

УДК 543.31+532.612

О.С. ГОРОДЕЦЬКА, С.С.БІЛОШКУРСЬКИЙ

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ЧИСТОТИ РІДИНИ

*Вінницький національний технічний університет,
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, 21010, Україна,
тел. (0432)598-358, E-mail: biloshkursky@ukr.net*

Анотація. У статті запропоновано оптико-електронну систему контролю чистоти рідин шляхом визначення поверхневого натягу, наведені рівняння перетворення, представлена функціональна схема для визначення поверхневого натягу, проведені дослідження, в результаті яких отримані геометричні параметри менісків досліджуваних рідин та напруженості електричного поля, за якими розраховувалось значення поверхневого натягу.

Аннотация. В статье предложено оптико-электронную систему контроля чистоты жидкостей путем определения поверхностного натяжения, приведены уравнения преобразования, представлена функциональная схема для определения поверхностного натяжения, проведены исследования, в результате которых получены геометрические параметры менисков исследуемых жидкостей и напряженности электрического поля, по которым рассчитывалось значение поверхностного натяжения.

Annotation. In the article the optic-electronic control system the purity of liquid by determining surface tension has been presented, the equations transformation has been presented, diagram for determining of the surface superficial tension has been presented, and there have been made investigations, resulting the geometrical parameters of investigated liquids meniscus and the electric field has been derived, it allowed to calculate value of superficial tension.

Ключові слова: чистота рідини, поверхневий натяг, метод лежачої краплі, напруженість електричного поля, геометричні параметри меніска.

ВСТУП

Вода — найкращий розчинник з усіх відомих рідин, вона завжди вміщує в собі домішки оточуючого природного середовища. До окремої групи домішок відносяться речовини, що повністю розчиняються у воді і не затримуються ні піщаними, ні паперовими, ні іншими звичайними видами фільтрів. Вони знаходяться у воді у вигляді окремих молекул чи іонів. До даних домішок відносять поверхнево-активні речовини, широке застосування яких зумовлює їх попадання в навколишнє середовище і забруднення вод. Комунальні очисні споруди не видаляють ці речовини, а хлорування приводить їх в розряд канцерогенів, що акумулюються в організмі людини та сприяють онкологічним захворюванням [1, 2]. Розчинення у воді поверхнево-активних речовин викликає зміну поверхневого натягу, який може бути одним із основних показників якості. В зв'язку з чим, пошук нових підходів до визначення поверхневого натягу, розробка нових методів оцінки чистоти та пристроїв на їх основі залишається актуальною задачею.

Існує багато різновидів методів визначення поверхневого натягу, однак вони зводяться до невеликого числа основних принципів. Інформаційними параметрами досліджуваної рідини є геометричні, оптичні, маса, об'єм меніска, сила відриву пластинки, кільця чи петлі від поверхні рідини. Визначають такі геометричні параметри: радіус кривизни, висоту краплі, екваторіальний діаметр, діаметр „шийки”, відстань від екватора до вершини, координати точок. До оптичних параметрів відносять: показник заломлення, поглинання, розсіювання, екстинкцію, відбивання [3].

В результаті аналізу існуючих методик та засобів вимірювання поверхневого натягу рідин методом лежачої краплі встановлено, що засоби вимірювання поверхневого натягу, функціонування яких базується на фотографуванні менісків та їх проектуванні чи друці у збільшеному масштабі не забезпечують високої точності вимірювання. Те ж стосується використання мікроскопа, оскільки використання його не дозволяє автоматизувати процес вимірювання поверхневого натягу рідин та робить його втомливим для дослідника. Крім того, більшість методів базується на емпіричних та наближених залежностях, що суттєво збільшує похибки вимірювань [4]. Тому створення систем контролю

поверхневого натягу, які б забезпечували високу чутливість, точність та широкий діапазон вимірювань поверхневого натягу з використанням мікропроцесорної обробки є важливою і актуальною задачею. Одним із шляхів вирішення цієї задачі є вдосконалення існуючих методів вимірювання та розробка на їх основі оптико-електронних систем контролю параметрів рідин, які забезпечують високу швидкодію, точність і безконтактність вимірювань, а також мають ряд інших переваг.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

В зв'язку з вище наведеним, запропоновано оптико-електронну систему дослідження ступеня чистоти рідин через визначення поверхневого натягу лежачої краплі досліджуваної рідини, що знаходиться в електричному полі. Під впливом електричного поля відбувається зміна форми меніска і перехід одного з параметрів, що варіюється, через екстремум, що дозволяє збільшити чутливість, а також розширити діапазон вимірювання [5].

Так як вода є полярним діелектриком, то молекули володіють власним електричним моментом, тобто поляризовані при відсутності електричного поля, і представляють собою диполі. Всі напрямки орієнтації диполів при відсутності зовнішнього електричного поля рівномірні, а результуюча поляризація дорівнює нулю. Включення електричного поля призводить до зміни орієнтації диполів, внаслідок чого і виникає електричний дипольний момент, тобто поляризація. Таким чином крапля деформується, здобуваючи форму витягнутого (сплюсненого) сфероїда, а збільшення концентрації домішок в досліджуваній рідині супроводжується зміною поверхневого натягу, а отже, і більш або менш витягнутою формою меніска при відповідному значенні напруженості електричного поля.

При внесенні краплі в зовнішнє електричне поле потенціальна енергія краплі складається з електричної енергії та сил поверхневого натягу [6]

$$U = U_{\sigma} + U_e, \quad (1)$$

де U_{σ} – енергія сил поверхневого натягу; U_e – електрична енергія краплі в електричному полі.

Встановлено, що під впливом електричного поля енергія меніска змінюється і лежача крапля деформується, перетворюючись із сферичної у витягнуту сфероїдальну. При рості напруженості зовнішнього електричного поля відбувається локальне підсилення напруженості електричного поля у вершині сфероїдальної краплі, яке визначається діелектричною проникністю рідини, поверхневим натягом, розміром краплі та напруженістю зовнішнього поля. Крапля рідини в електричному полі стає нестійкою через домінування електричних сил над силами поверхневого натягу. Нестійкий стан характеризується розривом краплі з утворенням дочірніх крапель та різким зменшенням висоти меніска над кромкою кювети. Умовою стійкості краплі є принцип мінімальності її повної потенціальної енергії. З урахуванням електричної енергії та енергії сил поверхневого натягу узагальнена математична модель має вигляд

$$\left. \begin{aligned} U_{\sigma} &= \sigma \cdot S \cdot \left(k^{-2/3} + k^{4/3} \cdot \frac{\arctg(\sqrt{k^2 - 1})}{\sqrt{k^2 - 1}} \right) \\ U_e &= \frac{\varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot V \cdot (\varepsilon - 1)}{1 + (\varepsilon - 1) \cdot \frac{k \cdot \ln(k + \sqrt{k^2 + 1}) - \sqrt{k^2 - 1}}{(k^2 - 1)^{3/2}}} \\ \frac{\partial U}{\partial k} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де σ – поверхневий натяг рідини; S – площа поверхні краплі над кромкою кювети; k – коефіцієнт деформації $k = k_0 \cdot \frac{h}{a}$; k_0 – коефіцієнт профілю краплі; h – висота краплі над кромкою кювети; a – внутрішній радіус кювети; ε_0 – діелектрична постійна; ε – діелектрична проникність; E – напруженість електричного поля; V – об'єм краплі над кромкою кювети.

На основі (2) значення поверхневого натягу рідини можна описати рівнянням

$$\sigma = \frac{3\varepsilon_0 \cdot E^2 \cdot V \cdot D \cdot k^{\frac{5}{3}} \cdot A^3 \cdot (\varepsilon - 1)^2}{S \cdot F^2 \cdot (2A^3 - 4A^2 \cdot C \cdot k^2 - 3A \cdot k^2 + 3C \cdot k^4)}, \quad (3)$$

де

$$A = \sqrt{k^2 - 1}, \quad C = \operatorname{arctg}(\sqrt{k^2 - 1}),$$

$$F = 1 + (\varepsilon - 1) \cdot \frac{k \cdot \ln(k + \sqrt{k^2 + 1}) - A}{A^3},$$

$$D = \frac{\ln(k + \sqrt{k^2 + 1}) + k \cdot \frac{1 + k \cdot (k^2 + 1)^{\frac{1}{2}}}{k + \sqrt{k^2 + 1}} - \frac{k}{A}}{A^3} - 3 \cdot k \cdot \frac{k \cdot \ln(k + \sqrt{k^2 + 1}) - A}{A^5}.$$

Розроблена математична модель вимірювального перетворення поверхневого натягу дозволила вперше врахувати взаємозв'язок геометричних параметрів та енергії краплі в електричному полі.

Для підвищення чутливості вимірювань і вірогідності контролю поверхневого натягу пропонується безконтактний метод лежачої краплі в електричному полі. Суть методу така: лежачу краплю формують у кюветі із загостреною кромкою, під впливом електричного поля змінюють форму меніска, що супроводжується переходом висоти краплі над кромкою кювети через екстремум, поверхневий натяг розраховують через зміну геометричних параметрів краплі.

На основі описаного методу вимірювання поверхневого натягу розроблений алгоритм розрахунку поверхневого натягу на межі контакту рідина – навколишнє повітря лежачої краплі в електричному полі, суть якого полягає в тому, що:

- 1) обробляють зображення лежачої краплі;
- 2) визначають геометричні параметри меніска, для цього виконують такі кроки:

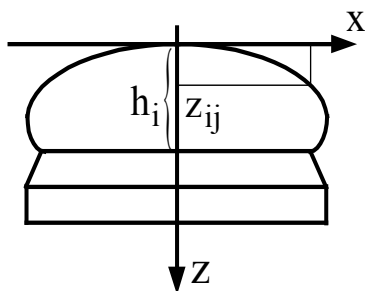


Рис. 1. Профіль лежачої краплі

2.1) профіль краплі (рис. 1) розбивають на дві симетричні відносно осі Z ділянки. В результаті оброблення зображень отримують масив координат точок контуру z_{ij} і x_{ij} кожної з частин, де $i = 1..2$ – номер ділянки, $j = 1..m$, m – кількість точок на кожній із ділянок. На основі отриманих координат $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ та $(z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{im})$ профіль кожної із ділянок описують у вигляді певної поліноміальної залежності $x_i = f_i(z)$;

2.2) розраховують об'єм та площу поверхні кожної ділянки меніска V_i та S_i .

2.3) визначають коефіцієнт деформації кожної з ділянок

$$k_i = k_0 \cdot \frac{h_i}{a}. \quad (4)$$

2.4) знаходять середнє значення \bar{V} , \bar{S} , \bar{k} .

3) на основі отриманих значень \bar{V} , \bar{S} , \bar{k} , а також попередньо визначеного значення діелектричної проникності та напруженості електричного поля, при якій настає нестійкий стан, розраховують значення поверхневого натягу σ за допомогою залежності (3).

Розроблено функціональну схему мікропроцесорного блоку керування напругою та синхронізації роботи з фотокамерою (рис. 2). Кювету з досліджуваною рідиною розміщують на нижньому електроді. На електроди подається напруга, яка формується блоком керування напругою і покроково зростає. Збільшення напруженості призводить до зміни форми меніска, що супроводжується зростанням висоти краплі h . Подальше підсилення напруженості викликає розрив краплі з утворенням дочірніх крапель, що характеризує нестійкий стан меніска. При цьому спостерігається різке зменшення висоти, так, при $E_4 > E_3$ відповідно $h_4 < h_3$.

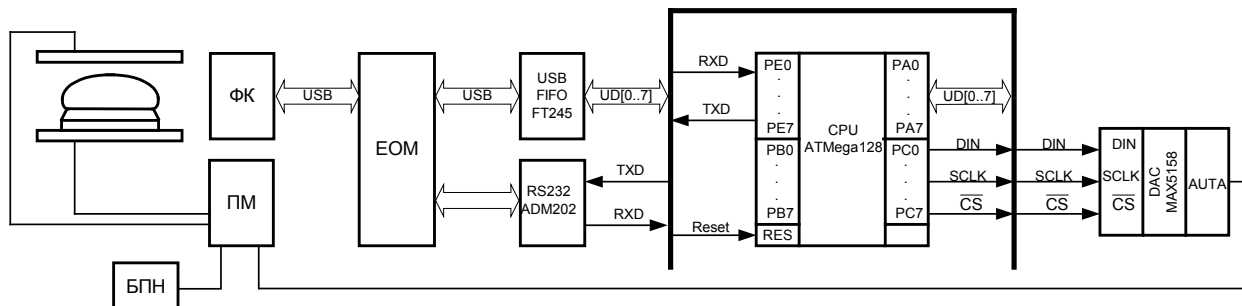


Рис. 2. Функціональна схема мікропроцесорного блоку керування напругою та синхронізації роботи з фотокамерою

При кожному кроці зміни напруги, що подається на електроди, фотокамерою ФК реєструють зображення досліджуваної краплі, яка оцифровує зображення, що передається на EOM по USB інтерфейсу. EOM здійснює первинну обробку вимірювальної інформації, її збереження в пам'яті та по USB інтерфейсу, реалізованому на базі мікросхеми FT245BM, активізує роботу мікропроцесора ATmega128, який здійснює керування подачею напруги та синхронізує роботу фотокамери з переходом краплі в стаціонарний стан при зміні напруги на один квант. Мікропроцесор формує код, що двоканальним ЦАП MAX 5158 перетворюється у вихідну напругу, яка подається на суматор і помножувач.

Для проведення досліджень розроблений експериментальний зразок оптико-електронного пристрою. Для проведення експерименту використовувались дистильована, водопровідна вода та розчини NaCl концентрацією від 1% до 25%. В результаті чого були отримані геометричні параметри крапель при різних значеннях напруженості електричного поля, відеообрази яких представлені на рис. 3. На рис. 3а наведена крапля 5% розчину NaCl, що знаходиться в стані спокою при відсутності електричного поля, та 3б, 3в — при наявності електричного поля. З рис. 3 видно, що при розміщенні краплі досліджуваної рідини у електричне поле відбувається поляризація молекул і лежача крапля деформується, перетворюючись у витягнуту сфероїдальну краплю [27].

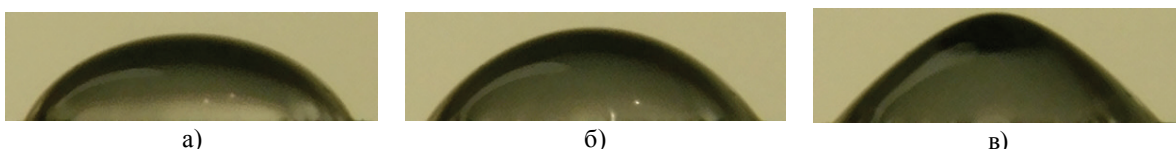


Рис. 3. Деформація краплі 5% розчину NaCl при збільшенні напруженості електричного поля: а) при відсутності напруженості, б) при напруженості $E=640$ кВ/м, в) $E=690$ кВ/м

Ступінь деформації краплі, витягненості, характеризує висота краплі h . На рис. 4 наведена теоретична та експериментальна залежності поверхневого натягу від висоти краплі. Як видно з рис. 4 відхилення експериментальної залежності від теоретичної не перевищує 6%, що дає можливість зробити висновок про високу збіжність проведених результатів досліджень.

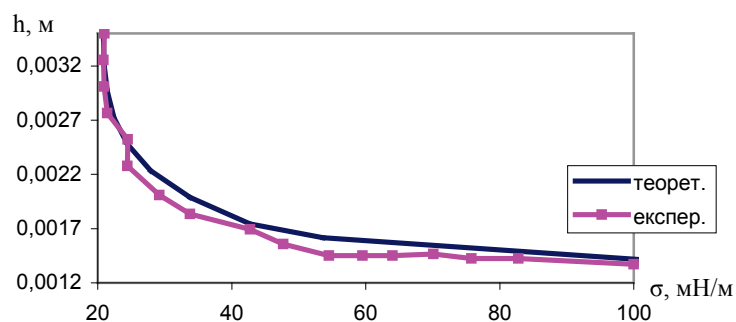


Рис. 4. Теоретична та експериментальна залежності висоти краплі від поверхневого натягу

Подальше збільшення напруженості електричного поля призводить до нестійкого стану зарядженої краплі. При цьому величина напруженості нестійкого стану залежить від характеристик рідини краплі. На рис. 5 наведена залежність напруженості нестійкого стану від концентрації для розчину NaCl [7].

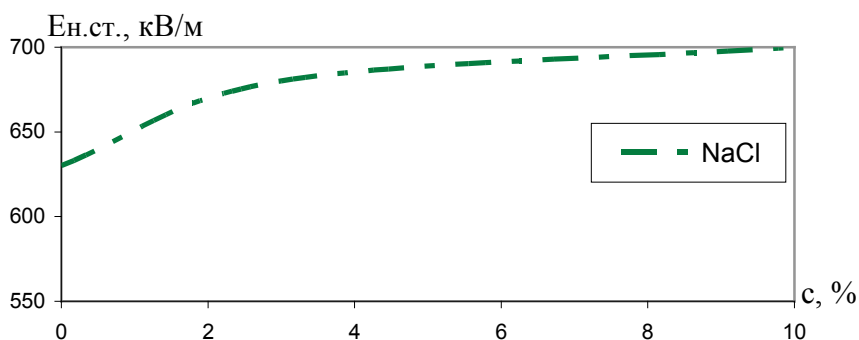


Рис. 5. Залежність напруженості нестійкого стану розчинів від концентрації

З рис. 5 видно, що із збільшенням поверхневого натягу (збільшення концентрації NaCl) напруженість нестійкого стану збільшується.

На рис. 6 наведені теоретичні [8] та експериментальні залежності поверхневого натягу від концентрації для розчину NaCl.

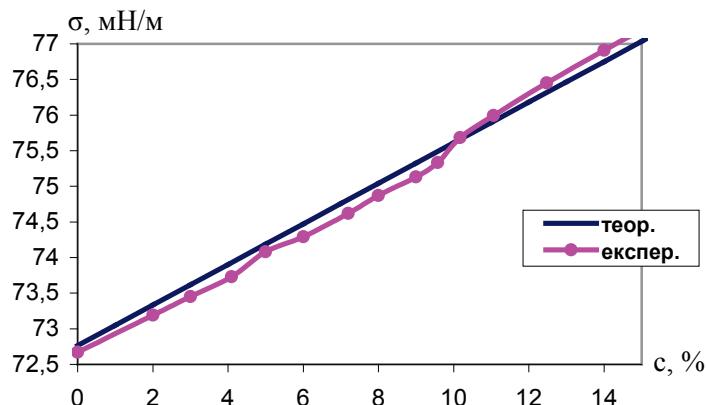


Рис. 6. Теоретичні та експериментальні залежності поверхневого натягу від концентрації NaCl

Як видно з рис. 6 відхилення експериментальної залежності від теоретичної не перевищує 6 %.

ВИСНОВКИ

Вимірювання поверхневого натягу дозволяє встановити чистоту рідини, оскільки наявність катіонів, аніонів та поверхнево-активних речовин має вплив на значення цього параметру. В статті наведені залежності поверхневого натягу від геометричних параметрів краплі, що знаходиться в електричному полі. Розроблена експериментальна установка для знаходження поверхневого натягу. Проведені дослідження, для яких використовувалась дистильована вода та різні концентрації розчинів NaCl. Отримані експериментальні залежності зміни висоти менісків від концентрації розчинів. Експериментальні залежності показують, що при збільшенні концентрації домішок NaCl напруженість нестійкого стану збільшується, а отже, поверхневий натяг збільшується, що підтверджується теоретичними даними, оскільки NaCl є поверхнево-інертною речовиною відносно води. Здійснено порівняння теоретичної та експериментальної кривих залежності поверхневого натягу від концентрації розчинів NaCl. Встановлено, що відхилення експериментальної залежності від теоретичної не перевищує 6 %, що дає можливість зробити висновок про високу збіжність проведених результатів досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Запольський А.К. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: Підручник / А.К. Запольський, Н.А. Мішкова-Клименко, І.М. Астрелін та ін. – К.: Лібра, 2000. – 552 с.
2. Семиохин І.А. Физическая химия: Учебник. / І.А. Семиохин – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 272 с.
3. Ляликов Ю.С. Физико-химические методы анализа / Ю.С. Ляликов – М.: Химия, 1974. – 536 с.
4. Абрамзон А.А. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества: Справочник / [А.А. Абрамзон, Л.Е. Боброва, Л.П. Зайченко и др.]; под ред. А.А. Абрамзона, Е.Д. Щукина. – Л.: Химия, 1984. – 392с.

5. Городецька О.С. Експериментальне дослідження чистоти рідини за показником поверхневого натягу / О.С. Городецька, Й.Й. Білінський, П.М. Ратушний // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – Ч.1. Т.2. – С. 241–244.
6. Григорьев А.И. Критическая равновесная сфероидальная деформация капли диэлектрической жидкости в однородном электростатическом поле / А. И. Григорьев, С.И. Щукин // Журнал технической физики, 1999, том 69, вып. 7. – С. 23-28.
7. Городецька О.С. Дослідження чистоти рідини в електростатичному полі / О.С. Городецька, Й.Й. Білінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2005. – №6. – С. 47–50.
8. Адамсон А.В. Физическая химия поверхностей. / А.В. Адамсон, под ред. З.М. Зорина, В.М. Муллера. – М.: Мир, 1979. – 568 с.

Надійшла до редакції 27.10.2010р.

ГОРОДЕЦЬКА ОКСАНА СТЕПАНІВНА — к.т.н., доцент кафедри телекомунікаційних систем і телебачення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

БЛОШКУРСЬКИЙ СЕРГІЙ СТЕПАНОВИЧ — студент кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.