

УДК665.2/3.067.7

ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СУСПЕНЗІЙ

Назаренко І.П., к.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел. (0619) 43-54-32

Анотація - представлені результати експериментального визначення питомої електропровідності та діелектричної проникності дисперсної фази та дисперсійного середовища діелектричних суспензій методом зустрічно обертових електричних полів.

Ключові слова – діелектрична суспензія, електрод, частота, обертове електричне поле, електропровідність, діелектрична проникність.

Постановка проблеми. Інформація про електрофізичні властивості різноманітних речовин є важливою для визначення технологічних і технічних параметрів пристроїв в яких використовується силова дія електричного поля на продукт обробки. До таких пристроїв відносяться електросепаратори діелектричних суспензій. Визначення діелектричної проникності та питомої електропровідності як дисперсної фази так і дисперсійного середовища суспензії дозволяє зробити висновки про доцільність використання електричних методів очистки та сепарації таких рідин і розраховувати конструктивні параметри електросепараторів. В довідковій літературі, в основному, присутні відомості про електрофізичні властивості чистих неорганічних рідких та твердих речовин. Складні речовини органічного походження такі як рослинні олії, жири, біопалива та інші мають індивідуальні особливості, які до того ж змінюються з часом. Тому часто виникає потреба вимірювання діелектричної проникності та питомої електропровідності складових суспензії на етапі визначення параметрів електричної обробки, що забезпечують високу ефективність роботи пристроїв сепарації. До таких параметрів відноситься напруга на електродах та частота змінного струму [1,2].

Вимірювання електрофізичних характеристик частинок дисперсної фази суспензії відомими методами потребує їх вилучення з дисперсійного середовища. Вилучення таких частинок призводить до зміни їх стану і як наслідок до похибок при вимірюванні їх електрофізичних властивостей стандартними методами.

Таким чином розробка методів та технічних засобів визначення

електрофізичних властивостей дисперсійного середовища та дисперсної фази безпосередню в суспензії є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Стандартні методи вимірювання питомої електропровідності полягають у вимірюванні струму, що тече скрізь зразок матеріалу з простою конфігурацією електричного поля. Для підвищення точності використовують мости змінного струму. При таких вимірах виникають значні труднощі при виборі конструкції вимірювальної кювети, урахуванні поверхневих струмів для матеріалів з малою питомою електропровідністю. Урахування неоднорідної структури твердих матеріалів тощо. Діелектрична проникність вимірюється методом балістичного гальванометра, мостовими, резонансними та оптичними методами в залежності від частоти струму [3].

Такі виміри потребують вилучення дисперсної фази з дисперсійного середовища.

В обертовому електричному полі на дисперсні частинки, що відрізняються від середовища за своїми електрофізичними властивостями, діє момент сили, яка залежить від діелектричної проникності рідини і частинки та їх питомої електропровідності [4]

$$M = 4\pi\epsilon_c a^3 E^2 \frac{(\epsilon_{\text{ч}} - \epsilon_c) \left(\frac{\sigma_{\text{ч}}}{\omega} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega} \right) - (\epsilon_{\text{ч}} + 2\epsilon_c) \left(\frac{\sigma_{\text{ч}}}{\omega} - \frac{\sigma_c}{\omega} \right)}{(\epsilon_{\text{ч}} + 2\epsilon_c)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{ч}}}{\omega} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega} \right)^2}, \quad (1)$$

де a – радіус частинки, м;

ω – кутова частота, рад/с;

$\epsilon_{\text{ч}}$ – діелектрична проникність частинки, Ф/м;

ϵ_c – діелектрична проникність середовища, Ф/м;

$\sigma_{\text{ч}}$ – питома електропровідність частинки, См/м;

σ_c – питома електропровідність середовища, См/м;

E – напруженість електричного поля, В/м.

Вигляд залежності $M=f(\omega)$ дає можливість зробити висновок про можливість визначення параметрів функції, що визначається формулою (1) за значеннями вимірюваних моментів сили або за їх відношеннями.

Формулювання цілей статті. Робота направлена на подальший розвиток методів визначення електрофізичних властивостей слабопровідних суспензій з використанням обертового електричного поля.

Основна частина. Вимірювання моменту сили, що діє на зважені частинки суспензії в обертовому електричному полі є доволі складною задачею у зв'язку з малими розмірами частинок. Також при цьому виникають похибки пов'язані з визначенням розміру частинки та напруженості електричного поля. Для усунення цих ускладнень про-

понується визначати електрофізичні параметри суспензії за результатами вимірювання кутової частоти, що відповідає екстремальній точці залежності (1).

Дослідження функції (1) на екстремум приводить до наступного співвідношення

$$\omega = \frac{\sigma_{\text{ч}} + 2\sigma_{\text{с}}}{\varepsilon_{\text{ч}} + 2\varepsilon_{\text{с}}}, \quad (2)$$

де ω - кутова частота в екстремальній точці, рад/с;
 $\sigma_{\text{ч}}$ - питома електропровідність частинки, См/м;
 $\sigma_{\text{с}}$ - питома електропровідність середовища, См/м;
 $\varepsilon_{\text{ч}}$ - діелектрична проникність частинки, Ф/м;
 $\varepsilon_{\text{с}}$ - діелектрична проникність середовища, Ф/м.

Якщо в рідину помістити кулю з відомими властивостями $\sigma_{\text{ч1}}, \varepsilon_{\text{ч1}}$, та провести вимірювання кутової частоти $\omega_{\text{Б1}}$ в екстремальній точці, то у рівнянні (1) остаються невідомими 2 параметри: $\sigma_{\text{с1}}$ та $\varepsilon_{\text{с1}}$.

Для визначення невідомих параметрів потрібно скласти додаткове рівняння. Воно може бути отримане, якщо в цю ж рідину помістити іншу кулю з відомими параметрами $\sigma_{\text{ч2}}, \varepsilon_{\text{ч2}}$ і виміряти кутову частоти $\omega_{\text{Б2}}$ у відповідній екстремальній точці. Тоді можна записати систему рівнянь:

$$\begin{cases} \omega_{\text{Б1}} = \frac{\sigma_{\text{ч1}} + 2\sigma_{\text{с1}}}{\varepsilon_{\text{ч1}} + 2\varepsilon_{\text{с1}}}, \\ \omega_{\text{Б2}} = \frac{\sigma_{\text{ч2}} + 2\sigma_{\text{с1}}}{\varepsilon_{\text{ч2}} + 2\varepsilon_{\text{с1}}}. \end{cases} \quad (3)$$

Рішення цієї системи:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{с1}} = \frac{\sigma_{\text{ч1}} + \varepsilon_{\text{ч2}}\omega_{\text{Б2}} - \sigma_{\text{ч2}} - \varepsilon_{\text{ч1}}\omega_{\text{Б1}}}{2(\omega_{\text{Б1}} - \omega_{\text{Б2}})}, \\ \sigma_{\text{с1}} = \frac{\varepsilon_{\text{ч1}}\omega_{\text{Б1}}}{2} + \frac{(\sigma_{\text{ч1}} + \varepsilon_{\text{ч2}}\omega_{\text{Б2}} - \sigma_{\text{ч2}} - \varepsilon_{\text{ч1}}\omega_{\text{Б1}})\omega_{\text{Б1}}}{2(\omega_{\text{Б1}} - \omega_{\text{Б2}})} - \frac{\sigma_{\text{ч1}}}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

Якщо кулі помістити в рідину з іншими невідомими електрофізичними характеристиками: $\varepsilon_{\text{с2}}$ та $\sigma_{\text{с2}}$, то їх значення можна розрахувати за формулами:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{с2}} = \frac{\sigma_{\text{ч1}} + \varepsilon_{\text{ч2}}\omega'_{\text{Б2}} - \sigma_{\text{ч2}} - \varepsilon_{\text{ч1}}\omega'_{\text{Б1}}}{2(\omega'_{\text{Б1}} - \omega'_{\text{Б2}})}, \\ \sigma_{\text{с2}} = \frac{\varepsilon_{\text{ч1}}\omega'_{\text{Б1}}}{2} + \frac{(\sigma_{\text{ч1}} + \varepsilon_{\text{ч2}}\omega'_{\text{Б2}} - \sigma_{\text{ч2}} - \varepsilon_{\text{ч1}}\omega'_{\text{Б1}})\omega'_{\text{Б1}}}{2(\omega'_{\text{Б1}} - \omega'_{\text{Б2}})} - \frac{\sigma_{\text{ч1}}}{2}, \end{cases} \quad (5)$$

де $\omega'_{Б1}$ - кутова частота в екстремальній точці для кулі з характеристиками $\varepsilon_{ч1}, \sigma_{ч1}$, що знаходиться в рідині з характеристиками $\varepsilon_{с2}, \sigma_{с2}$;
 $\omega'_{Б2}$ - кутова частота в екстремальній точці для кулі з характеристиками $\varepsilon_{ч2}, \sigma_{ч2}$, що знаходиться в рідині з характеристиками $\varepsilon_{с2}, \sigma_{с2}$.

Таким чином метод двох куль дозволяє виміряти електрофізичні характеристики дисперсійного середовища в двох суспензіях. Отримана інформація надає можливість визначити електрофізичні характеристики речовини дисперсної фази $\varepsilon_{ч}, \sigma_{ч}$. Для цього складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{\sigma_{ч} + 2\sigma_{с1}}{\varepsilon_{ч} + 2\varepsilon_{с1}}, \\ \omega_2 = \frac{\sigma_{ч} + 2\sigma_{с2}}{\varepsilon_{ч} + 2\varepsilon_{с2}}. \end{cases} \quad (6)$$

рішення якої записується у вигляді:

$$\begin{cases} \varepsilon_{ч} = \frac{\lambda(\sigma_{с1} - \sigma_{с2} + \varepsilon_{с2}\omega_2 - \varepsilon_{с1}\omega_1)}{\omega_1 - \omega_2}, \\ \sigma_{ч} = \frac{2\omega_1(\sigma_{с1} - \sigma_{с2} + \varepsilon_{с2}\omega_2 - \varepsilon_{с1}\omega_1)}{\omega_1 - \omega_2} + 2\varepsilon_{с1}\omega_1 - 2\sigma_{с1}, \end{cases} \quad (7)$$

де ω_1 - кутова частота в екстремальній точці для кулі з характеристиками $\varepsilon_{ч}, \sigma_{ч}$, що знаходиться в рідині з характеристиками $\varepsilon_{с1}, \sigma_{с1}$;

ω_2 - кутова частота в екстремальній точці для кулі з характеристиками $\varepsilon_{ч}, \sigma_{ч}$, що знаходиться в рідині з характеристиками $\varepsilon_{с2}, \sigma_{с2}$.

Зазначений метод можна модифікувати і розповсюдити на інші точки залежності $M=f(\omega)$. Для цього складемо систему 2 рівнянь, використавши формулу для моменту сили, що діє на частинку в обертовому електричному полі:

$$\begin{cases} M_1 = 4\pi\varepsilon_c a^3 E_1^2 \frac{(\varepsilon_{ч} - \varepsilon_c) \left(\frac{\sigma_{ч}}{\omega_1} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega_1} \right) - (\varepsilon_{ч} + 2\varepsilon_c) \left(\frac{\sigma_{ч}}{\omega_1} - \frac{\sigma_c}{\omega_1} \right)}{(\varepsilon_{ч} + 2\varepsilon_c)^2 + \left(\frac{\sigma_{ч}}{\omega_1} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega_1} \right)^2}, \\ M_2 = 4\pi\varepsilon_c a^3 E_2^2 \frac{(\varepsilon_{ч} - \varepsilon_c) \left(\frac{\sigma_{ч}}{\omega_2} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega_2} \right) - (\varepsilon_{ч} + 2\varepsilon_c) \left(\frac{\sigma_{ч}}{\omega_2} - \frac{\sigma_c}{\omega_2} \right)}{(\varepsilon_{ч} + 2\varepsilon_c)^2 + \left(\frac{\sigma_{ч}}{\omega_2} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega_2} \right)^2}, \end{cases} \quad (8)$$

де a - радіус частинки, м;

E_1, E_2 - напруженість електричного поля в першій та другій точці

відповідно, В/м;

ω_1, ω_2 - кутова частота в перші та другій точці відповідно, рад/с;

M_1, M_2 – момент сили в перші та другій точці відповідно, Н·м.

Із системи (8) виходить:

$$\sqrt{\frac{\omega_1 - k\omega_2}{k\omega_1 - \omega_2} \omega_1 \omega_2} = \frac{\sigma_{\text{ч}} + 2\sigma_{\text{с}}}{\varepsilon_{\text{ч}} + 2\varepsilon_{\text{с}}}, \quad (9)$$

де $k = \frac{M_2 E_1^2}{M_1 E_2^2}$.

У зв'язку з тим, що напруженість електричного поля пропорційна напрузі можна записати:

$$k = \frac{M_2 U_1^2}{M_1 U_2^2}, \quad (10)$$

де U_1, U_2 - напруги на електродах, що відповідають напруженостям електричного поля E_1, E_2 відповідно.

Співставлення формул (2) та (9) показує, що кутова частота в екстремальній точці може бути розрахована за результатами вимірювання моменту сили в двох довільних точках за формулою:

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_1 - k\omega_2}{k\omega_1 - \omega_2} \omega_1 \omega_2}. \quad (11)$$

У зв'язку з тим, що у вираз (11) входить відношення моментів, то похибка пов'язана з вимірюванням абсолютного значення моменту сили при такому підході відсутня.

Для розрахунку електрофізичних характеристик суспензії за допомогою рівнянь (4),(5),(7) потрібно виміряти значення кутової частоти в екстремальних точках. Схема лабораторної установки для проведення таких вимірювань показана на рисунку 1. Установка складається з чотирьох електродів 1 у вигляді гіперболічних циліндрів до яких підведена чотирифазна напруга (фази А,В,С,Д). Електроди розташовані в камері 2, в яку заливають дослідну суспензію. Для спостереження за рухом зважених частинок суспензії в установці передбачений фотоелектричний перетворювач 3 на базі ПЗС матриці з цифровим виходом для обробки інформації на персональному комп'ютері. Інформація на перетворювач подається за допомогою оптоволоконного кабелю з регульованою укладкою волокон. Джерело живлення для установки (на рисунку 1 не показане) являє собою двофазний генера-

тор регульованої частоти (від 0 до 20000 Гц) зі зсувом фаз 90° , двофазний підсилювач потужності та чотирифазний високовольтний трансформатор [2].

Методика вимірювання електрофізичних характеристик суспензії полягає у наступному. На електроди подають одночасно дві системи чотирифазних напруг різної регульованої частоти з протилежним чергуванням фаз таким чином створюючи два поля, що обертаються на зустріч одне одному. Обидва поля діють на частинку створюючи протилежні моменти сил. Метою досліду є знаходження частоти, що відповідає екстремальній точці залежності $M=f(\omega)$.

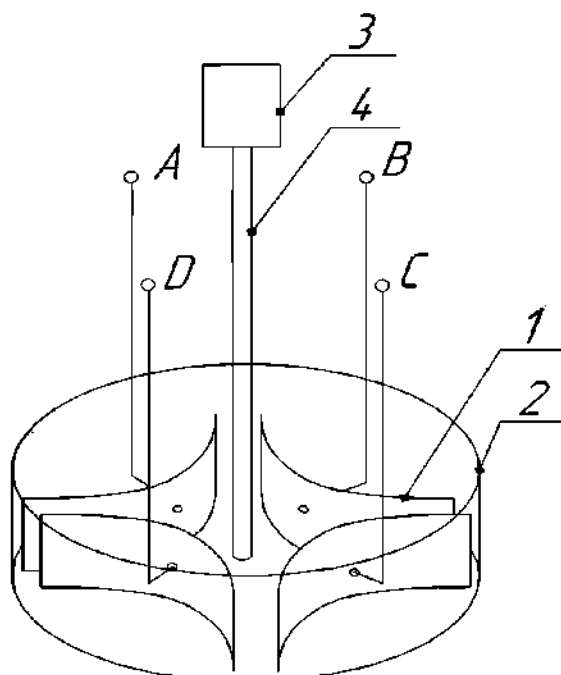


Рис. 1. Схема лабораторної установки для вимірювання електрофізичних характеристик суспензій.

Така частота може бути знайдена двома шляхами. У першому випадку встановлюють однакову величину напруги для обох систем, задаються різницею кутових частот у двох системах напруг та кроком їх збільшення. При цьому зважена частинка суспензії обертається під дією різниці моментів сил. Проводять поступове збільшення частот до моменту зупинки частинки. Далі зменшують різницю кутових частот до нуля і таким чином встановлюють кутову частоту, що відповідає екстремальній точці. В другому випадку використовують формулу (11). В обох системах напруг встановлюють довільні, але різні кутові частоти. Вимірюють значення напруг при яких зважена частинка суспензії не обертається. Розраховують параметр k за формулою (10). З урахуванням рівності моментів він дорівнює відношенню квадратів відповідних напруг. Дослідження проводять для двох середовищ з ві-

дмінними властивостями та двох куль з відомими властивостями. Відмінність електрофізичних параметрів середовища може бути досягнута розбавленням суспензії іншою рідиною. Наприклад, у рослину олію може додаватись бензин. За формулами (4),(5) розраховують діелектричні проникності та питомі опори обох середовищ. Далі за формулою (7) розраховують діелектричну проникність та питомий опір зваженої частинки з невідомими властивостями.

Перевірка розробленої методики здійснювалась для соняшникової олії з діелектричною проникністю $3,2 \cdot 10^{-11}$ Ф/м і питомою електропровідністю 10^{-9} См/м та олеїнової кислоти, яка має діелектричну проникність $2,15 \cdot 10^{-11}$ Ф/м і питому електропровідність 10^{-8} См/м [5]. В якості дисперсної фази використовувались два зразки текстоліту діелектрична проникність яких $7 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, питома електропровідність першого зразка 10^{-7} См/м другого – $2,5 \cdot 10^{-8}$ См/м.

Виміряне значення критичних частоти склало: $\omega_{в1}=750$ рад/с; $\omega_{в2}=200$ рад/с; $\omega'_{в1}=1050$ рад/с; $\omega'_{в2}=400$ рад/с; $\omega_1=460$ рад/с; $\omega_2=750$ рад/с.

Розраховані за результатами вимірювання електрофізичні характеристики складових суспензій наступні: діелектрична проникність соняшникової олії $3,32 \cdot 10^{-11}$ Ф/м; олеїнової кислоти - $2,27 \cdot 10^{-11}$ Ф/м; талька $5,23 \cdot 10^{-11}$ Ф/м; питома електропровідність соняшникової олії $1,15 \cdot 10^{-8}$ См/м; олеїнової кислоти – $1,05 \cdot 10^{-8}$ См/м; талька – $5,23 \cdot 10^{-8}$ См/м. Таким чином відхилення визначених значень електрофізичних параметрів частинок талька не перевищує 5% у порівнянні з довідковими даними [5] для цієї речовини, а для середовища відхилення не перевищує 15 %.

Висновки. Розроблена методика дозволяє вимірювати електрофізичні характеристики діелектричних суспензій: питому електропровідність та діелектричну проникність дисперсної фази та дисперсійного середовища, при чому характеристики дисперсної фази визначаються безпосередньо в стані суспензії. Відносна похибка виміряного значення цих показників не перевищила 15%.

Література

1. Назаренко І.П. Сепарація діелектричних суспензій в біжучому електричному полі / І.П. Назаренко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – К., 2010.- Вип.148.- С. 117-122.

2. Назаренко І.П. Обґрунтування частоти біжучого електричного поля в пристроях очистки діелектричних рідин / І.П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. - Мелітополь, 2010. - Вип. 10, т. 3. - С. 171-175.

3. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых

продуктов / *И.А. Рогов*. – М.: Агропромиздат, 1988. –272с.

4. *Назаренко І.П.* Моделювання електричного поля, що обертається в електросепараторах діелектричних суспензій / *І.П. Назаренко* // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. - Мелітополь, 2010. - Вип. 10, Т. 8. - С. 338-345.

5. *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. *И. К. Кикоина*. - М.: Атомиздат, 1976.- 1008 с.

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СУСПЕНЗИЙ

Назаренко И.П.

Аннотация - представлены результаты экспериментального определения удельной электропроводимости и диэлектрической проницаемости дисперсной фазы и дисперсионной среды диэлектрических суспензий методом встречно вращающихся электрических полей.

TO THE QUESTION OF DETERMINATION OF ELECTRIC PROPERTIES OF DIELECTRIC SUSPENSION

I. Nazarenko

Summary

The results of experimental determination of specific conductivity and dielectric permeability of dispersion phase and dispersion environment of dielectric suspension by a method meeting the circulating electric fields are given in work.