

УДК 681.2

## ВИБІР МЕТОДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ

© Горєлов В. О., Кісіль І. С., 2000

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

**Запропоновано визначення залежності поверхневого натягу на границях розділу від часу існування цієї границі розділу фаз. Показано, що при цьому можна виключити ряд параметрів, значення яких необхідно вимірювати окремо.**

Розвиток вітчизняного приладобудування, що дозволив би якісно проводити дослідження — нагальна потреба сьогодення.

Вирішенню цієї проблеми певною мірою сприяють прилади для вимірювання поверхневого і міжфазного натягу на межі розділу рідина — газ та рідина — рідина, необхідні для проведення робіт в галузі колоїдної хімії і фізико-хімічної механіки.

Умови сучасного виробництва, а також вимоги до наукового обладнання ставлять перед приладобудівною галуззю завдання забезпечення проведення вимірювань поверхневого і міжфазного натягу на вищевказаних межах розділу в діапазоні від 0.001 мН/м до 75 мН/м з високою точністю отримуваних результатів (похибка не повинна перевищувати десятих долей відсотка).

Методи, що використовуються для вимірювання величини поверхневого натягу, базуються на рівнянні капілярності, отриманому ще у 1805 році Юнгом, а потім у 1906 році Лапласом [1]:

$$\Delta P = \gamma(1/R_1 + 1/R_2), \quad (1)$$

де  $\Delta P$  — різниця зовнішнього і внутрішнього тисків, що діють на поверхню;  $R_1, R_2$  — радіуси кривизни поверхонь в довільній точці у взаємно-перпендикулярних її січеннях;  $\gamma$  — поверхневий чи міжфазний натяг.

Вимірювання таких параметрів капілярної поверхні як радіуси кривизни у відповідній її точці, які необхідні для безпосереднього застосування вказаного рівняння капілярності, пов'язане із значними труднощами. Тому більшість дослідників пропонують наближені залежності для розрахунку поверхневого натягу з використанням інших параметрів, вимірювання яких здійснити легше.

Існує численна група таких методів вимірювання поверхневого і міжфазного натягів (динамічних та статичних) [1, 2, 3]. Динамічні методи характеризуються швидкістю зміни величини поверхні, що визначається природою процесу, який викорис-

товується для вимірювання, а також адсорбцією молекул поверхнево-активних речовин (ПАР) на досліджувану поверхню в процесі вимірювання. Оскільки вимірювання стають неможливими, якщо швидкість наближається до нуля, остання повинна залишатися скінченною.

До динамічних методів належать:

- 1) метод осцилюючого струменя,
- 2) метод струменевого принтера,
- 3) метод рідкої завіси,
- 4) метод капілярних хвиль тощо.

Методи, що називаються статичними, можна розділити на напівстатичні і власне статичні.

Напівстатичні методи — це такі, в яких для визначення величини поверхневого натягу також використовується процес зміни величини поверхні і вимірюються параметри поверхні для характерного моменту цього процесу, але, на відміну від динамічних методів, швидкість процесу зміни поверхні можна довільно змінювати аж до дуже малих величин.

Власне статичними є ті методи, в яких параметри вимірюються в статичному стані.

Методи можна класифікувати також і наступним чином [2]:

1) методи, що базуються на вивченні профілів менісків фіксованої форми:

- метод лежачої краплі,
- метод висячої краплі,
- метод розгорнутого меніска,
- метод капілярного підняття,
- метод двох менісків,
- метод менісків біля плоскої стінки,
- метод вертикального циліндра,
- метод пластинки Вільгельмі;

2) методи, що базуються на вимірюванні екстремальних значень параметрів:

- метод максимальної висоти лежачої краплі,
- метод витягування вертикального циліндра,
- метод витягування кулі,
- метод витягування конуса,

методи витягування пластини і порожнього циліндра,

методи витягування горизонтального циліндра і кільця;

3) методи, що використовують стійкість менісків:

метод максимального тиску в пухирці або краплі,

метод падаючого меніска,

метод ваги крапель,

метод максимальної висоти висячої краплі,

методи відриву тіл;

4) методи, що використовують процес обертання капілярних поверхонь:

метод краплі, що обертається,

метод стержня, що обертається,

метод видавлювання краплі полем обертання.

Метод, який приймається за основу при проведенні вимірювань, повинен бути добре обґрунтованим теоретично, бути точним і незалежним від крайового кута змочування, оскільки останній дуже мінливий і його важко точно виміряти і врахувати. Застосування величин крайового кута, знайденого в іншому досліді, для точного визначення поверхневого натягу не може бути виправданим.

У разі дослідження складних систем метод повинен бути статичним, щоб завжди зберігалася можливість повторними вимірюваннями через певні проміжки часу переконатися у досягненні адсорбційної рівноваги. З цієї точки зору результати, одержані динамічними методами і навіть напівстатичними, викликають сумніви, які усуваються тільки статичними методами.

Менш важливо, але бажано, щоб вибраний метод давав можливість визначати крайовий кут змочування, дозволяв би застосування при довільній температурі.

Деякі автори [3] надають істотного значення можливості оновлення поверхні. Ця вимога суперечить вимозі статичності. Звичайно, якби був відомий час, потрібний для того, щоб система прийшла до адсорбційної рівноваги, то було б доцільно перед кожним новим вимірюванням оновлювати поверхню і продовжувати дослідження після встановлення рівноваги. Бажано, щоб вимірювання можна було проводити з малою кількістю досліджуваної речовини.

У даному випадку метод повинен забезпечити вимірювання динамічного поверхневого натягу на межі розділу рідина — повітря та рідина — рідина в інтервалі часу від 1с до  $10^4$ с. Важливими є також можливість стабілізації умов вимірювання і автоматизація вимірювального процесу.

Таким вимогам відповідають методи лежачої та висячої краплі і пухирця під пластинкою. Експериментальні аспекти методів висячої і лежачої крапель близькі. Вони відрізняються способами формування краплі і методикою розрахунку поверхневого натягу, але в головному — забезпеченні умов отримання якісного зображення краплі і способах вимірювання координат відповідних точок поверхні — вони аналогічні. Застосування сучасної оптико-електронної системи експрес-вимірювання геометричних розмірів дає можливість також визначити крайові кути натікання і відтікання.

Першим, хто застосував лежачу краплю для визначення поверхневого натягу, був Квінке [2, 3]. Для крапель, що погано змочують тверду поверхню ( $\theta > \pi/2$ ;  $\theta$  — крайовий кут змочування), він вимірював висоту краплі  $z_e$  від її вершини до екватора (рис. 1) і розраховував поверхневий натяг за формулою, що добре працює тільки для дуже широких (плоских) крапель:

$$z = (c^b - c^a) g z_e^2 / 2, \quad (2)$$

де  $\rho^a - \rho^b = \Delta\rho$  — різниця густин  $\alpha$  і  $\beta$  фаз,  $Z_e$  — відстань від омблочної точки краплі до найбільшого її діаметру.

Зрозуміло, що формулу (2) можна використовувати і у випадку, коли крапля утворює з поверхнею, на якій лежить, крайовий кут  $\theta = \varphi_c = \pi/2$ . Тоді вимірюється її повна висота  $z_c$ .

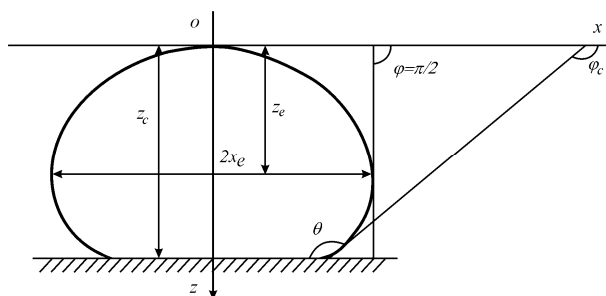


Рис. 1. Профіль лежачої краплі, рідина в якій не змочує тверду основу (підложку).

Однак робота з краплями великого діаметра є досить складною, оскільки дослідникам доводиться оцінювати вплив неоднорідності твердої поверхні на утворення краплі з постійним крайовим кутом уздовж лінії контакту фаз. Сама контактна лінія може відрізнитися від кола, наслідком чого є втрата обертової симетрії кола. Для широких крапель важко зафіксувати положення їхніх вершин. Тому значно зручніше користуватися краплями значно менших розмірів. Подальше удосконалення методу [4] дозволило знизити межу допустимих діаметрів крапель до  $2\xi_c \approx 6$  ( $\xi_c$  — безрозмірна величина), що для води відповідає діаметру  $\approx 1,5$  см.

Розглянутий варіант методу лежачої краплі, що оперує трьома величинами —  $x_e$ ,  $z_e$ ,  $\varphi = \pi/2$ , з яких фактично вимірюються тільки дві (декартові) координати, має один суттєвий недолік, а тому і велику похибку вимірювання  $x_e$  і  $z_e$ . Неважко помітити, що похибка фіксації положення екваторіальної точки значно сильніше впливає на похибку  $\Delta z_e$ , ніж на похибку  $\Delta x_e$ .

У 1928 р. Дорсі [5] запропонував інший варіант методу лежачої краплі, що дозволив уникнути вимірювання  $z_e$ . Замість цієї величини було запропоновано вимірювати відстань  $H_{\pi/4}$  від точки перетину вісі  $z$  з дотичною до профілю краплі, що складає з віссю  $z$  кут  $\varphi = \pi/4$ , до вершин краплі (рис. 2). Ця

відстань пов'язана з координатами  $x_{\pi/4}$  та  $z_{\pi/4}$  простим співвідношенням:

$$H_{p/4} = x_{p/4} - z_{p/4} \cdot \quad (3)$$

Частково використовуючи таблиці Башфорта і Адамса [6], Дорсі отримав наступний емпіричний вираз для розрахунку поверхневого натягу:

$$2/cx_e^2 = 0.0481q + 0.05200/q - 0.12268, \quad (4)$$

де  $q \equiv H_{p/4}/x_e - 0.41421$ ;  $c = 2/a^2$ ;  $a^2 = 2\sigma/\Delta\rho g$  — капілярна стала.

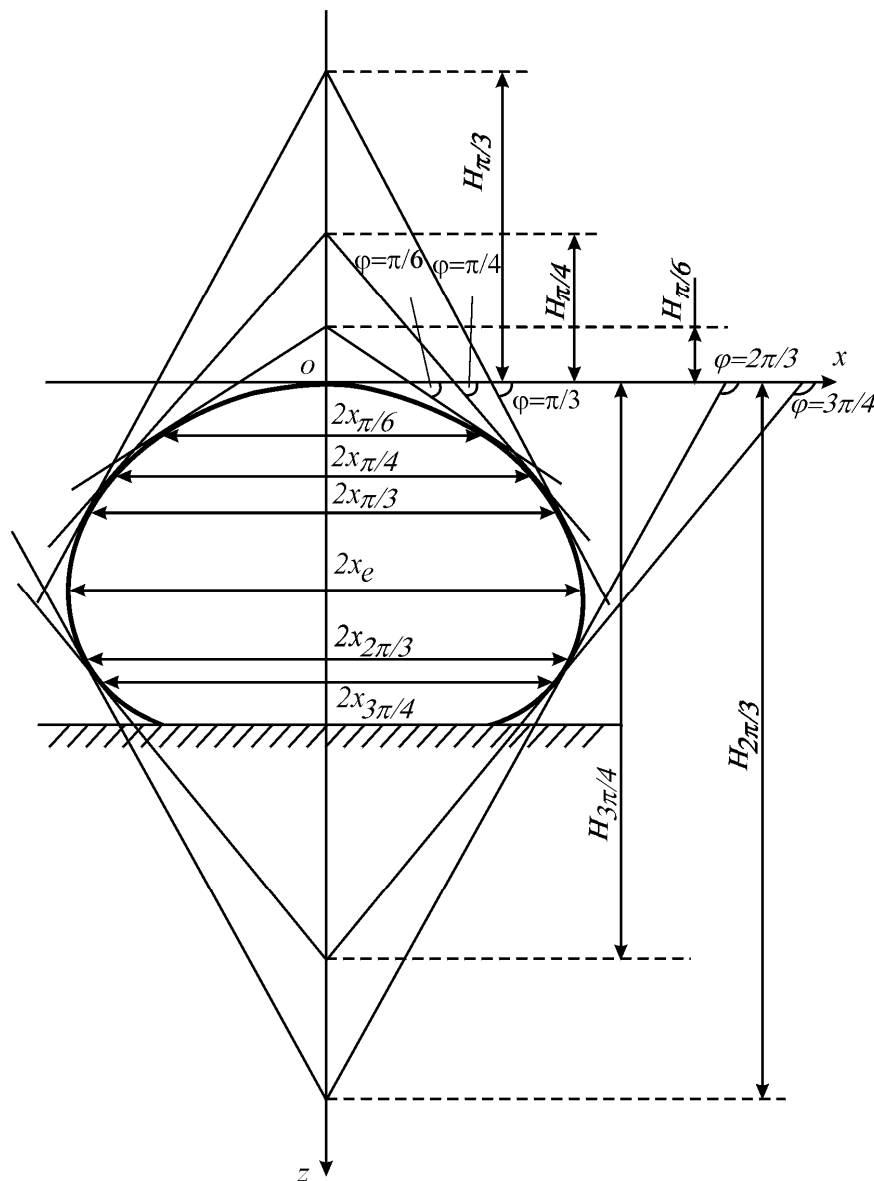


Рис. 2. Профіль лежачої краплі і величини, що вимірюються згідно [3, 5, 7, 8, 13].

У роботі [7] можливості даного варіанту були розширені за рахунок використання різних дотич-

них, проведених до профілю, таких, що складають з віссю  $x$  кути (крім  $\varphi = \pi/4$ )  $\varphi = \pi/3, \varphi = 2\pi/3, \varphi = 3\pi/4$ . У загальному випадку співвідношення між  $H_\varphi, x_\varphi, z_\varphi$  можна записати у вигляді:

$$H_\varphi = \pm \left( x_\varphi \operatorname{tg} \varphi - z_\varphi \right), \quad (6)$$

де знак “+” відповідає кутам  $\varphi < \pi/2$ , а знак “-” —  $\varphi > \pi/2$ .

Задача знаходження величини поверхневого натягу була розглянута в роботі [7] строго. Єдність її розв’язку характеризується однією з пар додаткових умов:

$$\begin{aligned} x \left| \varphi = p/2 = x_e, \quad [x \operatorname{tg}(\varphi x^3) - z] \right|_{\varphi = p/3} &= H_{p/3}, \\ x \left| \varphi = p/2 = x_e, \quad [x \operatorname{tg}(\varphi x^4) - z] \right|_{\varphi = p/4} &= H_{p/4}. \end{aligned} \quad (7)$$

Безпосередньо розрахунки поверхневого натягу проводилися за допомогою отриманих (на основі таблиць Башфорта і Адамса) [6] табличних залежностей  $H_\varphi/x_e$  від  $\beta$  ( $\beta = 2b^2/a^2$ , де  $b$  – радіус кривизни поверхні в омболічній точці) для кожного із згаданих вище кутів. Спочатку із відповідної залежності інтерполяцією визначалося значення  $\beta$ , а потім, виходячи із таблиць [6], знаходилося значення  $x_e/b$ , на основі якого визначали радіус кривизни  $b$ . У підсумку поверхневий натяг розраховували за формулою:

$$z = (c^{\bar{b}} - c^{\bar{e}}) g b^2 / \bar{e}. \quad (8)$$

Більш зручну процедуру розрахунку  $\gamma$  у даному варіанті методу розробили Івашенко, Богатиренко, Єрьоменко [8, 3] (для  $\varphi = \pi/4$ ). На основі таблиць Башфорта і Адамса вони табулювали залежності  $1/cx_e^2$  від  $H_{\pi/4}/x_e$  [2], за даними яких для  $x_{\pi/4}$  і  $x_e$  достатньо просто знайти поверхневий натяг.

Свій варіант методу лежачої краплі розробили Мелік-Гайказян та Ворончіхіна [9]. Їхня ідея полягає в тому, щоб поряд з екваторіальним діаметром  $2x_e$  вимірюють діаметр  $2x_{(m)}$  на відстані  $mx_e$  від вершини краплі, використовуючи значення  $m=0.6$  або  $m=1$ . Характеризуючі варіант умови мають вигляд:

$$\varphi \left| x = x_e = p/2; \quad z \left| x = x_{(m)} = mx_e. \quad (9) \right. \right.$$

Наведені варіанти методу лежачої краплі використовують координати, що пов’язані з екваторіальною точкою профілю краплі, де  $\varphi = \pi/2$ . Однак для випадків, коли крапля знаходиться на абсолютно незмочуваній поверхні, існує друга приваблива точка, що досить просто ідентифікується у досліді. Це точка профілю у місці контакту трьох фаз, де  $\varphi_c = \theta = \pi$ . Тернер [10] і Малколм та Еліот [11] розро-

били методику вимірювання поверхневого натягу при  $\theta = \pi$ . Значно більші можливості для визначення поверхневого натягу за даними про повну висоту краплі та екваторіальний діаметр представляють результати роботи [12], котрі можуть застосовуватися для довільних крайових кутів змочування  $\theta \geq \pi/2$ .

Коли отримання інформації про крайовий кут є проблемою, слід звернутися до варіанта методу, запропонованого Малколмом та Пайнтером. Ідея цього варіанта полягає у тому, що на одній і тій же верхній формується не одна, а дві (як мінімум) краплі, що відрізняються за об’ємом, але мають однаковий крайовий кут  $\varphi_c = \theta$  (величина котрого невідома) і вимірюються чотири величини:  $2x_{e1}, 2x_{e2}, z_{c1}, z_{c2}$ . На основі цих величин можна розрахувати поверхневий натяг і, якщо потрібно, крайовий кут змочування.

У роботах [3, 13] описаний варіант, що дозволяє вимірювати значення поверхневого натягу для крапель, що не мають екватора. Для реалізації процедури розрахунку  $\gamma$  за знайденими значеннями величин  $H_{\pi/6}, H_{\pi/4}$  у цих роботах була отримана таблична залежність величини  $1/cH_{p/4}^2$ , що дозволяє легко знаходити  $c$  (або  $\gamma$ ). Даний варіант реалізації методу лежачої краплі можна застосовувати для крапель із значеннями крайових кутів, що лежать у широкому діапазоні:  $\pi/4 \leq \theta \leq \pi$ .

Найбільш загальним є варіант Ліонса, Елбінга, Вільсона [14]. Дана реалізація допускає довільну форму краплі, оскільки на профілі вимірюються декартові координати (усього чотири) двох довільно вибраних точок 1 і 2:  $x_1, z_1, x_2, z_2$  (рис. 3). Додаткові умови при цьому можна використати наступні:

$$z \left| x = x_1 = z_1; \quad z \left| x = x_2 = z_2. \quad (10) \right. \right.$$

Крім точок 1 і 2 необхідно вибрати ще одну довільну точку 3, для котрої реально оцінити її координати з тим, щоб у подальшому використати їх як початкові наближення ітераційної процедури пошуку  $\gamma$ . У випадку, коли робота ведеться з краплею, що має екватор, доцільно замість точки 3 використати екваторіальну точку.

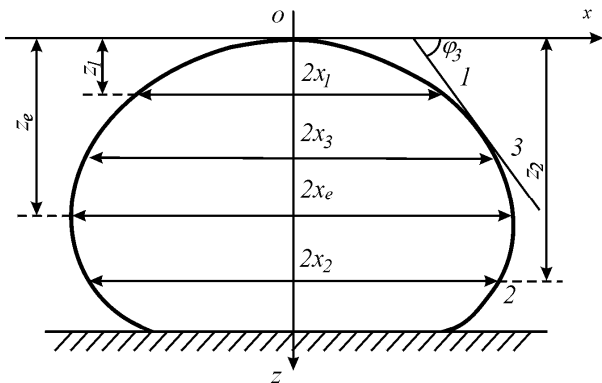


Рис. 3. Профіль лежачої краплі при вимірюванні поверхневого натягу згідно [14].

Загальна схема розрахункового алгоритму полягає у наступному. Спочатку знаходяться відношення отриманих із експеримента величин  $x_1, z_1, x_2, z_2$ , а саме,  $z_1/x_1, z_2/x_2, z_2/z_1$ . Після цього змінюється параметр  $B$  у диференційному рівнянні (11), розв'язки котрого (разом із записаними у безрозмірній формі рівняннями (12, 13)), дають серію залежностей  $\zeta(\xi)$  (тобто,  $z\sqrt{c}(x\sqrt{c})$ ):

$$d\varphi/dz + \sin \varphi/o = 2B + o, \quad (11)$$

$$dz/ds = \sin \varphi, \quad (12)$$

$$dx/ds = \cos \varphi, \text{ де } z = s\sqrt{c}. \quad (13)$$

У ході виконання процедури кожна з цих залежностей перевіряється на предмет виконання рівностей:

$$z_1/x_1 = \eta_1/o_1, \quad z_2/x_2 = \eta_2/o_2, \quad z_2/z_1 = \eta_2/\eta_1. \quad (14)$$

Іншими словами, фактично виконуються умови (10).

Якщо для даного значення  $B$  (при виконанні двох перших рівностей (14)) відношення  $z_2/z_1$ , більше за  $\zeta_2/\zeta_1$ , то  $B$  зменшується і навпаки.

Автори також запропонували методику визначення початкового значення  $B^{(0)}$ .

З урахуванням знайдених значень безрозмірних координат поверхневий натяг просто розрахувати за формулою:

$$z = (c^{\delta} - c^{\epsilon})g(x_1/o_1)^2. \quad (15)$$

Творцями методу висячої краплі вважають Андреаса, Хаусера і Такера [15]. У роботі [15] використовувалися висячі краплі з екватором, на профілі яких вимірювали екваторіальний діаметр  $2x_e$  і діаметр  $2x_{(m)}$  на відстані  $mx_e$  ( $m=2$ ) від вершини краплі. Процедура розрахунку  $\gamma$  згідно [15] здійснюється на основі таблиць залежності  $1/4cx_e^2$  від  $x_{(m)}/x_e$ . Ця залежність була знайдена емпіричним шляхом, а саме, з вимірювань діаметрів  $2x_e$  та  $2x_{(m)}$  для різних

за розміром і формою крапель води. При цьому величина  $x_{(m)}/x_e$  вар'ювалася від 0.7 до 1.00.

Інший варіант методу висячої краплі був запропонований Уінкелом [16]. Для його реалізації необхідна крапля з шийкою, а вимірюваними величинами служать екваторіальний діаметр краплі  $2x_e$  та діаметр "шийки"  $2x_n$  (рис. 4). Описана у [16] схема пошуку  $\gamma$  з  $2x_e$  і  $2x_n$  не відрізняється від [15]: спочатку знаходять відношення вимірюваних діаметрів, а потім із залежності, що пов'язує це відношення і безрозмірний екваторіальний діаметр, визначається  $c$ , а потім  $\gamma$ .

Останній варіант є більш точний з експериментальної точки зору, оскільки вимірювані незалежно один від одного відрізки  $2x_e$  і  $2x_n$  мають однакову похибку. У першому варіанті ([15]) діаметр  $2x_{(m)}$  визначається із більшою похибкою, ніж  $2x_e$ , оскільки до власної похибки  $2x_{(m)}$  додається подвоєна похибка вимірювання  $2x_e$ .

Обидва варіанти передбачають наявність у краплі екватора. У роботі [14], результати котрої також можуть бути застосовані і до методу лежачої краплі, ця умова не є необхідною. Як і у випадку лежачої краплі, на профілі висячої краплі довільної форми визначаються дві пари декартових координат будь-яких двох точок 1 і 2:  $x_1, z_1, x_2, z_2$  (рис. 5). Загальна схема розрахункового алгоритму також співпадає з описаною у [14].

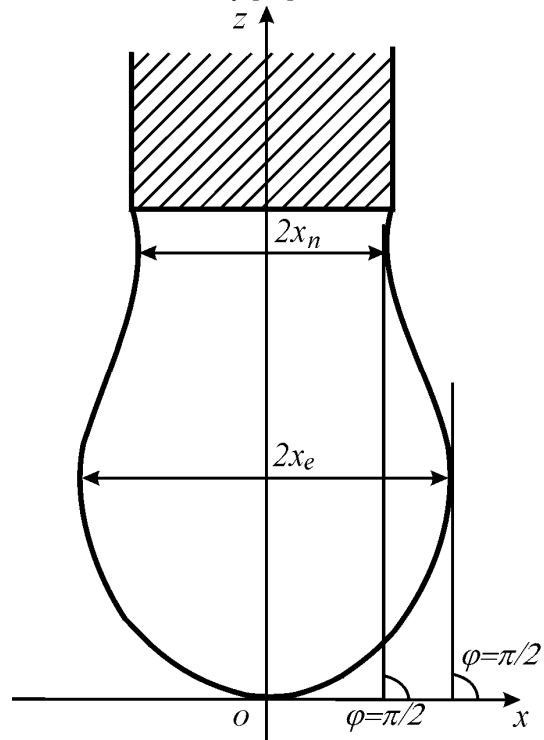


Рис. 4. Профіль висячої краплі з шийкою при вимірюванні поверхневого натягу згідно [14].

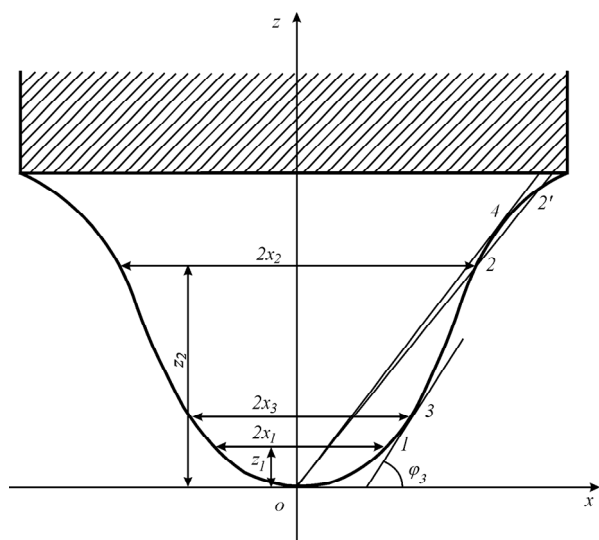


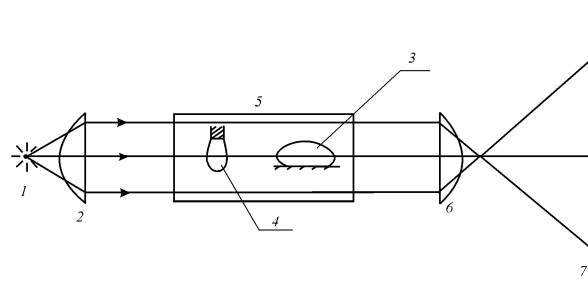
Рис. 5. Профіль висячої краплі при вимірюванні поверхневого натягу згідно [15].

Розглянуті варіанти методів лежачої та висячої краплі представляють собою шляхи реалізації задачі, метою якої є: отримання із експеримента мінімального числа вимірюваних величин, за допомогою яких можна було б записати додаткові краєві умови і забезпечити цим однозначний розв'язок задачі — отримання капілярної сталої  $a^2$ , а значить, і поверхневого натягу  $\gamma$ . Схема пошуку  $a^2$  (і  $\gamma$ ) наступна: на реальному профілі меніска виділяються дві точки (або одна з відомим кутом нахилу дотичної), через який проводять деякий теоретичний профіль, що характеризується двома параметрами —  $b$  і  $a^2$ . Значення другого з них необхідно знайти. При цьому знання всього профілю  $z(x)$  є зайвим.

З точки зору точності (а не простоти експеримента) очевидно, що даний підхід не використовує всі резерви, що мають методи лежачої та висячої краплі. Якщо зняти з профіля, що спостерігається в досліді, не одну чи дві, а значно більше точок, то шляхом мінімізації відхилення теоретичного профіля від експериментальних точок можна було б знизити вплив випадкових похибок, що супроводжують експеримент.

Експериментальні аспекти методів висячої та лежачої крапель досить близькі; хоча способи формування краплі різні, в головному — забезпеченні умов отримання зображення краплі достатньої якості і способах вимірювання координат точок профіля — вони не відрізняються.

Загальний вигляд установки, що реалізує ці методи, схематично показано на рис. 6. Головними її вузлами є: джерело світла; колімаційна лінза; кювета із краплею, оточеною газом чи іншою рідиною; лінза, що збільшує зображення краплі.



1 — джерело світла; 2 — колімаційна лінза; 3, 4 — лежача і висяча краплі; 5 — кювета для краплі з оточуючим її газом або іншою рідиною; 6 — конденсорна лінза; 7 — площина зображення

Рис. 6. Принципова схема установки, що реалізує метод лежачої (висячої краплі).

Обов'язковою умовою отримання зображення краплі, що відповідає меридіональному перерізу, є паралельність променів. Цікаве рішення запропоноване в роботі [17]: освітлювати краплю не збоку, а з середини, тобто світловий потік направляти згори (використовувалася висяча крапля) через трубку. У цьому випадку зображення краплі виглядає як світла область на чорному фоні.

Основна відмінність між методами висячої та лежачої краплі полягає у способах формування крапель. Висяча крапля утворюється на кінці круглої трубки з добре обробленими краями. Для цього можна використати або скляну капілярну трубку, або звичайну гіподермічну голку із нержавіючої сталі. Трубку або голку, як правило, з'єднують з мікрометричним шприцем для плавного дозування рідини з тим, щоб якомога точніше утворювати краплю потрібної форми.

Сформувати лежачу краплю можна скапуванням рідини з кінчика трубки, що знаходиться над твердою поверхнею. Частіше лежачу краплю утворюють так само, як і висячу, — на торці трубки, повернувши її кінцем угору.

Діаметр кінчика трубки підбирається попередньо у відповідності з необхідною формою краплі (лінія контакту краплі з твердою поверхнею може проходити як по зовнішньому краю торця трубки, так і по внутрішньому).

Однією із головних задач, розв'язок яких повинна забезпечити установка для визначення поверхневого натягу методами лежачої чи висячої краплі — отримання чіткого зображення (профілю) краплі з подальшим його оцифруванням.

Найпростіший спосіб отримання зображення — проєкційний, коли збільшене зображення краплі отримується на екрані (наприклад, на міліметровому папері). Даний спосіб придатний тільки для грубої оцінки поверхневого натягу і при важливих досліді-

дженням він не застосовується.

Достатньо чіткий профіль можна отримати, якщо використати в установці вимірювальний мікроскоп. Залежно від варіанту методу, що використовується, застосовують або двокоординатний вимірювальний мікроскоп, або достатньо однокоординатного. Ці прилади можуть забезпечити вимірювання координат з похибками до  $\pm(0.005 - 0.001)$  мм. Використання їх виправдане, коли проводиться невелике число вимірювань. Коли ж число точок профіля, що аналізуються, складає кілька десятків, процедура вимірювання стає надто втомливою.

Більш поширений спосіб отримання зображення краплі — фотографування. Зображення можна отримати на фотопластинці або фотоплівці. У першому випадку ми маємо справу з проєкційним способом отримання зображення. У другому випадку фотоапарат працює в парі з мікроскопом.

У способах отримання зображення краплі, описаних вище, її профіль видно як чітку межу між двома контрастними за освітленістю областями. Існує інший спосіб отримання контура краплі — стріаскопичний [18, 19, 20]. Ідея його полягає в тому, що із всієї інтерференційної картини, що спостерігається у площині зображення при проходженні світла від лазера через досліджуваний об'єкт, може бути виділена тільки одна світла інтерференційна смуга. Цього досягають, використовуючи маску — об'єкт, що розміщують у фокусі конденсорної лінзи, — і концентричну з нею діафрагму, розташовану приблизно посередині між лінзою і маскою.

На початку 80-х років серед способів отримання і аналізу зображення краплі з'явився ще один, що базується на використанні відеотехніки. Використання такої апаратури привабливе, оскільки дає можливість повністю автоматизувати процес вимірювання і обробки даних аж до отримання кінцевого результату.

Функціонує подібна установка наступним чином. Збільшене мікроскопом зображення краплі приймається відеокамерою. Далі сигнал поступає у відеопроцесор, де відбувається його оцифрування. При цьому кожний піксель характеризується певним числом рівнів яскравості.

Оцифроване зображення поступає в комп'ютер, де здійснюється сегментація зображення, тобто виділення краю краплі.

Торкаючись загальних питань будови установок для визначення поверхневого натягу за методами лежачої і висячої краплі, можна визначити ряд моментів.

Зручність регулювання і отримання оптимального зображення краплі забезпечується розташу-

ванням чашечки і оптичних вузлів установки довільного типу на оптичній лавці. У свою чергу лавка повинна знаходитися на масивній антивібраційній підставці.

Тривалість одного дослідження по визначенню поверхневого натягу вказаними методами може бути досить великою (це важливо для тих випадків, коли необхідно гарантувати досягнення рівноваги).

Щодо точності методів лежачої і висячої краплі необхідно відзначити, що вона залежить як від теоретичних, так і від експериментальних факторів. Класичні варіанти методів у порівнянні з регресійними хоча і виграють у простоті, але програють останнім у точності. Проведена у [21] оцінка похибки визначення  $\gamma$  на прикладі описаного у [3] варіанта метода висячої краплі дала величину цієї похибки  $\approx 0.15\%$ , тоді як автоматичне знімання для однієї краплі кількох сотень профілів з інтервалами 1.2с і їх статистична обробка дозволили отримати похибку, що не перевищує 0.05 %.

Інший шлях зменшення похибки із використанням меншого числа точок полягає в попередньому одно- або двоетапному згладжуванні точок, отриманих в результаті сегментації відеозображення краплі.

Зрозуміло, що велике число точок (сотні, тисячі) отримати і обробити вручну традиційними способами (з використанням мікроскопа або фотографії) практично неможливо. Таким чином, відеоустановка — єдиний інструмент, що дозволяє досягнути в методах лежачої і висячої краплі похибок, що не перевищують десятих долей відсотка.

1. Адамсон А. *Физическая химия поверхностей*: Пер. с. англ./ Под ред. З. М. Зорина, В. М. Муллера. — М.: Мир., 1979. — 568 с.
2. *Межфазная тензиометрия* / А. И. Русанов, В. А. Прохоров. — СПб: Химия, 1994. — 400 с.
3. Іващенко Ю. М., Єрмоєнко В. Н. *Основи прецизійного вимірювання поверхневої енергії розплавів металів за методом лежачої краплі*. — К.: Наукова думка, 1972.
4. Porter A. W. // *Phil. Mag. Ser. 7*. 1933. - V. 15, № 96. - P. 163-170.
5. Dorsey N. E. // *J. Washington Acad. Sci.* 1928. V. 18, № 19. - P. 505-509.
6. Bashfort F., Adams J. C. *An attempt to test the theories of capillary action*. Cambridge: University Press, 1883. 140 p.
7. Kozakevitch P., Schatel S., Urbain G., Sage M. // *Rev. Metallurg.* 1955. - V. 52, № 2. - P. 139-160.
8. Іващенко Ю. Н., Богатыренко Б. Б., Ермоєнко В. Н. // *Поверхностные явления в расплавах и процессах порошковой металлургии* / Под ред. Ермоєнко В. Н. Киев: Изд-во АН УССР, 1963. - С. 391-417.
9. Мелик-Гайказян В. И., Ворончихина В. В. // *Изв. Томск. политех. ин-та*. 1966. - Т. 151. - С. 46-

51. 10 Turner T. // *J. Inst. Metals*. 1921. - V. 26, № 2. - P. 5-43. 11. Malcolm J. D., Elliott C. D. // *Canad. J. Chem. Eng.* 1980. - V. 58, № 2. - P. 151-153. 12. Coucoulas L. M., Dawe R. A. // *J. Colloid Interface Sci.* 1985. - V. 103, № 1. - P. 230-236; *ibid.* V. 106, № 2. - P. 556. 13. Иващенко Ю. Н., Ерёменко В. Н., Богатыренко Б. Б. // *Журн. физ. химии*. 1965. - Т. 39; № 2. С. 516-519. 14. Lyons C. J., Elbing E., Wilson I. R. // *J. Chem. Soc. Faraday Trans. Ser. 2*. 1985. - V. 81, № 3. - P. 327-339. 15. Andreas J. M., Hauser E. A., Tucker W. B. // *J. Phys. Chem.* 1938. - V. 42, № 8. - P. 1001-1019. 16. Winkel D. // *J. Phys. Chem.* 1965. - V. 69, № 1. - P. 348-350. 17. Nguyen D. C., McKinnon I. R., Wilson I. R. // *ibid.* 1987. - V. 119, № 1. - P. 275-276. 18. Vos H., Los J. M. // *J. Colloid Interface Sci.* 1980. - V. 74, № 2. - P. 360-369. 19. Los J. M., Vos H., Wagenaar J. // *J. Physics Ser. E*. 1978. - V. 11, № 10. - P. 1027-1032. 20. Dew G. D. // *Optica Acta*. 1970. V. 17, № 4. - P. 237-257. 21. Ambwani D. S., Fort T. // *Surface and colloid science*. V. 11 / Ed. by Good R. J., Stromberg R. R. // N. Y.: Plenum Press. - 1979. - P. 93-119.