

УДК 681.2

ВИКОРИСТАННЯ ВІДЕОТЕХНІКИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ МЕТОДОМ ЛЕЖАЧОЇ КРАПЛІ

© Горєлов В. О., Кісіль І. С., 2000

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Запропоновано визначення поверхневого натягу на границях розділу фаз методом лежачої краплі з використанням відеотехніки. Сформульовані вимоги до формування лежачої краплі і методики оцифрування її параметрів, визначення радіусів кривизни капілярних поверхонь.

Викривлення поверхні рідини зумовлює надлишковий тиск ΔP , який діє на рідину. Його створюють сили поверхневого натягу. Для опуклої поверхні цей тиск направлений всередину рідини, а для увігнутої поверхні – у протилежний бік. Величина перепаду тиску ΔP_A через поверхню в т. А (рис. 1) визначається за відомою формулою Юнга-Лапласа [1]:

$$\Delta P_A = P_1 - P_2 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

де R_1, R_2 – радіуси кривизни двох довільних взаємно перпендикулярних нормальних перерізів поверхні рідини в точці А; σ – поверхневий натяг на границі розділу фаз.

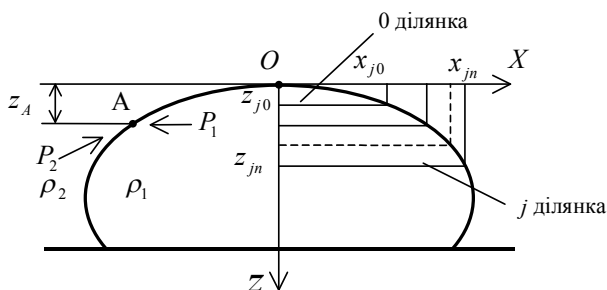


Рис. 1. Профіль лежачої краплі.

Для поверхні обертання у точці перетину її з віссю обертання (т. О) обидва радіуси кривизни є рівними. Позначимо цей радіус кривизни через b . Тоді перепад тиску через поверхню в т. О з врахуванням (1) $\Delta P_0 = 2\sigma / b$. Взаємозв'язок між ΔP_A і ΔP_0 згідно з рис. 1 наступний:

$$\Delta P_A = \Delta P_0 + \Delta \rho g z_A, \quad (2)$$

де z_A – віддаль точки від т. А по вертикалі до т. О, $\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2$ – різниця густин контактуючих речовин ($\rho_1 > \rho_2$), g – прискорення вільного падіння.

З врахуванням (1) і (2) можна записати, що:

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \Delta \rho g z_A + \frac{2\sigma}{b}. \quad (3)$$

Розроблена чисельна група реалізацій методу лежачої краплі як методу визначення поверхневого натягу σ [2].

Однак, вимірювання параметрів R_1, R_2, b і z капілярної поверхні, які необхідні для безпосереднього застосування вказаного рівняння капілярності (3), раніше було пов'язане із значними труднощами. Тому більшість дослідників запропонували наближені залежності для розрахунку поверхневого натягу з використанням інших параметрів краплі, вимірювання яких здійснити легше. Однак при цьому виникають значні похибки [3].

На початку 80-х років серед способів отримання і аналізу зображення краплі був запропонований спосіб, що передбачає використання відеотехніки [2].

Застосування відеотехніки дозволяє відмовитися від вимірювання допоміжних параметрів краплі і проводити вимірювання таким чином.

Розбивають спочатку увесь профіль краплі (рис. 1) на дві симетричні відносно осі z частини, після чого одну із них, наприклад, праву розбивають на j горизонтальних участків (наприклад, $j \geq 6$). Профіль кожного із отриманих участків (за виключенням участку, що контактує із підложкою краплі) додатково ще розбивають на k дрібних підучастків (наприклад, $k \geq 4$). Розбивку на окремі участки і підучастки здійснюють, наприклад, пропорційно висоті краплі z . Профіль кожного із підучастків оцифровують, тобто за допомогою відповідної відеотехніки, яка буде описана нижче, вимірюють координати z_{jk} і x_{jk} поверхні для всіх j і k , включаючи і координати профілю, що відповідають крайнім (верхній і нижній) площинам j -участку.

На основі отриманих таким чином координат $(z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jk})$ і $(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jk})$ профіль кожного із j -участків (крім профілю, що включає т. О) з достат-

ньою точністю описують у вигляді поліноміальної залежності виду $z_j = f(x)$.

Для одержання поліноміальної залежності участку профілю, що включає т. O , використовують координати окремих підучастків профілю цього участку як справа, так і зліва від осі z .

Розраховують значення параметрів $(1/R_1)_j$ і $(1/R_2)_j$ профілю краплі для серединної площини січення кожного із j -участків за виключенням участку, що включає т. O . Для цього використовують такі відомі залежності [2]:

$$\frac{1}{R_1} = z_j'' / (1 + z_j'^2)^{3/2}; \quad (4)$$

$$\frac{1}{R_2} = z_j' / x(1 + z_j'^2)^{1/2}, \quad (5)$$

де z_j' , z_j'' – відповідно перша та друга похідні функції z_j по x . Підставляючи в праві частини (4) і (5) після одержання виразів для z_j' і z_j'' значення координати x_j для серединної площини січення кожного із j участків знаходять значення $(1/R_1)_j$ і $(1/R_2)_j$ для цих точок.

З метою визначення параметра $1/b$ можна використати вираз (4), підставивши в нього $x = 0$.

На основі отриманих значень $(1/R_1)_j$, $(1/R_2)_j$, $1/b$ розраховують значення поверхневого натягу σ_j для кожного із j -участків за допомогою такої залежності, яка отримана на основі (3):

$$\sigma = \frac{\Delta \rho g z_j}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b}}, \quad (6)$$

де z_j – координати z для серединної площини січення кожного із j -участків.

Слід зауважити, що чим точніше будуть визначені значення параметрів $(1/R_1)_j$, $(1/R_2)_j$, $1/b$ і z_j , тим менше будуть відрізнятися значення σ_j між собою. Бажано досягнути, щоб значення σ_j відрізнялися між собою не більше, ніж на 0.01 мН/м, що задовільняє вимогам щодо точності результатів вимірювання поверхневого натягу σ . У випадку, коли вказані відхилення будуть більшими за 0.01 мН/м, необхідно розрахувати середнє значення σ . Якщо відхилення будуть більшими за 1 мН/м, необхідно підвищити вимоги до точності визначення координат z_{jk} і x_{jk} , а також здійснити відповідне згладжування значень координат z_{jk} і x_{jk} , підвищити порядок апроксимуючих поліноміальних залежностей $z_j = f(x)$.

Слід зауважити, що застосування рівнянь (4) і (5) справедливе у тому разі, коли поверхня краплі є тілом обертання. Однак, на форму поверхні краплі впливає крайовий кут змочування. На практиці дослідник може мати справи з різними випадками неповного змочування (крайовий кут змочування θ може бути як більшим, так і меншим за 90°). Для проведення вимірювань значно прийнятніший перший випадок, оскільки він характеризується наявністю екваторіального радіуса у краплі. Форма верхньої частини краплі має більшу осьову симетрію (звичайно, за умови вертикального напрямку дії сили гравітації), ніж нижня. Форма нижньої частини краплі більше залежить від величини крайового кута змочування, ніж верхня. Причому на результати досліджень важливе значення має не величина крайового кута змочування, а його неоднорідність уздовж лінії контакту краплі з основою [3, 4].

З метою зменшення впливу кута змочування на поверхню краплі, можна сформулювати такі вимоги до основи:

- 1) матеріал основи повинен бути менш змочуваним досліджуваною рідиною;
- 2) підкладка повинна бути ретельно очищеною і приймати строго горизонтальне положення;

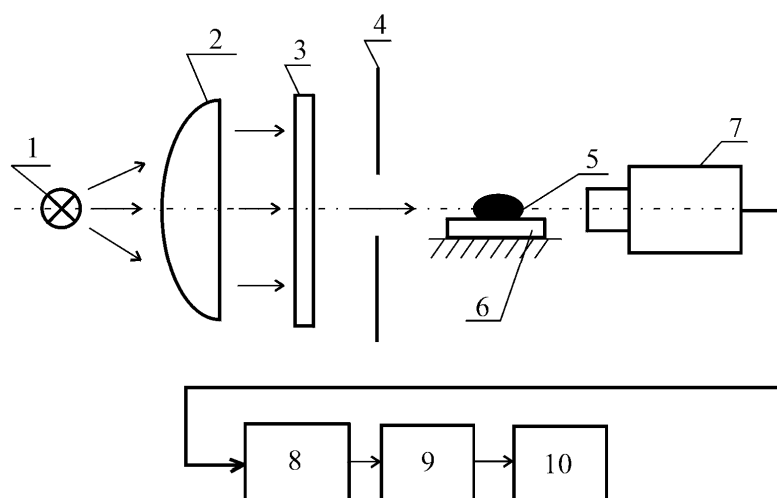
Для проведення досліджень прилад, що буде реалізовувати запропонований метод, повинен забезпечувати наступне:

- 1) формування краплі необхідно здійснювати на основі, яку можна змінювати з метою досягнення кута змочування, більшого за 90° ;
- 2) створювати таке освітлення, яке дасть можливість отримати контрастне зображення краплі;
- 3) відеокамера приладу повинна забезпечувати лінійність зображення;
- 4) для усунення впливу вібрації прилад необхідно розташовувати на масивній антивібраційній основі.

Враховуючи ці вимоги, пропонується прилад для вимірювання поверхневого натягу методом лежачої краплі, схема якого приведена на рис. 2.

Рівномірність освітленості фону досягається введенням у конструкцію матового скла 3. "Зайва" частина світлового потоку усувається шляхом застосування діафрагми 4. Суттєвою умовою отримання зображення краплі, що відповідає меридіональному перерізу краплі, є паралельність променів джерела світла. Це досягається використанням колімаційної лінзи 2. Сприяє цьому також і діафрагма 4.

Оптична частина приладу дозволяє отримати контрастне темне зображення краплі на світлому фоні. Потужність джерела світла повинна бути достатньою для забезпечення відповідного фону.



1 – джерело світла; 2 – колімаційна лінза; 3 – матове скло; 4 – діафрагма; 5 – досліджувана крапля;
6 – основа, на якій формується крапля; 7 – відеокамера; 8 – пристрій відеозахоплення;
9 – комп'ютер; 10 – монітор

Рис. 2. Схема приладу, що реалізує запропонований метод лежачої краплі.

Оптична частина приладу функціонує наступним чином. Збільшене зображення краплі приймається відеокамерою, звідки сигнал поступає у пристрій відеозахоплення, який оцифровує його. Після цього комп'ютер проводить сегментацію зображення, тобто виділення краю краплі (граничних пікселів). Один із найпростіших способів сегментації [2] полягає у тому, що для даного відеозображення встановлюють деяку єдину величину яскравості зображення (так звану глобальну границю), яка ділить усі піксели на дві групи: піксели з більшим рівнем яскравості (їм присвоюється найбільша величина яскравості) і піксели з меншим рівнем яскравості (їм присвоюється нульове значення яскравості). В результаті цього, зображення з півтонового стає бінарним.

У цьому випадку крапля з оточуючим фоном буде виглядати на екрані монітора як контрастна чорно-біла картина (рис. 3а). Після бінаризації зображення здійснюється власне сегментація, коли виділяються піксели, що знаходяться на ме-

жі двох областей цієї контрастної картини, а саме, крайні внутрішні піксели (рис. 3б).

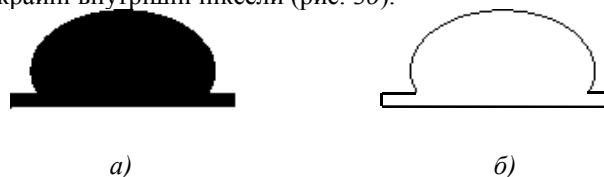


Рис. 3. Відеозображення лежачої краплі, отримане в ході сегментації з глобальним порогом яскравості.

1. Адамсон А. Физическая химия поверхностей: Пер. с англ. / Под ред. З. М. Зорина, В. М. Муллера. — М.: Мир., 1979. — 568 с. 2. Русанов А. И., Прохоров В. А. Межфазная тензиометрия. — СПб.: Химия, 1994. — 400 с. 3. Іващенко Ю. М., Єрьоменко В. Н. Основи прецизійного вимірювання поверхневої енергії розплавів металів за методом лежачої краплі. — К.: Наукова думка, 1972. 4. Воюцький С. С. Курс коллоїдної хімії. — М.: Хімія, 1964.