

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РІДИН В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ

Проведено дослідження діелектричної рідини в електростатичному полі. Запропоновано новий підхід контролю чистоти рідин шляхом визначення поверхневого натягу. Розроблено структурну схему пристрою та експериментальну установку для визначення поверхневого натягу. Проведено дослідження, для яких використовувались дистильована вода та різні концентрації розчинів NaCl та етилового спирту. В результаті проведення експерименту отримано геометричні параметри менісків досліджуваних рідин та напруженість електростатичного поля, за якими розраховувалось значення поверхневого натягу рідини.

Вступ

Для виконання аналізів в промисловості, медицині, біології, сільському господарстві, системах охорони навколишнього середовища виникає необхідність в аналізаторах якості рідин. Для дослідження рідин, в тому числі і діелектричних, широко розповсюджені електрохімічні методи, які поділяються на три групи у відповідності процесами, які в них протікають [1]:

- на реакціях, які відбуваються на електродах під дією струму (електроліз, електрогравіметрія, кулонометрія, вольтамперометрія);
- на реакціях, які відбуваються на електродах за відсутності струму (потенціометрія);
- без протікання електродної реакції (кондуктометрія, осцилометрія).

Однією з найрозповсюдженіших діелектричних рідин є вода, яка викликає дисоціацію електролітів, бере безпосередню участь в гідролітичному розпаді речовин, реакціях гідратації та в багатьох інших фізико-хімічних процесах. Введення солей і поява серед молекул води заряджених частинок — іонів змінює порядок і структуру рідини в тим більшій мірі, чим вища концентрація розчину. Крім того, розчинення у воді різних домішок викликає зміну поверхневого натягу, який може бути одним із основних показників якості. В зв'язку з цим, пошук нових підходів до визначення поверхневого натягу, розробка нових методів оцінки чистоти рідини та пристроїв на їх основі, підвищення їх точності і покращення експлуатаційних характеристик залишається актуальною науково-технічною задачею.

Існують різні методи визначення поверхневого натягу: метод підняття в капілярі, пластинки, що втягується, висячої та лежачої краплі, відриву кільця, підрахунку крапель, максимального тиску пухирця, осцилюючого струменя, капілярних хвиль на поверхні поділу фаз і т. д. Однак більшість цих методів існує лише у вигляді експериментальних установок і не може широко застосовуватись на практиці в зв'язку зі складністю системи дослідження.

Основна частина

В роботі розглядається метод лежачої краплі, який полягає у визначенні геометричних параметрів краплі, сформованої з досліджуваної рідини [2, 3]. Кювета з рідиною розміщується у електростатичному полі, під дією якого відбувається ріст меніска і сферична крапля перетворюється у витягнутий сфероїд.

Оскільки вода є полярним діелектриком, то молекули мають власний електричний момент, тобто поляризовані за відсутності електричного поля, і представляють собою диполі. Всі напрямки орієнтації диполів за відсутності зовнішнього електричного поля рівноймовірні, а результуюча поляризація дорівнює нулю. Включення електричного поля призводить до зміни орієнтації диполів, внаслідок чого і виникає електричний дипольний момент, тобто поляризація [4]. 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 електростатичного поля.

Потенціальна енергія краплі в електростатичному полі E складається з енергії сил поверхневого натягу та електростатичної енергії краплі в полі E .

Енергія сил поверхневого натягу витягнутої сфероїдальної краплі записується у вигляді [5]

$$U_{\sigma} = 2\pi\sigma R^2 \left(k^{-2/3} + k^{4/3} \frac{\arctg(\sqrt{k^2 - 1})}{\sqrt{k^2 - 1}} \right), \quad (1)$$

де R — радіус сферичної краплі, рівної за об'ємом сфероїду, що розглядається; σ — коефіцієнт поверхневого натягу; $k = a/b$, a і b — більша та менша півосі витягнутого сфероїда відповідно.

Електростатична енергія діелектричного сфероїда, витягнутого вздовж зовнішнього однорідного електростатичного поля E описується виразом [6]

$$U_e = -\frac{1}{2}EP_x = \frac{2\pi\epsilon_0 E^2 R^3 (\epsilon - 1)}{3[1 + (\epsilon - 1)n_x]}, \quad (2)$$

де P_x — дипольний момент сфероїда; ϵ_0 — діелектрична стала; n_x — коефіцієнт деполізації сфероїда, який залежить від форми (але не від розмірів сфероїда), що має вигляд

$$n_x = \frac{k \ln \left(k + \sqrt{k^2 + 1} \right) - \sqrt{k^2 - 1}}{(k^2 - 1)^{3/2}}. \quad (3)$$

Потенціальна енергія рівновеликої сферичної краплі складається з енергії сил поверхневого натягу сферичної краплі [3]

$$U_{\sigma s} = 4\pi R^2 \sigma, \quad (4)$$

та електростатичної енергії діелектричної сфери в полі E

$$U_{es} = -\frac{2\pi R^3 E^2 \epsilon_0 (\epsilon - 1)}{4 + \epsilon}. \quad (5)$$

Потенціальну енергію сфероїдальної краплі подамо у вигляді безрозмірної величини, віднісши її до енергії краплі сферичної,

$$U = \left\{ 2\pi \left[\frac{1}{k^{2/3}} + \frac{k^{4/3} \arctg(\sqrt{k^2 - 1})}{\sqrt{k^2 - 1}} \right] - \frac{W(\epsilon - 1)}{1 + (\epsilon - 1)n_x} \right\} \left[4\pi - \frac{W(\epsilon - 1)}{2(2 + \epsilon)} \right]^{-1}, \quad (6)$$

де W — безрозмірний параметр Тейлора [3], який характеризує стійкість краплі в полі E і є функцією напруженості зовнішнього електростатичного поля E , радіуса R та коефіцієнта ПН рідини краплі σ

$$W = \frac{4\pi\epsilon_0 E^2 R}{\sigma}. \quad (7)$$

На рис. 1 зображена залежність $U = U(k)$ для дистильованої води, розрахована чисельно за (6) для різних значень параметра Тейлора ($R1 = 3,99 \cdot 10^{-3}$ м, $R2 = 3,92 \cdot 10^{-3}$ м, $R3 = 3,91 \cdot 10^{-3}$ м, $E1 = 444444,44$ В/м, $E2 = 611111,11$ В/м, $E3 = 666666,67$ В/м).

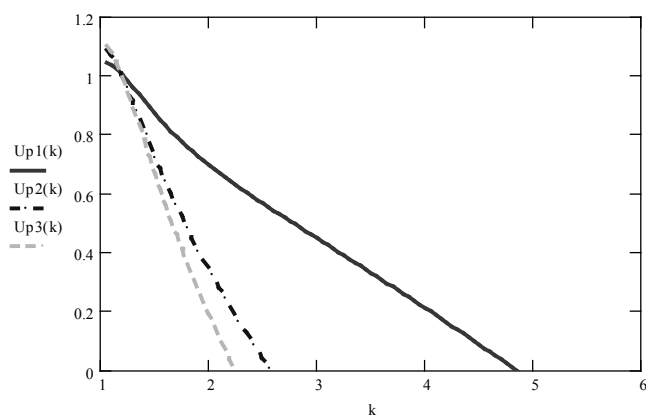


Рис. 1. Залежність безрозмірної енергії краплі дистильованої води в електростатичному полі від k : $W_1 = 1,22$ (1), $W_2 = 2,26$ (2), $W_3 = 2,68$ (3)

Як показують розрахунки і видно з рис. 1 зростання напруженості електростатичного поля супроводжується збільшенням ступеня деформації сфероїда (зменшенням k), що приводить до росту потенціальної енергії краплі. Більша чутливість відповідає малим значенням k .

Зв'язок рівноважної сфероїдальної деформації краплі з величиною параметра Тейлора W може бути знайдений з вимоги мінімальності повної потенціальної енергії краплі в рівноважному стані

$$\frac{\partial U}{\partial k} = 0. \tag{8}$$

Підставляючи (6) в (8) і аналітично розв'язуючи отримане рівняння відносно W , отримаємо

$$W = \frac{-2}{3} \pi D^2 \frac{2A^3 - 4k^2 CA^2 - 3k^2 A + 3k^4 C}{A^4 k^{5/3} (-3kA + 2Bk^2 + B)}, \quad A = \sqrt{k^2 - 1};$$

$$B = \ln\left(k + \sqrt{k^2 - 1}\right); \quad C = \arctg\left(\sqrt{k^2 - 1}\right); \quad D = \frac{(k^2 - \epsilon)\sqrt{k^2 - 1}}{\epsilon - 1} + k \ln\left(k + \sqrt{k^2 - 1}\right). \tag{9}$$

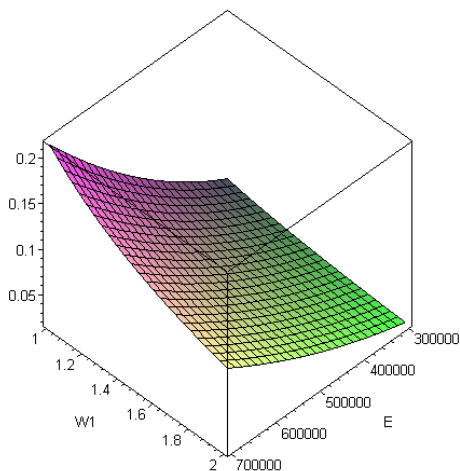


Рис. 2. Залежність поверхневого натягу від параметра Тейлора та напруженості електростатичного поля

На рис. 2 показана залежність поверхневого натягу у вигляді тривимірної поверхні від параметра Тейлора та напруженості електростатичного поля. З характеристики видно, що для визначення поверхневого натягу води ($\sigma = 72 \cdot 10^{-3}$ Н/м) напруженість електростатичного поля E повинна бути в діапазоні 350...600 кВ/м, а параметр Тейлора — в діапазоні 2...3.

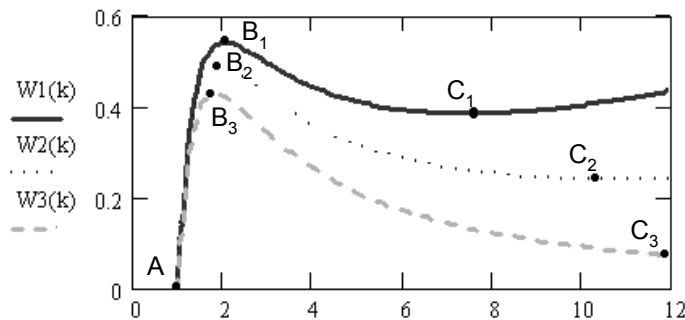


Рис. 3. Залежність $W(k)$ для $\epsilon = 46$ (1), $\epsilon = 81$ (2), $\epsilon = \infty$ (3)

На рис. 3 проілюстровано результати розрахунків за рівнянням (9) для різних значень діелектричної проникності ϵ . Як показує розрахунок, рівноважні стани сфероїдальних крапель спостерігаються до деякого критичного значення параметра Тейлора $W = W^*$ (позначеного на рис. 3 точками B_1 — B_3), яке залежить від діелектричної проникності речовини краплі. Зі збільшенням діелектричної проникності критичне значення W^* зменшується і для $\epsilon \rightarrow \infty$ досягає мінімального значення. Ділянки A — B_n на рис. 3 відповідають рівноважним сфероїдальним формам крапель. Ділянки B_n — C_n відповідають локальним максимумам потенціальної енергії краплі при її сфероїдальній деформації. Значення параметра Тейлора, що відповідає точкам C_1 — C_3 , визначає виникнення другого мінімуму на залежності $U = U(k)$.

Наявність «потенціального бар'єра» перешкоджає спонтанному подовженню та руйнуванню краплі для значень параметра Тейлора $W < W_*$. Для $W = W_*$ в силу неперервності залежності потенціальної енергії від величини сфероїдальної деформації висота потенціального бар'єра дорівнює нулю, тому крапля в разі досягнення цього стану починає спонтанно (мимоволі) видовжуватись, причому амплітуда сфероїдальної деформації наростає у часі набагато швидше, ніж за експоненціальним законом. Використовуючи загально прийняту термінологію, стани, що відповідають ділянці графіка АВ, назвемо докритичними, значення параметра Тейлора $W = W_*$ — критичними, а стани, що відповідають ділянці графіка за точкою С, — закритичними.

Для визначення поверхневого натягу в електростатичному полі розроблений пристрій, структурна схема якого містить електроди, закріплені в основі, між якими розміщується кювета з досліджуваною рідиною. Електростатичне поле між електродами приводить до зміни форми меніска, яка реєструється за допомогою фотокамери та передається в блок обробки інформації, де розраховується значення поверхневого натягу.

Для проведення досліджень чистоти рідини за показником поверхневого натягу в електростатичному полі розроблена експериментальна установка. Досліджувана рідина розташовувалась в кюветі, яка розміщувалась на нижньому електроді. Електроди виконані у вигляді пластинок зі скла з нанесеним на верхню та нижню стінки провідним шаром та закріплені у штативі паралельно один одному. Штатив забезпечує можливість вертикального переміщення електродів та містить шкалу, яка дозволяє вимірювати відстань між електродами. Електроди з кюветою знаходяться у вакуумі, який створювався вакуумним насосом 2НВР-5ДМ з двигуном потужністю $0,55 \times 1500$ кВт·об/хв. Граничний залишковий тиск, що створювався насосом, $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Між електродами створювалось однорідне електростатичне поле джерелом живлення ТЕС-88 $U_{\text{вих}} = 30$ В, $I_{\text{вх}} = 2$ А та помножувачем, який дозволяє підсилити вихідну напругу від 8 до 12 кВ. Створене електростатичне поле направлене перпендикулярно площині електродів і паралельно осі симетрії меніска. Реєстрація зображення краплі здійснювалась фотокамерою Olympus D-560 Zoom з роздільною здатністю 3,2 мегапікселя, яка розміщувалась на штативі, та оптична вісь якої перпендикулярна осі симетрії краплі. Обробка відеозображення здійснювалась персональним комп'ютером CPU Intel Celeron 2,0 ГГц, CDRAM 128 МБайт.

Для проведення експерименту використовувались дистильована вода, розчини NaCl та етилового спирту концентрацію від 1 % до 25 %, в результаті чого були отримані геометричні параметри крапель, зокрема, радіус кривизни поверхні для різних значень напруженості електростатичного поля, а також площа поверхні даних крапель. Залежність зміни площі від концентрації для різних значень напруженості електростатичного поля, характеристики якої показані на рис. 4, 5, є найінформативнішою. Для напруженості електростатичного поля в області 400...450 кВ/м характеристика є лінійною. Даний діапазон був вибраний для подальших досліджень, оскільки в разі збільшення напруженості електростатичного поля поверхня краплі переходить в нестійкий стан, в якому відбувається розрив поверхні краплі, що приводить до утворення дочірніх крапель.

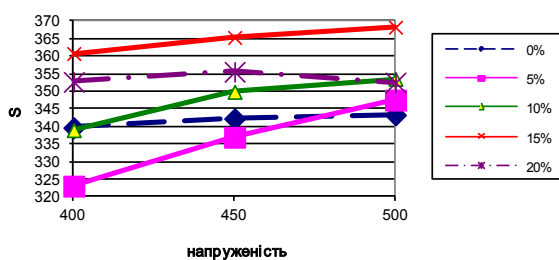


Рис. 4. Залежність площі поверхні краплі від напруженості електростатичного поля для різної концентрації рідини

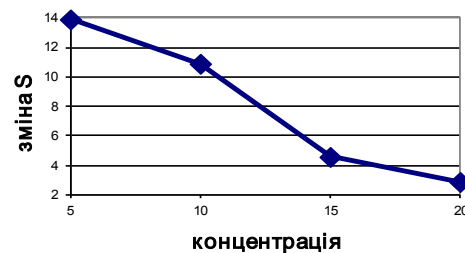


Рис. 5. Залежність зміни площі поверхні краплі від концентрації рідини

Таким чином, в результаті проведення експерименту, однозначно фіксуються параметри напруженості електростатичного поля і геометричні параметри меніска досліджуваної рідини, що дозволяє провести розрахунок згідно з формулами (1)—(7) для дистильованої води та 25 % розчину NaCl ($\varepsilon = 81$, $R1 = 3,91 \cdot 10^{-3}$ м, $R2 = 1,29 \cdot 10^{-3}$ м, $k = a/b$, де a — радіус внутрішньої частини кювети, $a = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, b — висота меніска над кюветою, $k1 = 1,16$; $k2 = 2,87$; $S1 = 343 \cdot 10^{-6}$ м², $S2 = 352 \cdot 10^{-6}$ м²; $E = 600$ кВ/м). Отримані результати занесені до таблиці.

Знаходження параметрів повної потенціальної енергії краплі

Параметр	Значення	
	Дистильована вода	25 % розчин NaCl
Енергія сил поверхневого натягу витягнутої сфероїдальної краплі	$U_{\sigma} = 1,39 \cdot 10^{-5}$	$U_{\sigma} = 1,86 \cdot 10^{-6}$
Коефіцієнт деполаризації	$n_x = 2,76$	$n_x = 0,12$
Електростатична енергія діелектричної витягнутої сфероїдальної краплі	$U_e = 1,78 \cdot 10^{-7}$	$U_e = 1,31 \cdot 10^{-7}$
Енергії сил поверхневого натягу сферичної краплі	$U_{\sigma s} = 1,38 \cdot 10^{-5}$	$U_{\sigma s} = 1,59 \cdot 10^{-6}$
Електростатична енергія сферичної краплі	$U_{es} = 6,62 \cdot 10^{-7}$	$U_{es} = 6,62 \cdot 10^{-7}$
Параметр Тейлора	$W = 2,68$	$W = 0,84$
Повна потенціальна енергія	$U = 1,033$	$U = 0,699$
Поверхневий натяг	$\sigma = 0,73$	$\sigma = 0,78$

Висновок

Вимірювання поверхневого натягу еталонної та досліджуваної рідин, який визначається через геометричні параметри меніска за певного значення напруженості електростатичного поля, дозволяє встановити ступінь чистоти рідин. В проведеному дослідженні встановлено, що залежність потенціальної енергії ізольованої краплі з діелектричною проникністю ϵ в однорідному електростатичному полі від величини сфероїдальної деформації $U = U(k)$ залежить як від ϵ , так і від напруженості електростатичного поля E чи параметра Тейлора $W \sim E^2$, який характеризує стійкість поверхні краплі по відношенню до індукованого на ній заряду. Аналіз залежності $W = W(k, \epsilon)$ дозволив виділити ділянки значень k, ϵ , що відповідають рівноважним сфероїдальним формам крапель, і критичні умови втрати стійкості. Розроблена експериментальна установка для визначення ступеня чистоти рідин, проведені дослідження, для яких використовувались дистильована вода та різні концентрації розчинів NaCl та етилового спирту. В результаті проведення експерименту отримані параметри напруженості електростатичного поля та геометричні параметри менісків досліджуваних рідин, за якими розраховувалось значення поверхневого натягу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ляликов Ю. С. Физико-химические методы анализа. — М.: Химия, 1974. — 536 с.
2. Городецька О. С. Білинський Й. Й. Нові підходи в автоматизації визначення поверхневого натягу рідин // Вісник Технологічного університету Поділля. — 2004. — Т. 3. — С. 117—120.
3. Пат. 71576 С2. Україна, МПК G 01 N 13/02. Оптико-електронний вимірювач поверхневого натягу рідини / Білинський Й. Й., Білошкурська О. С., Сіренко С. О., ВНТУ, № 2001042381; Заявл. 10.04.2001; Опубл. 15.12.2004, Бюл. № 12.
4. Возная А. Ф. Химия воды и микробиология. — М.: Высшая школа, 1967. — 324 с.
5. Григорьев А. И., Шукин С. И. Критическая равновесная сфероидальная деформация капли диэлектрической жидкости в однородном электростатическом поле // Журнал технической физики. — 1999. — Т. 69, вып. 7. — С. 23—28.
6. Григорьев А. И., Шукин С. И. Локальное увеличение напряженности однородного электростатического поля вблизи вершины сфероидальной капли // Журнал технической физики. — 1999. — Т. 69, вып. 8. — С. 49—54.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (2—5. 07.05)

Надійшла до редакції 11.07.05
Рекомендована до друку 21.07.05

Городецька Оксана Степанівна — аспірант кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури.

Вінницький національний технічний університет