

УДК 532.61

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН МЕТОДОМ РОЗГОРНУТОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО МЕНІСКА БІЛЯ ПЛОСКОЇ СТІНКИ**О. Б. Барна, В. Б. Біліщук, І. С. Кісіль***Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (03422)4-60-77, e-mail: annavyn@ukr.net*

Проаналізовані різновиди методу пластинки для вимірювання поверхневого натягу рідин. Зроблено математичний аналіз і опис профілю розгорнутого циліндричного меніска біля вертикальної стінки пластинки. Запропоновано удосконалений метод визначення поверхневого натягу рідин з використанням профілів розгорнутих циліндричних менісків.

Ключові слова: поверхневий натяг, метод пластинки, розгорнутий циліндричний меніск, капілярна стала, радіус кривизни.

Проанализированы разновидности метода пластинки для измерения поверхностного натяжения жидкостей. Сделан математический анализ и описание профиля развернутого цилиндрического мениска около вертикальной стенки пластинки. Предложен усовершенствованный метод определения поверхностного натяжения жидкостей с использованием профилей развернутых цилиндрических менисков.

Ключевые слова: поверхностное натяжение, метод пластинки, развернутый цилиндрический мениск, капиллярная постоянная, радиус кривизны.

The varieties of plate methods for measuring of surface tension of liquids are analyzed. A mathematical analysis and description of the unfolded cylinder meniscus profile near the vertical wall of plate is done. The improved method of determination of surface tension of liquids is offered with the use of profile unfolded cylinder meniscus.

Keywords: surface tension, plate method, unfolded cylinder meniscus, capillary constant, radius of curvature.

Дослідження поверхневого натягу (ПН) рідин дозволяє здійснювати їх вибір при проведенні відповідних технологічних процесів, в яких ці рідини використовують.

Серед сучасних методів вимірювання ПН рідин значне місце займають методи дослідження профілів меніска фіксованої форми. До них належать такі методи, як метод висячої краплі, метод лежачої краплі, метод капілярного підняття, метод розгорнутого меніска [1]. Менш популярним на даний час, внаслідок складності проведення, є метод дослідження форми меніска біля плоскої стінки (рис. 1). В даному методі як об'єкт дослідження використовують меніск біля плоскої стінки достатньої довжини і який можна розглядати як циліндричний розгорнутий меніск. Ця обставина дає можливість застосувати для розрахунків ПН прості, але тим не менше строгі аналітичні співвідношення [2].

Найпростіший варіант методу меніска біля плоскої стінки був запропонований Моркосом [3], в якому вимірювалася максимальна висота підняття меніска біля стінки твердого тіла і при відомому куті змочування θ та густині рідини

розраховувалось значення ПН. Основним недоліком даного методу є складність визначення крайового кута змочування досліджуваною рідиною поверхні твердого тіла. Для спрощення розрахунків можна максимально досягти повного змочування, при якому $\theta \rightarrow 0$, використавши спеціальний матеріал твердого тіла (найкраще платина [4], тонке мікроскопне покривне скло [5]) або спеціальне технологічне оброблення поверхні твердого тіла. У першому випадку це досить витратно, у другому – технологічно важко виконати. При повному змочуванні також існує проблема точного визначення висоти підняття меніска, оскільки важко визначити візуально точне місце знаходження лінії трьохфазного контакту.

Інший варіант даного методу [6, 7] передбачає використання джерела лазерного випромінювання для визначення координат двох довільно вибраних точок профілю меніска. Використання двох точок дозволяє відійти від вимірювання абсолютних значень декартових координат z_1 , z_2 чи x_1 , x_2 і обійтись для розрахунку ПН визначенням в експерименті

лише їх різниці $\Delta z = z_1 - z_2$ або $\Delta x = x_1 - x_2$ і кута між падаючим та відбитим променем в обох точках. Але даний метод не має широкого застосування, оскільки для точного визначення згаданих вище параметрів необхідно використовувати складні оптичні системи.

На основі зробленого аналізу виникла необхідність у розробленні удосконаленого методу визначення ПН шляхом дослідження меніска рідини біля плоскої стінки, який не вимагатиме розроблення і застосування складних оптичних систем, лазерної техніки і при цьому забезпечить достатню точність вимірювання. Тому пропонується використовувати оптичні методи визначення координат точок профілю поверхні досліджуваного об'єкта з використанням відеотехніки із сенсорним елементом, побудованим на ПЗЗ матриці. Згідно [8], похибка визначення координат точок профілю меніска складатиме $\pm 0,001$ мм, що цілком достатньо для вирішення поставленої задачі. На основі порівняння попередньо розрахованого теоретичного профілю меніска рідини і множини точок профілю, знайдених експериментальним шляхом за допомогою відеотехніки, пропонується визначати ПН досліджуваної рідини.

Розглянемо профіль меніска (рис. 1). Тиск рідини в т. B , що знаходиться на межі розділу фаз, рівний:

$$P_{B2} = P_{A2} - \rho_2 g z, \quad (1)$$

де ρ_2 – густина рідини, P_{A2} – тиск рідини в т. A .

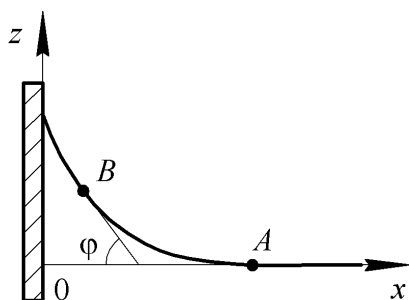


Рисунок 1 – Профіль розгорнутого циліндричного меніска біля вертикальної пластини

Тиск ззовні меніска в т. B

$$P_{B1} = P_{A1} - \rho_1 g z, \quad (2)$$

де ρ_1 – густина газу, P_{A1} – тиск газу в т. A .

Віднімаючи (2) від (1), отримуємо:

$$P_{B2} - P_{B1} = P_{A2} - P_{A1} - \Delta \rho g z. \quad (3)$$

Різниця тисків в т. B і в т. A згідно закону Лапласа будуть такими:

$$\Delta P_B = P_{B2} - P_{B1} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (4)$$

$$\Delta P_A = P_{A2} - P_{A1} = \sigma \left(\frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{02}} \right), \quad (5)$$

де R_1 , R_2 , R_{01} , R_{02} – радіуси кривизни поверхні меніска в т. B і в т. A , відповідно.

Підставляючи рівняння (4) і (5) в (3), отримуємо, що:

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \sigma \left(\frac{1}{R_{01}} + \frac{1}{R_{02}} \right) - \Delta \rho g z. \quad (6)$$

Згідно [2], меридіональна кривизна буде такою:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{d\varphi}{dl} = \frac{d \cos \varphi}{dz} = \frac{d \sin \varphi}{dx}, \quad (7)$$

де l – довжина дуги, φ – кут між дотичною до кривої в т. B і віссю OX .

У даному випадку екваторіальна кривизна $1/R_2 = 0$, оскільки $R_2 \rightarrow \infty$.

Точка A знаходиться на горизонтальній ділянці поверхні, тому радіуси кривизни в цій точці $R_{01} = R_{02} \rightarrow \infty$.

Тоді з урахуванням (7) і (6) можна записати, що:

$$\sigma \frac{d\varphi}{dl} = -\Delta \rho g z, \quad \sigma \frac{d \cos \varphi}{dz} = -\Delta \rho g z, \quad (8)$$

$$\text{або} \quad \frac{d\varphi}{dl} = \frac{d \cos \varphi}{dz} = \frac{d \sin \varphi}{dx} = -\frac{\Delta \rho g}{\sigma} z. \quad (9)$$

У рівнянні (9) коефіцієнт при z є постійним і називається капілярною сталою:

$$c = \Delta \rho g / \sigma. \quad (10)$$

Ця величина має розмірність оберненого квадрата довжини і пов'язана із класичною капілярною сталою (Лапласа) $a^2 = 2\sigma / \Delta \rho g$ співвідношенням $c = 2/a^2$.

Отже, основні диференціальні рівняння для циліндричних розвернутих менісків мають такий вигляд [2]:

$$d\varphi/dl = -cz, \quad (11)$$

$$d \cos \varphi / dz = -cz, \quad (12)$$

$$d \sin \varphi / dx = -cz. \quad (13)$$

Проінтегрувавши (12) із урахуванням, що при $z = 0$ кут $\varphi = 0$, отримаємо:

$$\cos \varphi = 1 - cz^2/2, \quad (14)$$

звідки

$$z = 2 \sin(\varphi/2) / \sqrt{c}, \quad (15)$$

Підстановка (15) в (11) і (13) і подальше їх інтегрування приведе до такої залежності:

$$x = [\ln \operatorname{ctg}(\varphi/4) - 2 \cos(\varphi/2)] / \sqrt{c} + C, \quad (16)$$

а, підставляючи (15) в (16), отримаємо таку залежність x від z :

$$x = \left[\ln \left(\frac{2 + \sqrt{4 - z^2 c}}{z \sqrt{c}} \right) - \sqrt{4 - z^2 c} \right] / \sqrt{c} + C, \quad (17)$$

де C – константа інтегрування.

На основі (17) з урахуванням (10) можна розрахувати координати точок профілю меніска. При цьому параметрами, від яких залежать отримані значення координат точок профілю, є різниця густин двох фаз $\Delta\rho$, ПН σ і стала інтегрування C . Різницю густин $\Delta\rho$ попередньо визначають перед дослідом за допомогою денситометрів. Під час дослідів визначаються параметри ПН σ і стала інтегрування C . Значення σ можна визначати ітераційним способом, розраховуючи подібний до експериментального теоретичний меніск. Для цього отримують зображення меніска рідини за допомогою цифрової відеотехніки. При цифровій обробці даного зображення визначають координати точок експериментального профілю меніска. Задають початкове значення ПН σ , згідно якого розраховують координати точок профілю теоретичного меніска шляхом розв'язування (17) і (10). Сталу інтегрування C можна знайти наступним чином: для заданого значення σ і максимальної висоти підняття меніска по пластині z_{\max} необхідно розрахувати згідно (17) і (10) значення абсциси x , що і буде рівним від'ємному значенню C . Отримані теоретичний і експериментальний меніски порівнюють між собою з метою визначення ступеня їх подібності, для чого використовують точки експериментального і теоретичного менісків з однаковими значеннями ординат z і розраховують параметр порівняння R таким чином:

$$R = \frac{\sum (x_e - x_m)^2}{N}, \quad (18)$$

де x_e, x_m — абсциси точок експериментального і теоретичного менісків, для яких $z_e = z_m$, N — кількість точок і які використовують для порівняння менісків.

Для подібних теоретичного і експериментального менісків значення R приймає найменше значення.

Змінюючи значення σ , яке використовують для розрахунку профілю теоретичного меніска і повторюючи вище описану процедуру, ітеративним способом розраховують подібний до експериментального теоретичний меніск. В такому випадку значення σ , яке використали для розрахунку подібного теоретичного меніска, відповідає шуканому значенню ПН.

ВИСНОВОК

Запропонований метод визначення ПН рідин дозволяє зменшити похибку визначення поверхневого натягу рідин тому, що при цьому використовують значну кількість точок менісків, що шляхом мінімізації відхилень теоретичного меніска від експериментального дозволяє зменшити вплив випадкових похибок на отриманий результат.

1. Pashley R.M. *Applied Colloid and Surface Chemistry* / Richard M. Pashley, Marilyn E. Karaman. – John Wiley & Sons, Ltd., 2004. – 188 p.
2. Русанов А. И. *Межфазная тензиометрия* / А. И. Русанов, В. А. Прохоров – СПб: Химия, 1994. – 400 с.
3. Morcos I // *J Chem. Phys.* – 1971. – V 55 - № 8. – P 4125–4127.
4. Neumann A.W. *Applied surface thermodynamics.* – 2nd ed. / A.W. Neumann, Robert David, Yi Zuo – CRC Press Taylor & Francis Group, 1976. – 768 p.
5. Lapham G. S. *In situ force-balance tensiometry* / G. S. Lapham, D. R. Dowling, W. W. Schultz. // *Experiments in Fluids.* – 1999. – № 27. – P 157–166.
6. Pat. №107981. / Friese P, Rodel K, Wessler G-R. – 1972.
7. Rodel K, Friese P, Wessler G-R // *Z Phys Chem Leipzig.* – 1973. – № 5. – P 289–297.
8. Rockett P. *The accuracy of sub-pixel localisation in the canny edge detector* / P. Rockett // *In Proc. of the British Machine Vision Conference* - 1999. – P. 392–401.

Поступила в редакцію 10.05.2011р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,
проф. Середюк О. Є.