УДК665.2/3.067.7

# ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КАМЕРНОГО ЕЛЕКТРОСЕПАРАТОРА

Назаренко І.П. , к.т.н.,
Рубцов М.О., к.т.н.
*Таврійський державний агротехнологічний університет*
Тел. 42-23-41

***Анотація*** **- в роботі надані результати теоретичних досліджень щодо параметрів електросепарації діелектричних рідин. Визначені енергетичні показники електросепарації.**

***Ключові слова*** **– електросепарація, потенціал, електрод, діелектрична рідина, електричне поле.**

*Постановка проблеми***.** Для очистки рідин від домішок, які з точки зору електричних властивостей слабо проводять електричний струм, перспективно використовувати електросепаратори, як малоенергоємні апарати. На теперішній час розроблено конструкції електросепараторів, що відрізняються за принципами розділення (вилучення) домішок. Вони можуть використовуватися для очистки рослинних олій, технічних олив, різноманітних палив та інших рідин. В залежності від електрофізичних властивостей рідини та домішок ці сепаратори можуть працювати більш чи менш ефективно.

Одним із принципів вилучення домішок із діелектричних рідин є використання дії неоднорідного електричного поля на діелектричну частинку. В таких сепараторах застосовують спеціальні електроди, які утворюють неоднорідне електричне поле. Дослідження впливу параметрів поля на енергетичні показники та ефективність сепарації діелектричних рідин потребує створення математичної моделі процесу та її аналізу.

*Аналіз останніх досліджень*. В основу роботи сепараторів діелектричних рідин може бути покладено один з наступних принципів розділення: дія електричного поля на заряджену частинку домішки; електрофоретична взаємодія; дія неоднорідного електричного поля на частинку. В роботі [1] показано, що для очистки рідин з утриманням фази електричним полем, структура поля повинна мати зони, де напрямок електричного поля не співпадає з градієнтом квадрата напруженості поля. Найбільш вагомим є цей ефект для поля

© к.т.н. І.П. Назаренко, к.т.н. М.О. Рубцов

квадрупольної лінзи, у якої величина $gradE^2$ збільшується від центру пропорційно радіусу. Якщо напрямок поля співпадає з напрямком дії сили на частинку, то напрямок руху частинки співпадає з напрямком коагуляції. Це призводить до створення нерухомих волокон скоагульованих домішок, що ускладнює електросепарацію. Таким чином, доведено доцільність використовування в камерних електросепараторах системи електродів у вигляді квадрупольної лінзи або близьких до неї.

*Формулювання цілей статті.* Метою роботи є теоретичні дослідження впливу конструктивних параметрів камери сепаратора на енергетичні показники процесу електросепарації.

*Основна частина.* Камера електросепаратора являє собою чотири електроди у вигляді гіперболічного циліндру («квадрупольна лінза»). Характерними розмірами камери є радіус вписаної окружності «А», та довжина камери «ℓ». В системі електродів «квадрупольна лінза» напрямні еквіпотенціальних поверхонь описуються рівнянням [2]

$$y^2-x^2=A^2, \tag{1}$$

яке задовольняє двомірному рівнянню Лапласа [3] . Це рівняння рівнобічної гіперболи, і для різних «А» можна отримати сімейство гіпербол (рис.1), або еквіпотенціальних поверхонь (твірна поверхні паралельна осі z). На рис.1 пунктирною лінією позначені лінії поля Е, а суцільними - напрямні еквіпотенціальних поверхонь φ.

Компоненти вектора напруженості електричного поля для такого розподілу потенціалу розраховуються як:

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 2E_0 x; \\ E_y &= -\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -2E_0 y, \end{aligned} \tag{2}$$

де $E_0$- параметр потенціальної функції, $E_0=\varphi/A^2$, В/м$^2$;

φ - потенціал поверхні з координатою (0;А), В.

Споживана потужність Р, Вт, за рахунок міжелектродних струмів, розраховується за формулою [3]

$$P=\int_V \frac{\vec{E}^2}{\rho} dV, \tag{3}$$

де V- об’єм камери (міжелектродного проміжку), м$^3$;

ρ – питомий опір рідини, Ом·м.

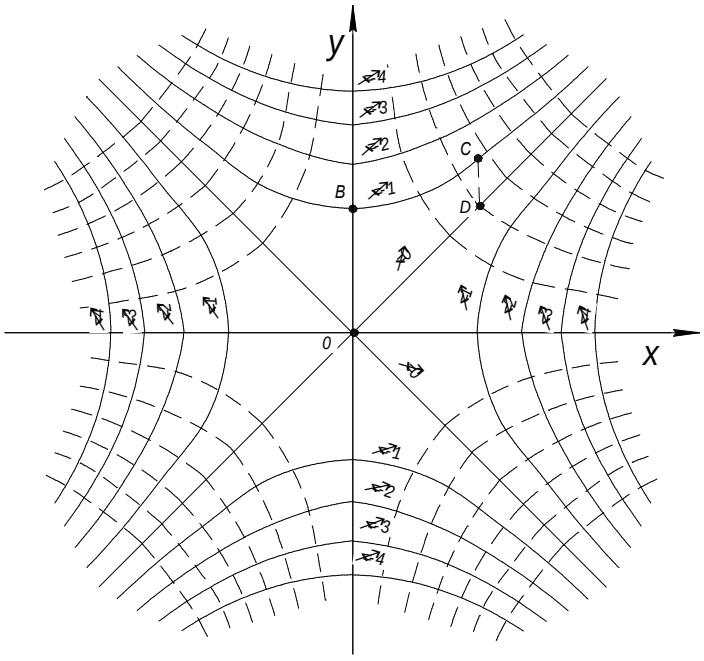


Рис. 1. Напрямні еквіпотенціальних поверхонь електричного поля гіперболічного циліндру.

Виходячи з формули (2) квадрат напруженості електричного поля

$$\vec{E}^2 = 4E_0^2(x^2 + y^2)\ . \qquad (4)$$

Зробимо припущення, що поле не залежить від координати z. Тоді інтеграл по об'єму можна представити, як інтеграл по поверхні обмеженій напрямними гіперболічного циліндру і враховуючи симетрію, відносно координатних осей та лінії φ=0 отримуємо

$$P = \int_V \frac{\vec{E}^2}{\rho} dV = z\Big|_{z1}^{z2} \int_S \frac{\vec{E}^2}{\rho} dS = \frac{8}{\rho} \cdot \ell \cdot E_0^2 \int_0^A dx \int_x^{\sqrt{x^2+A^2}} 4\left(x^2 + y^2\right) dy, \qquad (5)$$

де $\ell$ - довжина камери ($\ell = z_2 - z_1$), м.

S – площина, що обмежується контуром OBCD (рис.1).

Беручи інтеграл в рівнянні (5) маємо

$$P = \frac{8}{\rho} \cdot \ell \cdot E_0^2 \int_0^A \left( 4x^2\left(x^2 + A^2\right)^{1/2} + \frac{4}{3}\left(x^2 + A^2\right)^{3/2} - \frac{16}{3}x^3 \right) dx =$$

$$= \frac{8}{\rho} \cdot \ell \cdot E_0^2 \left( \frac{x}{2}\left(2x^2 + A^2\right)\sqrt{x^2 + A^2} - \frac{A^4}{2} \ln\left(x + \sqrt{x^2 + A^2}\right) \right)\Bigg|_0^A +$$

$$+ \frac{x}{6}\left(2x^2 + 5A^2\right)\sqrt{x^2 + A^2} + \frac{A^4}{2} \ln\left(x + \sqrt{x^2 + A^2}\right) - \frac{4}{3}x^4 \Bigg|_0^A =$$

$$= \frac{8}{\rho} \cdot \ell \cdot E_0^2 \left( \frac{x}{2}\left(2x^2 + A^2\right)\sqrt{x^2 + A^2} + \frac{x}{6}\left(2x^2 + 5A^2\right)\sqrt{x^2 + A^2} \right) - \frac{4}{3}x^4 \Bigg|_0^A .$$

Остаточно отримуємо

$$P = \frac{32(2\sqrt{2} - 1)}{3\rho} \cdot \ell \cdot E_0^2 A^4 . \qquad (6)$$

Таким чином, споживана потужність за рахунок струмів між електродами пропорційна четвертого ступеню розмірів напрямних гіперболічного циліндру при умові рівних потенціалів на відповідних поверхнях. Поряд з цим, об'єм гіперболічного циліндру, цілком очевидно, пропорційний квадрату розмірів напрямних.

Розглянемо динаміку руху частинок домішок в камері електросепаратора. В неоднорідному електричному полі гіперболічного циліндра на зважену в діелектричному середовищі частинку діє сила $F_д$, Н, під впливом якої вона буде рухатись [4]

$$\vec{F}_д = 2\pi R^3 \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \operatorname{grad} \vec{E}^2 , \qquad (7)$$

де R – радіус частинки, м;

$\varepsilon_0$, $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$- діелектрична проникність вакууму, середовища та частинки відповідно, Ф/м.

Під час руху частинка сприймає на собі силу опору середовища $F_д$, Н [5]

$$\vec{F}_c = 6\pi R \eta \vec{\nu} , \qquad (8)$$

де η- в'язкість рідини, Па·с;

ν- швидкість частинки, м/с.

Не беручи до уваги силу тяжіння і відповідно до 2 закону Ньютона:

$$m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = 2\pi R^3 \varepsilon_0 \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \operatorname{grad} \vec{E}^2 - 6\pi R \eta \frac{d\vec{r}}{dt} , \qquad (9)$$

де $\vec{r}$ - радіус-вектор руху частинки, м.

Виходячи з формули (4)

$$\text{grad}\vec{E}^2 = 8E_0^2\vec{r}\,. \tag{10}$$

Тоді рівняння (9) приймає вигляд

$$m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = 16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1\frac{\varepsilon_2-\varepsilon_1}{2\varepsilon_1+\varepsilon_2}E_0^2\vec{r} - 6\pi R\eta\frac{d\vec{r}}{dt}\,. \tag{11}$$

Отримали лінійне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами. Для його розв'язання знайдемо характеристичне рівняння

$$mp^2 + 6\pi R\eta p - 16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1\frac{\varepsilon_2-\varepsilon_1}{2\varepsilon_1+\varepsilon_2}E_0^2\,. \tag{12}$$

Воно має два дійсних нерівних кореня

$$p_{1,2} = -\frac{6\pi R\eta}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}\,. \tag{13}$$

Загальне рішення рівняння

$$r = C_1 e^{\left(-\frac{6\pi R\eta}{2m}-\sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2+\frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}\right)t} + C_2 e^{\left(-\frac{6\pi R\eta}{2m}+\sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2+\frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}\right)t}, \tag{14}$$

де $C_1$,$C_2$ – довільні постійні.

Окреме розв'язання рівняння знаходимо при початкових умовах: $t = 0; r(0) = r_0; r'(0) = 0$.

При підстановці початкових умов отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = r_0 \\ C_1\left(-\frac{6\pi R\eta}{2m} - \sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}\right) + \\ + C_2\left(-\frac{6\pi R\eta}{2m} + \sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}\right) = \\ = 0 \end{cases} \tag{15}$$

Рішення системи:

$$C_1 = r_0 \frac{-\frac{6\pi R\eta}{2m} + \sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}}{2\sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}}, \qquad (16)$$

$$C_2 = r_0 \frac{\frac{6\pi R\eta}{2m} + \sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}}{2\sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}}. \qquad (17)$$

Окреме розв'язання диференційного рівняння:

$$r = r_0 \frac{-\frac{6\pi R\eta}{2m} + \sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}}{2\sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}} x_0 e^{\left(-\frac{6\pi R\eta}{2m} - \sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}\right)t} + r_0 \frac{\frac{6\pi R\eta}{2m} + \sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}}{2\sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}} x_0 e^{\left(-\frac{6\pi R\eta}{2m} + \sqrt{\left(\frac{6\pi R\eta}{2m}\right)^2 + \frac{16\pi R^3\varepsilon_0\varepsilon_1(\varepsilon_2-\varepsilon_1)E_0^2}{m(2\varepsilon_1+\varepsilon_2)}}\right)t}. \qquad (18)$$

Аналіз отриманого рівняння (18) динаміки руху частинки показує, що швидкість руху частинки суттєво залежить від розмірів частинки, її діелектричних властивостей та параметрів електричного поля. Рівняння (18) дозволяє розрахувати час, потрібний на вилучення домішок з рідини при заданій напруженості електричного поля та розмірах камери.

*Висновки.* За результатами роботи можна зробити наступні висновки:

- отримані аналітичні залежності дозволяють розрахувати енергетичні показники камерного електросепаратора з електродами у вигляді квадрупольної лінзи;

- для даної електродної системи з точки зору енергозбереження доцільно зменшувати розміри напрямних електродів при пропорційному збільшенню їх довжини. Обмеженням на мінімальну величину напрямних є технологічність роботи установки.

Література

1. *Назаренко І.П.* Електрична очистка діелектричних рідин / *І.П. Назаренко, С.В. Петриченко* // Праці Таврійського державного агротехнічного університету / відп. за вип. *Ф. Ю. Ялпачик*. - Мелітополь, 2008. - Вип. 8, т. 7. - С. 68-73.
2. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике / *М.Я. Выгодский*.- М.: Наука, 1977.- 872 с.
3. *Пановский В.* Классическая электродинамика / *В. Пановский., М. Филипс*. - М.: Физматгиз, 1963 - 432 с.
4. *Остроумов Г.А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. Физические основы электрогидродинамики / *Г.А. Остроумов*. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. - 310с.
5. *Яворский Б.М.* / Справочник по физике / *Б.М. Яворский, А.А. Детлаф*. - М.: Наука, 1985с.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАМЕРНОГО ЭЛЕКТРОСЕПАРАТОРА

Назаренко И.П., Рубцов Н.А.

***Аннотация*** **- в работе предоставленные результаты теоретических исследований относительно параметров электросепарации диэлектрических жидкостей. Определенны энергетические показатели электросепарации.**

## THEORETICAL RESEARCHES OF POWER INDEXES OF CHAMBER ELECTRO-SEPARATOR

I. Nazarenko, M. Rubtzov

***Summary***

**In work the results of theoretical researches are given in relation to the parameters of cleaning of dielectric liquids. The power indexes of electric cleaning are certain.**