

УДК 691.3.07

ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО АКТИВНИХ РЕЧОВИН МЕТОДОМ ПУЛЬСУЮЧОГО МЕНІСКА

А.О. Малько, 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: bulavka2007@mail.ru*

Розглянуто особливості контролю динамічного поверхневого натягу розчинів поверхнево-активних речовин методом пульсуючого меніска на методичному, інструментальному і розрахунковому рівнях.

Ключові слова: динамічний, поверхневий натяг, метод пульсуючого меніска, розчин водний, поверхнево - активна речовина, прилад, капілярна стала, максимальний тиск у бульбашці.

Рассмотрено особенности контроля динамического поверхностного натяжения растворов поверхностно активных веществ методом пульсирующего мениска на методическом, инструментальном и расчётном уровне.

Ключевые слова: динамический, метод пульсирующего мениска, раствор водный, поверхностно-активное вещество, прибор, капиллярная постоянная, максимальное давление в пузырьке.

The basic types features of control the dynamic surface-tension of solutions superficially active matters by the method of pulsating meniscus at methodical, instrumental and calculation level.

Keywords: dynamic, the method of pulsating meniscus, solution is water, an active matter is superficial, capillary permanent, device, maximal pressure in a bubble.

Контроль динамічного поверхневого натягу (ДПН) поверхнево-активних речовин (ПАР) на границі розділу фаз рідина-газ за максимальним тиском у газовій бульбашці є одним з найбільш розповсюджених. Він базується на існуванні однозначної залежності між поверхневим натягом та максимальним тиском у меніску.

Аналогом цього методу є метод пульсуючого меніска. Перевагою вказаного методу є те, що газова бульбашка не відривається при переході максимального тиску, тобто процес адсорбції на поверхні розділу фаз є неперервним, що дозволяє проводити визначення динамічних характеристик за один цикл в автоматичному режимі. Теоретичні дослідження характеристик газового меніску в околі максимального тиску наведені у роботі [1], а динаміки переходу через максимальний тиск при наявності демпферної газової ємності у роботі [2]. Дана стаття присвячена подальшому розвитку досліджень у цьому напрямку.

Структурна схема можливої технічної реалізації запропонованого методу контролю (ДПН) наведена на рис.1. Вимірювальний ножовий капіляр і компенсатор гідростатичного тиску занурюються у досліджуваний розчин на довільну глибину H . Механізм продувки ніпельного типу дозволяє продути

вимірювальний капіляр до утворення на його торці газової бульбашки. Електричний двигун через передаточний механізм здійснює коливання мембрани в одну і другу сторону, що приводить до пульсуючої зміни об'єму повітряної камери і відповідно об'єму газового меніска на торці капіляру. Діапазон переміщення мембрани налаштований так, що пульсуюча зміна об'єму газового меніска коливається відносно об'єму, який відповідає максимальному тиску у меніску. Реєстрація динаміки зміни тиску у пульсуючому газовому меніску відносно тиску в гідростатичному компенсаторі здійснюється диференціальним давачем тиску. Керування процесом контролю, обробкою і представленням результатів вимірювання здійснюється персональним комп'ютером або мікроконтролером.

Інформаційним є значення максимального перепаду тиску $P_{\max}(i\Delta t)$, яке фіксується при кожній пульсації меніска, де i номер пульсації, а Δt – період пульсації, $i = 1 \div k$, k – загальна кількість пульсацій. Типова характеристика динаміки максимального перепаду тиску за один цикл вимірювання наведена на рис. 2. Так як пухирець не зхлопується на протязі одного циклу вимірювання, то процес адсорбції ПАР на поверхні розділу фаз є неперервним, що

приводить до зменшення поверхневого натягу γ , відповідно, зменшення подальших значень перепаду максимального перепаду тиску. Цикл вимірювання припиняється при досягненні рівноважного поверхневого натягу, що відповідає незмінності максимального перепаду тиску в межах заданої похибки δ , тобто коли

$$P_{\max}(k\Delta t) - P_{\max}((i-1)\Delta t) \leq \delta. \quad (1)$$

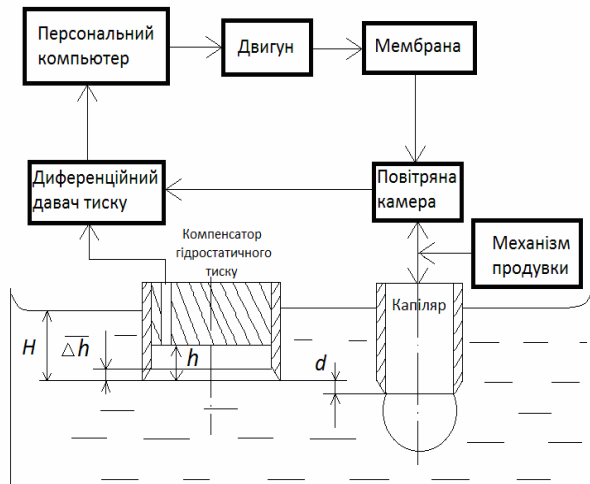


Рисунок 1 – Структурна схема приладу для вимірювання динамічного поверхневого натягу рідини методом пульсуючого меніска

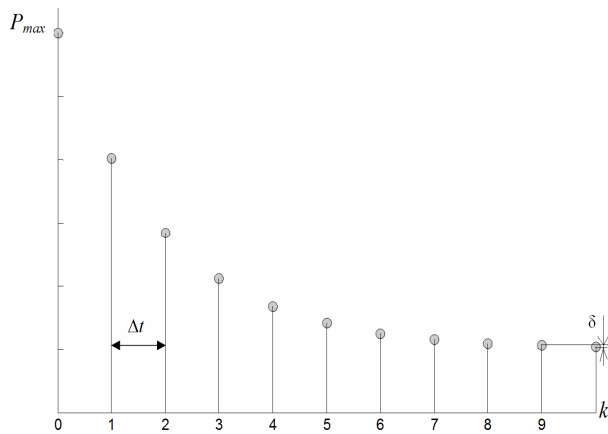


Рисунок 2 – Динаміка зміни максимального перепаду тиску у пульсуючому газовому меніску в часі

Компенсатор гідростатичного тиску (рис. 3) представляє собою тонкостінну трубку з ножовим торцем і внутрішнім радіусом R значно більшим, ніж радіус вимірювального капіляру r . Вважаючи, що об'єм трубки $V_{тр}$, яка передає тиск з компенсатора на давач, є

значно меншим від об'єму компенсатора, можна визначити величину підняття рідини Δh у компенсаторі при його зануренні на глибинну H у досліджувану рідину без врахування $V_{тр}$. Нехай висота порожнини компенсатора h , площа поперечного перерізу S , атмосферний тиск P_a і різниця густин контактуючих фаз $\Delta\rho$. Тоді згідно універсального газового закону можна записати, що

$$P_a S H = (P_a + \Delta\rho g(h - \Delta h)) S (H - \Delta h), \quad (2)$$

звідки, враховуючи малість $(\Delta h)^2$ можна визначити значення Δh :

$$\Delta h = H \frac{\Delta\rho g h}{P_a + \Delta\rho g(h + H)}, \quad (3)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Звідки випливає, що для зменшення похибки компенсації глибини занурення компенсатора у досліджувану речовину треба брати мінімально можливі значення h і H . Так як $P_a \gg \Delta\rho g(h + H)$, при густині води $\Delta\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$, атмосферному тиску $P_a = 10^5 \text{ Па}$, глибині занурення $H = 20 \text{ мм}$ і висоті внутрішнього підняття рідини $h = 2 \text{ мм}$, то похибка від нехтування величини $(\Delta h)^2$ становить при строгому визначенні шляхом розв'язку квадратного рівняння (2) не перевищує 0,01%. Тому можна вважати, що

$$\Delta h \approx \frac{H}{500}. \quad (4)$$

Так як параметри H , h , P_a , $\Delta\rho$ і g є вхідними для процесу контролю, то величину Δh можна компенсувати розрахунковим методом, враховуючи залежність (3).

Враховуючи результати моделювання динаміки зміни капілярних поверхонь [2] при переході через максимальний перепад тиску при наявності демпферної газової ємності (рис. 3) і діапазон зміни поверхневого натягу досліджуваних розчинів

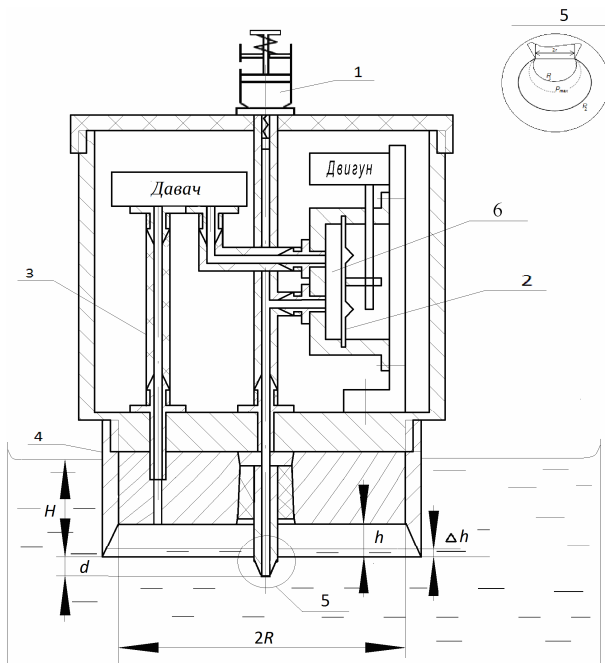
$$\sigma = (10 \div 100) 10^{-3} \text{ Н/м}, \quad (5)$$

радіус вимірювального капіляру повинен бути не меншим 0,25 мм. Для різних радіусів вимірювального капіляру r відповідні діапазони зміни капілярної сталої, приведені до радіуса капіляра, будуть такими:

$$a_r^2 = \frac{a^2}{r^2} = \frac{\sigma}{\Delta\rho g r^2}, \quad (6)$$

приведеного максимального перепаду тиску

$$P_{\max_r} = \frac{P_{\max}}{\Delta\rho g r}. \quad (7)$$



1 – механізм продувки; 2 – мембрана; 3 – з'єднувальна трубка; 4 – компенсатор гідростатичного тиску; 5 – бульбашка на торці капіляра; 6 – демпферна газова ємність

Рисунок 3 – Технічна реалізація вимірювального модуля

При $\Delta\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ і зміні σ згідно (5) a_r^2 і P_{\max_r} різних радіусів r будуть такими:

$$r = 0,25 \text{ мм}: a_r^2 = 16 \div 160, P_{\max_r} = 32,67 \div 320,7;$$

$$r = 0,5 \text{ мм}: a_r^2 = 4 \div 40, P_{\max_r} = 8,688 \div 80,67;$$

$$r = 1 \text{ мм}: a_r^2 = 1 \div 10, P_{\max_r} = 2,752 \div 20,68;$$

$$r = 2 \text{ мм}: a_r^2 = 0,25 \div 2,5, P_{\max_r} = 1,164 \div 5,702.$$

Звідки загальний діапазон зміни безрозмірних параметрів a_r^2 і P_{\max_r} відповідно будуть такими:

$$a_r^2 = 0,25 \div 160; P_{\max_r} = 1,164 \div 320,7. \quad (8)$$

Перехід від вимірюваного максимального тиску до шуканого значення динамічного поверхневого натягу здійснюється за табличною залежністю $a_r^2 = f(P_{\max_r})$, отриманої згідно методики, викладеної у роботі [2] шляхом лінійної інтерполяції цих табличних даних.

Для визначення оптимальних вузлів інтерполяції по приведеному перепаду максимального тиску P_{\max_r} , шляхом чисельного диференціювання [3] з попередньою регуляризацією методом найменших квадратів [4] табличної залежності $a_r^2 = f(P_{\max_r})$ отримані

залежності похідної $\frac{d(a_r^2)}{dP_{\max_r}}$ як функції P_{\max_r} .

Графіки залежності $\frac{d(a_r^2)}{dP_{\max_r}} = f(P_{\max_r})$, а також

залежності $a_r^2 = f(P_{\max_r})$ для зміни P_{\max_r} від 1 до 20 наведені на рис. 4, звідки видно, що тільки для значень P_{\max_r} від 1 до 8 значення похідної суттєво змінюються. Для діапазону зміни числових значень a_r^2 і P_{\max_r} згідно (6)

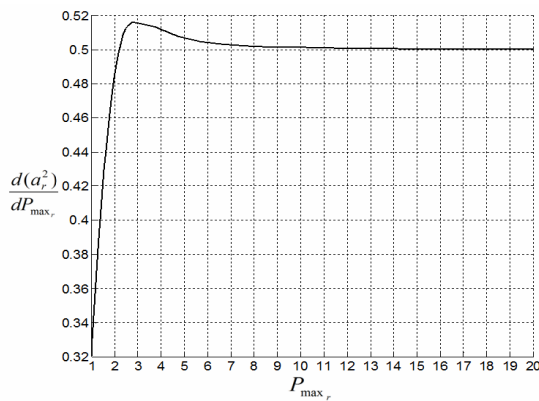
залежність похідної $\frac{d(a_r^2)}{dP_{\max_r}}$ є монотонно

спадаючою функцією P_{\max_r} , яка асимптотично прямує до 0,5. Для наочності вибіркові значення похідної $\frac{d(a_r^2)}{dP_{\max_r}}$ і числових значень a_r^2 і P_{\max_r} згідно (8) наведені у табл. 1.

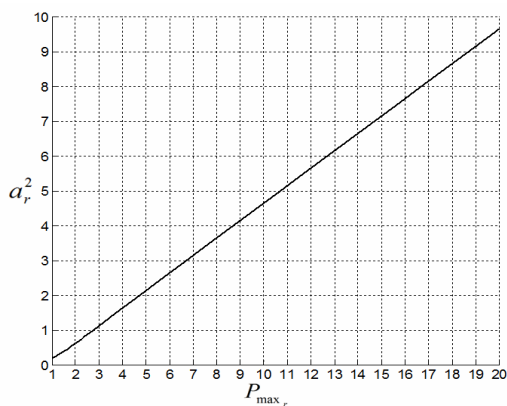
Вибір інтерполяційних вузлів здійснювався на основі дискретизації залежності похідної $\frac{d(a_r^2)}{dP_{\max_r}}$ від P_{\max_r} за критерієм заданої максимальної похибки інтерполяції.

Таблиця 1– Вибіркові значення похідної і робочих залежностей

a_r^2	0,25	1	2	3	4	6	8	10	20	40	160
P_{\max_r}	1,164	2,752	4,710	6,696	8,688	12,68	16,67	20,68	40,67	80,68	320,7
$\frac{d(a_r^2)}{dP_{\max_r}}$	0,360	0,516	0,508	0,503	0,502	0,501	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500



а)



б)

Рисунок 3 – Залежності похідної $\frac{d(a_r^2)}{dP_{\max,r}}$ (а) і a_r^2 (б) від максимального тиску $P_{\max,r}$

Проведені дослідження показали, що для отримання результатів інтерполяції з похибкою при визначенні $P_{\max,r}$ не більшою 0,001 необхідно взяти наступні інтервали дискретизації Δ по $P_{\max,r}$:

для діапазону
 $a_r^2 = 0,25 \div 1: P_{\max,r} = 2,752 \div 4,710, \Delta = 0,01;$

для діапазону
 $a_r^2 = 1 \div 2: P_{\max,r} = 2,752 \div 4,710, \Delta = 0,1;$

для діапазону
 $a_r^2 = 2 \div 3: P_{\max,r} = 4,710 \div 6,696, \Delta = 0,2;$

для діапазону
 $a_r^2 = 3 \div 4: P_{\max,r} = 6,696 \div 8,688, \Delta = 0,3;$

для діапазону
 $a_r^2 = 4 \div 6: P_{\max,r} = 8,688 \div 12,68, \Delta = 0,4;$
 для діапазону

$$a_r^2 = 6 \div 10: P_{\max,r} = 12,68 \div 20,68, \Delta = 0,5;$$

для діапазону

$$a_r^2 = 10 \div 20: P_{\max,r} = 20,68 \div 40,67, \Delta = 1,0;$$

для діапазону

$$a_r^2 > 20: P_{\max,r} > 20,68, \Delta = 10.$$

Перехід до розмірних значень P_{\max} і σ здійснюються шляхом наступних перетворень:

$$P_{\max} = P_{\max,r} \Delta \rho g r; \quad (9)$$

$$\sigma = a_r^2 \Delta \rho g r. \quad (10)$$

Всі розрахунки і дослідження проведені у програмному середовищі MATLAB [5].

ВИСНОВКИ

На базі проведених теоретичних досліджень визначені конструктивні особливості реалізації пристрою для вимірювання динамічного поверхневого натягу. Шляхом чисельного диференціювання отримана залежність похідної поверхневого натягу від максимального тиску у газовому меніску, що дає можливість визначити крок дискретизації при обробленні значень вимірюваного безрозмірного максимального тиску при лінійній інтерполяції з заданою похибкою, а також можливість подальшого дослідження методичних похибок запропонованої методики і пристрою.

1. Малько О.Г. Характеристики меніска газової бульбашки в околі максимального тиску в ній / О.Г. Малько, І.С. Кісіль, А.О. Малько // Методи та прилади контролю якості. – 2008. - №21. – С. 77-82. 2. Кісіль І.С. Дослідження процесу зміни об'єму газового меніска при вимірюванні поверхневого натягу рідин / І.С. Кісіль, А.О.Малько, // Методи та прилади контролю якості. – 2009. -№22. – С. 46-51. 3. Бакушинский А.Б. Некорректные задачи. Численные методы и приложения / А.Б. Бакушинский, А.В. Гончарский. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. – 199 с., ил. 4. Хемминг Р. В. Численные методы: для научных работников и инженеров: пер. с англ. / Р.В.Хемминг– М: Наука - 1972 - 400 с. 5. Мэтьюз. Численные методы. Использование MATLAB: 3-е издание: пер. с англ. / Мэтьюз, Г. Джонс, Финк, Д. Куртис, – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 720 с.

Поступила в редакцію 29.04.2010 р.

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