеностей $u(x_{RK})$ та $u(z_{RK})$ при різних кроках інтегрування і таким чином було встановлено, що при кроках інтегрування $h = \pi/2000 \dots \pi/400$ невизначеності $u(x_{RK})$ і $u(z_{RK})$ не перевищували $1,9 \cdot 10^{-9}$ м та $1,3 \cdot 10^{-9}$ м відповідно.

Сумарна невизначеність чисельного інтегрування була розрахована так і є такою:

$$\begin{aligned} u_{RK}(x, z) &= \sqrt{(u(x_{RK}))^2 + (u(z_{RK}))^2} = \\ &= \sqrt{(1,9 \cdot 10^{-9})^2 + (1,3 \cdot 10^{-9})^2} = 2,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}. \end{aligned} \quad (15)$$

Відхилення кожної точки експериментального і теоретичного контурів розгорнутого меніска розраховували як середнє квадратичне відхилення точок реального зображення від розраховане таким чином:

$$E_{x,z} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_{ei} - x_i)^2 + (z_{ei} - z_i)^2]}{(n-1)}}. \quad (16)$$

Процес здійснення розрахунків подібних теоретичних контурів розгорнутого меніска встановлений таким чином, щоб середнє значення величини $E_{x,z}$ не перевищувало значення $\bar{E}_{x,z} \leq 10^{-3}$ мм. Звідси невизначеність розрахунку подібного теоретичного контуру розгорнутого меніска до експериментального буде такою:

$$u(E_{xz}) = \bar{E}_{xz} / \sqrt{3} = 0,577 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \quad (17)$$

Внесок невизначеності кожної вхідної величини x_i у сумарну невизначеність вимірюваної величини $u_c(\sigma)$ визначається як добуток коефіцієнта чутливості на невизначеність вхідної величини [10]:

$$u_i(\sigma) = |c_i| u(x_i), \quad (18)$$

де $c_i = \partial f / \partial x_i$ – коефіцієнти чутливості, що розраховуються як часткові похідні вихідної величини по кожній із вхідних величин [10].

Оскільки у даному випадку відсутня явна аналітична залежність між вхідними та вихідною величинами і неможливо розрахувати часткові похідні залежності вихідної величини по кожній із вхідних величин, то внесок невизначеності кожної вхідної величини у даному випадку був оцінений експериментально. Оцінка внеску невизначеності $u_i(y)$ кожної вхідної величини приймалась рівною виміряній зміні вихідної величини Σ , що викликана зміною заданої вхідної величини x_i на її невизначеність $u(x_i)$. При цьому значення інших вхідних величин підтримувались сталими:

$$u_i(\sigma) = |\Delta \Sigma| = \left| \left\{ \sigma \Big|_{x_1, \dots, x_i} - \sigma \Big|_{x_1, \dots, x_i + u(x_i)} \right\} \right|. \quad (19)$$

Таким чином розраховані внески невизначеностей вхідних величин у результат визначення ПН є такими:

$$\begin{aligned} u(\sigma(\Delta p)) &= 0,64 \cdot 10^{-2} \text{ мН/м}, & u(\sigma(r)) &= 0,43 \text{ мН/м}, \\ u(\sigma(x, y)) &= 0,137 \text{ мН/м}, & u(\sigma(rnd)) &\cong 0 \text{ мН/м}, \\ u(\sigma_{RK}) &= 0,64 \cdot 10^{-3} \text{ мН/м}, & u(\sigma(E_{xz})) &= 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ мН/м}. \end{aligned}$$

Тоді сумарна стандартна невизначеність вимірювання поверхневого натягу приладом, що реалізує удосконалений метод РМ, буде такою:

$$u_c(\sigma) = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2(\sigma)} = 0,451 \text{ мН/м.} \quad (20)$$

Розширену невизначеність розраховують шляхом множення сумарної стандартної невизначеності вхідної величини на коефіцієнт охоплення k [9]. Значення коефіцієнта охоплення вибирають на основі рівня довіри, необхідного для інтервалу від $\sigma - U_p(\sigma)$ до $\sigma + U_p(\sigma)$. Приблизне значення коефіцієнта охоплення для рівня довіри $p = 0,95$ рівне 2.

Тоді розрахована розширена невизначеність $U_p(\sigma)$ вимірювання поверхневого натягу розробленим приладом, який реалізує удосконалений метод розгорнутого меніска, рівна:

$$U(\sigma) = k u_c(\sigma) = 2 \cdot 0,451 = 0,902 \text{ мН/м.} \quad (21)$$

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз сумарної стандартної невизначеності вимірювання поверхневого натягу приладом, що реалізує удосконалений метод розгорнутого меніска. Досліджено стандартні невизначеності кожної вхідної величини, що мають вплив на результат вимірювання. Були розраховані внески невизначеності кожної вхідної величини у сумарну невизначеність вимірювання, на основі чого розрахована сумарна стандартна невизначеність. В результаті проведених досліджень було визначено, що розширена невизначеність вимірювання поверхневого натягу $U_p(\sigma)$ розробленим приладом, який реалізує удосконалений метод розгорнутого меніска, для рівня довіри $p = 0,95$ рівна 0,902 мН/м.

1. Русанов А. И. *Межфазная тензиометрия* / А. И. Русанов, В. А. Прохоров. – СПб: Химия, 1994. – 400 с. 2. Lyons C.J., Elbing E., Wilson I.R. // *J. Chem. Soc. Faraday Trans. Ser. 2* – 1985, V81,

№3. – Р. 327 – 329. 3. Хантадзе Д.В., Чантурия З.А., Оникашвили Э.Г., Церцвадзе Т.Г. // *Приб. техн. эксперим.* – 1970, №1. – С. 228-230. 4. Хантадзе Д.В., Чантурия З.А., Окроашивили Т.Г. и др. // *Физическая химия поверхностных явлений при высоких температурах / Под ред. Еременко В.Н.* – Киев: Наукова думка. – 1971. – С. 82-86. 5. Кісіль І. С. Використання регресійної методики для визначення поверхневого натягу рідин / І. С. Кісіль, Р. Т. Боднар, В. Б. Білишук, Б. В. Костів, О. Б. Барна // *Методи та прилади контролю якості.* – 2012. – № 1 (28). – С. 91 – 99. 6. Барна О. Б. Невизначеність виділення контуру розгорнутого меніска при дослідженні поверхневого натягу рідин / О. Б. Барна // *Метрологія та прилади.* – 2014. – №1 (45). – С. 27 – 31. 7. Лабораторный измеритель плотности жидкостей ВИП-2М [електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.neftekontrol.ru/katalog/opr_plotnosity/vip_2m.html – Назва з екрану. 8. Измеритель плотности радиоизотопный бесконтактный ИПРБ-01 [електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.positron.dp.ua/index.php/ru/products/iprb> – Назва з екрану. 9. Кісіль І.С. *Методи оцінки точності та вірогідності: практикум* / І.С. Кісіль. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. – 50 с. 10. *Оценивание неопределенности при проведении метрологических работ : ПМ Х 33.1405 – 2005.* – Х.: ГП «Харьковстандарт-метрология», 2008. – 48 с. – (Методический документ по метрологии). 11. Христюк Т. В. *Аналіз невизначеності вимірювань* / Т. В. Христюк, Н. Г. Домницька // *Вісник Інженерної академії України. Стандартизація, метрологія і сертифікація.* – 2009, №1. – С. 217 – 223. 12. *Микроскоп стереоскопический МБС-9. Паспорт.* [електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.laboratorium.dp.ua/item/12/manual> – Назва з екрану.

Поступила в редакцію 05.05.2014р.

Рекомендували до друку: докт. хім. наук Файнерман В. Б. та докт. фіз.-мат. наук Галушак М. О.