

## СЕПАРАЦИЯ СЛАБОПРОВОДЯЩИХ СУСПЕНЗИЙ В БЕГУЩЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*И. П. Назаренко*

На основании теоретических и экспериментальных исследований динамики частиц обоснована возможность разделения частиц суспензии с разными электрофизическими свойствами в бегущем электрическом поле пластинчатой многорядной системы электродов.

**Ключевые слова:** бегущее электрическое поле, сепарация, слабопроводящая суспензия, электрод.

On the basis of theoretical and experimental researches of dynamics of particles possibility of division of particles of suspensions with different physical properties in the moving electric field in a multi-row lamellar system of electrodes is grounded.

**Keywords:** moving electric field, separation, dielectric suspensions, electrode.

Применение электрических методов для очистки жидкостей, обладающих большим удельным электрическим сопротивлением (растительные масла, биотопливо, нефтепродукты и др.) обосновано малыми энергозатратами, экологичностью, малым гидравлическим сопротивлением аппаратов. В настоящее время разработан ряд аппаратов электрической очистки и сепарации слабопроводящих жидкостей в электрическом поле, в которых применяют постоянный или переменный электрический ток промышленной частоты высокого напряжения, создающий постоянное или пульсирующее электрическое поле [1,2]. В таких устройствах используются силы электрофоретического и диэлектрофоретического взаимодействия, позволяющие осаждать частички взвеси на электроды. Такой подход требует периодической очистки электродов. Кроме этого, отсутствует возможность разделения частиц с разными электрофизическими свойствами. Разделить такие частицы актуально с точки зрения использования полученных веществ. Например, разделение взвеси подсолнечного масла позволяет получить ценные компоненты - клетчатку и фосфатиды.

Применение бегущего электрического поля, созданного системой многофазных электродов позволяет осуществлять направленное движение частиц взвеси вдоль рядов электродов [3]. Используя этот эффект, можно не только создавать электроочистители непрерывного действия, но и электросепараторы, способные разделять частицы с разными электрофизическими свойствами

В электрическом поле на поляризованную частицу действует сила [4]:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F} &= Re \left( \dot{A} \left( \bar{E}_x \frac{\partial \dot{E}}{\partial x} + \bar{E}_y \frac{\partial \dot{E}}{\partial y} + \bar{E}_z \frac{\partial \dot{E}}{\partial z} \right) \right); \\ \dot{A} &= 4\pi\epsilon_c a^3 \frac{(\epsilon_q - \epsilon_c) - i \left( \frac{\sigma_q}{\omega} - \frac{\sigma_c}{\omega} \right)}{(\epsilon_q + 2\epsilon_c) - i \left( \frac{\sigma_q}{\omega} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega} \right)}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\varepsilon_c, \varepsilon_i$  - диэлектрическая проницаемость среды и частицы соответственно, Ф/м;  
 $\sigma_c, \sigma_i$  - удельная электропроводность среды и частицы соответственно, См/м;  
 $a$  - радиус частицы, м;  
 $\omega$  - угловая частота, рад/с;

$\vec{E}$  - комплекс вектора напряженности электрического поля, В/м.

$\bar{E}_x, \bar{E}_y, \bar{E}_z$  - компоненты вектора, комплексно сопряженного с вектором  $\vec{E}$ , В/м.

В соответствии с формулой (1) в системе многофазных пластинчатых электродов на поляризованную частицу действует сила  $\vec{F}_{q1}$  со стороны пульсирующего поля, которая перемещает частицы в область максимального поля между пластинчатыми электродами и сила  $\vec{F}_{q2}$  со стороны бегущего поля, которая перемещает частицы вдоль рядов электродов (рис. 1).

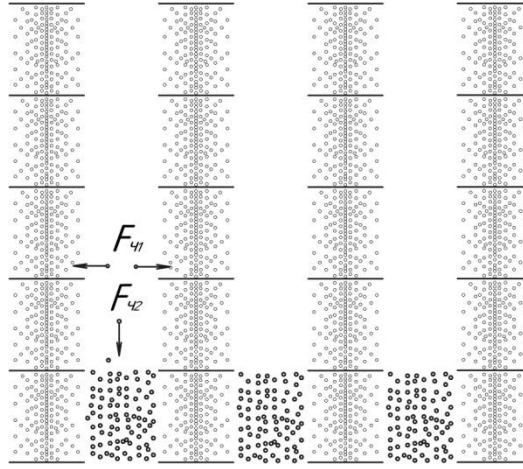


Рис. 1. Система многофазных пластинчатых электродов

Для исследования динамики частиц в работе [4] аналитически описано электрическое поле методом комплексного потенциала, и исходя из выражения (1) получены формулы для поля сил в двухрядной системе многофазных электродов:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F} &= A \cdot \frac{B}{D} \cdot \frac{\bar{D} \cdot \bar{C} - \bar{H} \cdot \bar{B}}{(\bar{D})^3}; \\ z &= \frac{h}{\pi} \sum_{k=1}^n \ln(\varpi - a_k) + \frac{h}{\pi} \sum_{i=1}^m \ln(\varpi - c_i); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$B = \frac{dW_\varpi}{d\varpi} = \frac{1}{\pi} \left( \sum_{k=1}^n \frac{U_{1(k-1)} - U_{1k}}{\varpi - a_k} + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{U_{2i} - U_{2(i+1)}}{\varpi - c_{i+1}} + \frac{U_{1n} - U_{21}}{\varpi - c_1} \right); \quad (3)$$

$$C = \frac{d^2W_\varpi}{d\varpi^2} = -\frac{1}{\pi} \left( \sum_{k=1}^n \frac{U_{1(k-1)} - U_{1k}}{(\varpi - a_k)^2} + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{U_{2i} - U_{2(i+1)}}{(\varpi - c_{i+1})^2} + \frac{U_{1n} - U_{21}}{(\varpi - c_1)^2} \right); \quad (4)$$

$$D = \frac{dz}{d\varpi} = \frac{h}{\pi} \left( \sum_{k=1}^n \frac{1}{\varpi - a_k} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{\varpi - c_i} \right); \quad (5)$$

$$H = \frac{d^2z}{d\varpi^2} = -\frac{h}{\pi} \left( \sum_{k=1}^n \frac{1}{(\varpi - a_k)^2} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{(\varpi - c_i)^2} \right); \quad (6)$$

где  $W$  - комплексный потенциал, В;

$z$  - функция, которая конформно отображает верхнюю полуплоскость  $\mathbb{w}$  комплексной плоскости на многоугольник;

$h$  - размер межэлектродной области (расстояние между рядами электродов), м;

$a_k, c_i$  - параметры отображающей функции;

$U_{ik}$  - потенциал электродов, В.

Визуализация поля сил в соответствии с формулами (2...6) программными средствами MATLAB (рис. 2) позволила определить, что  $Y$  - составляющая силы, которая действует на частицы со стороны бегущего поля, незначительно изменяется вдоль координаты  $Y$ . Ее величина для электродной системы с размерами:  $l = 0,5$  м;  $h = 1$  м составляет  $F^* = 4$  Н при величине параметра  $A = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}^3/\text{В}^2$  и действующем напряжении на электродах  $U_{ik} = 1$  В.

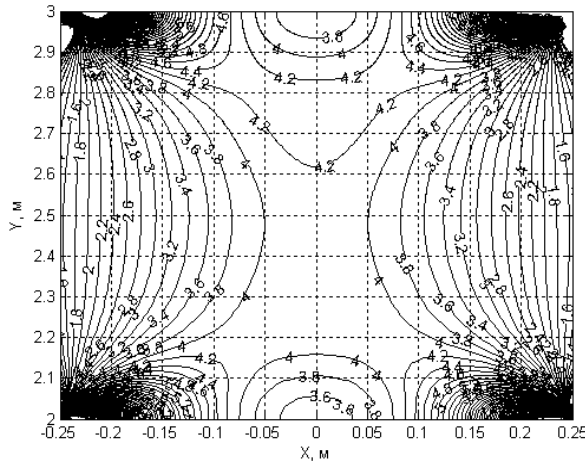


Рис. 2. Поле  $Y$  - составляющей силы при соотношении размеров межэлектродной области  $l/h = 0,5$

Динамика движения частиц в бегущем электрическом поле исследовалась на основании второго закона Ньютона с учетом силы действия электрического поля и силы сопротивления среды. В результате было получено нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, которое описывает движение частицы:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{9\eta}{2a^2 \rho} \frac{dy}{dt} = \frac{3F^*}{4\pi a^3 \rho} \frac{A \cdot U^2}{h^3}, \quad (7)$$

где  $\rho$  - плотность вещества частицы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\eta$  - динамическая вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

В общем случае такое уравнение не имеет аналитического решения, но для постоянной векторной функции  $F^*$  оно может быть сведено к линейному уравнению с постоянными коэффициентами и правой частью. Решение такого уравнения состоит из общего решения соответствующего уравнения без правой части и частного решения. Искомым решением является:

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{V_0 - C_3}{\gamma} e^{\gamma t} + y_0 - \frac{V_0 - C_3}{\gamma} + C_3 t, \\ C_3 &= \frac{F^* AU^2}{6\pi\eta ah^3}, \\ \gamma &= -\frac{9\eta}{2a^2\rho}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $V_0$  - начальная скорость, м/с;

$y_0$  - начальная координата, м.

Если на электроды подавать две системы напряжений разной частоты с разным чередованием фаз, то в межэлектродной области создаются два электрических поля бегущих встречно. При определенных частотах этих полей можно добиться разделения двух частиц с разными электрофизическими свойствами. Это следует из вида зависимости силы от частоты (1), которая имеет один максимум [5]. На частицу взвеси будет действовать сила, равная сумме сил от отдельных бегущих полей, которые могут быть направлены как в одну сторону, так и встречно:

$$F_1 = F_1(\omega_1) + F_1(\omega_2), \quad (9)$$

где  $F_1$  - сила, действующая на частицу в бегущем электрическом поле при частоте  $\omega_1$ , Н;

$F_2$  - сила, действующая на частицу в бегущем электрическом поле при частоте  $\omega_2$ , Н.

В соответствии с формулами системы (1) вид зависимости силы от частоты определяется видом зависимости мнимой части комплексного параметра  $A$  от частоты, который в свою очередь зависит от электрофизических свойств частицы и среды ( $\sigma_c$ ,  $\varepsilon_c$ ,  $\sigma_u$ ,  $\varepsilon_u$ ). Если в жидкости находится вторая частица с другими свойствами, то на нее будет действовать сила:

$$F_2 = F_2(\omega_1) + F_2(\omega_2), \quad (10)$$

которая определена другим видом зависимости мнимой части комплексного параметра  $A$  от частоты. На рис. 3 построены зависимости величины силы от частоты для двух частиц с разными электрофизическими свойствами.

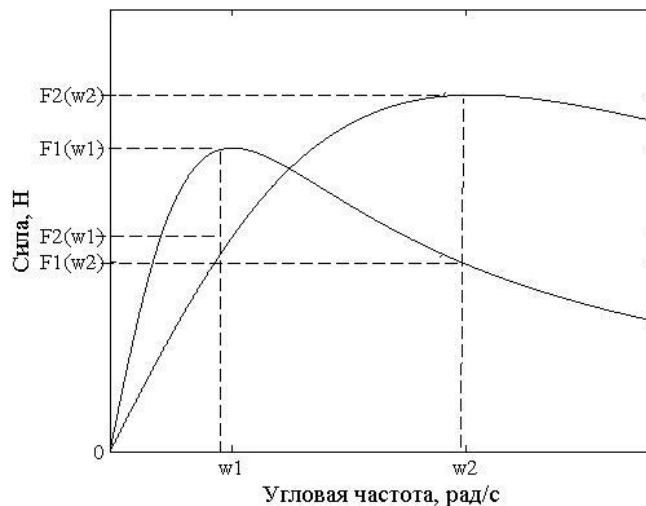


Рис. 3. Зависимости силы от частоты для двух частиц с разными свойствами

Если направления чередования фаз потенциалов электродов двух частот противоположны, то в межэлектродной области возникают два встречно бегущих электрических поля. В этом случае формулы (9) и (10) принимают вид:

$$\begin{aligned} F_1 &= F_1(\omega_1) - F_1(\omega_2); \\ F_2 &= F_2(\omega_1) - F_2(\omega_2), \end{aligned} \quad (11)$$

и тогда в соответствии с рис. 3 при значениях  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , которые соответствуют максимумам функций  $F_1(\omega)$  и  $F_2(\omega)$ ,  $F_1 > 0$ , а  $F_2 < 0$ . То есть силы направлены в противоположные стороны.

Для решения уравнения движения в поле двух частот по формулам системы (8) коэффициент  $C_3$  находится по формуле:

$$C_3 = \frac{F^* (A(\omega_1) - A(\omega_2)) U^2}{6\pi\eta a h^3} \quad (12)$$

На рис. 4 показаны графики движения двух частиц с разными электрофизическими свойствами в бегущих электрических полях двух частот. Зависимости рис. 4 построены для жидкости (подсолнечное масло) со следующими свойствами:  $\sigma_c = 10^{-9}$  См/м;  $\varepsilon_c = 3,2 \cdot 10^{-9}$  Ф/м;  $\eta = 0,054$  Па·с и частицы:  $a = 50$  мк,  $\rho = 1300$  кг/м<sup>3</sup>, размеров области:  $h = 2$  мм;  $l/h = 0,5$ . Движение частиц начинается с точки с координатой  $Y=0$ . Напряжение на электродах - 2 кВ.

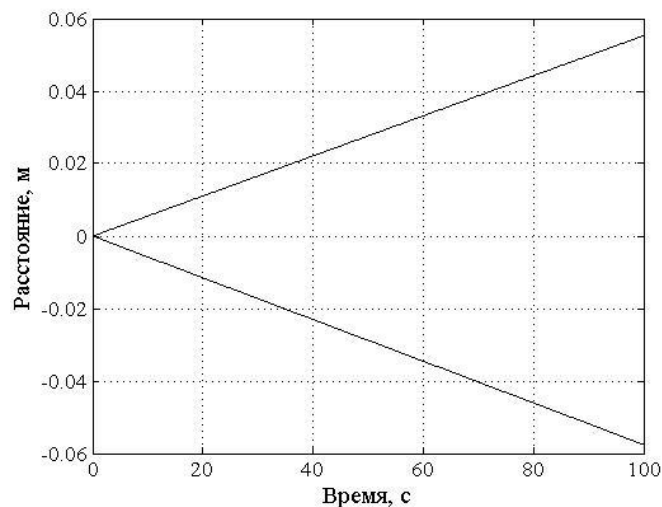


Рис. 4. Зависимости Y - координаты частиц от времени: 1 -  $\sigma_i = 10^{-7}$  См/м,  $\varepsilon_i = 2,1 \cdot 10^{-11}$  Ф/м, 2 -  $\sigma_i = 4 \cdot 10^{-8}$  См/м,  $\varepsilon_i = 2,9 \cdot 10^{-11}$  Ф/м

Из полученных закономерностей следует, что частицы за 100 с разойдутся на расстояние 110 мм и будут разделены по признакам электрофизических свойств.

Теоретические исследования динамики частиц в двух бегущих полях разной частоты показывают возможность разделения их по признаку электрофизических свойств: диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности. Причем, на процесс разделения влияет как напряжение на электродах, так и частота электрического поля.

Для подтверждения полученных результатов были проведены экспериментальные исследования по разделению частиц шрота подсолнечника разной влажности. Использовался шрот влажностью 6% и 14%, который добавлялся в рафинированное подсолнечное масло в равных долях. Содержание шрота каждой из фракций составляло 0,25 %. Предварительно были определены электрофизические характеристики приготовленной суспен-

зии по методике [6]. Частицы первой фракции имели удельную электропроводность  $4,4 \cdot 10^{-8}$  См/м, а диэлектрическую проницаемость -  $4,4 \cdot 10^{-8}$  Ф/м. Угловая частота, которая соответствует максимальной силе, для этой фракции составляет 446 рад/с. Частицы второй фракции имели удельную электропроводность  $4,3 \cdot 10^{-7}$  См/м, а диэлектрическую проницаемость -  $7,2 \cdot 10^{-8}$  Ф/м. Угловая частота, которая соответствует максимальной силе, для этой фракции составляет 3215 рад/с.

В экспериментальных исследованиях использовалась камера с двурядной системой электродов с  $h = 5$  мм и  $l/h = 0,5$ . Длина камеры составляет 80 мм, поэтому для полного разделения фракций максимальное расстояние, которое должна преодолеть частица каждой фракции, составляет 80 мм. На электроды подавалось четырехфазное напряжение 7,2 кВ.

Содержание шрота в масле определялось по ГОСТ 5481-89. Пробы масла отбирались через 200 с.

Теоретические зависимости рис. 5 строились по формулам (8) и (12) с учетом гранулометрической характеристики шрота.

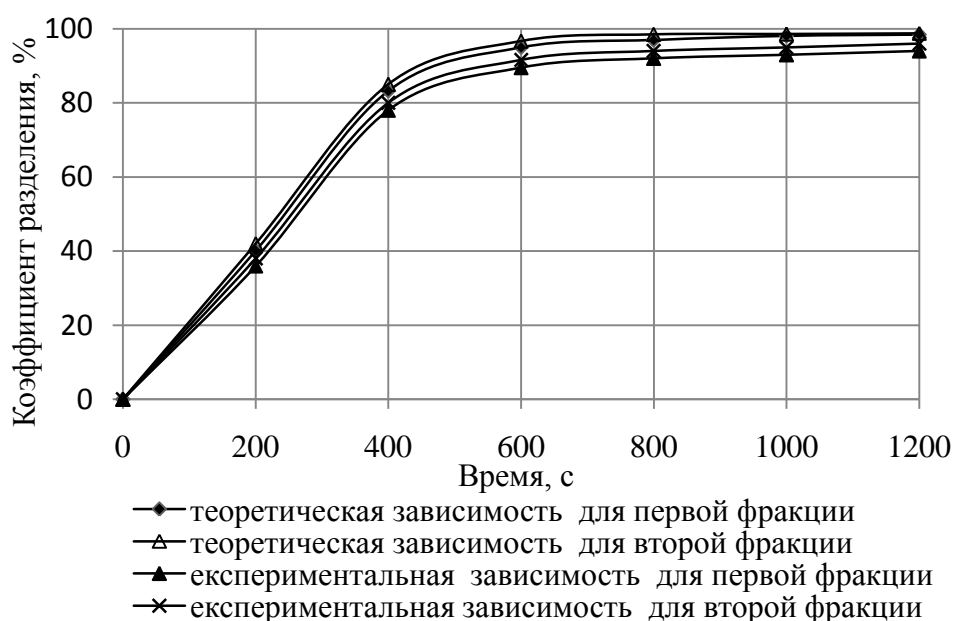


Рис. 5. Динамика разделения шрота подсолнечника разной влажности

Сравнение полученных экспериментальных результатов хорошо согласуется с теоретическими (рис. 5). Расхождение не превышает 11 %.

Таким образом, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность разделения частиц суспензии с разными электрофизическими свойствами в поле двух встречно бегущих электрических полей, созданных многофазными системами электродов.

### Литература

1. Эфендиев О. Ф. Электроочистка жидкости в пищевой промышленности / О. Ф. Эфендиев. - М.: Пищевая промышленность, 1977. -149с.
2. Болога М. К. Рафинация подсолнечного масла в электрическом поле: монография / М. К. Болога, И. И. Берилл ; АН Республики Молдова, Институт прикладной физики. - Молдова: Stinta, 2004.-214 с.:ил.

3. Пат. 94810 Україна, МПК В 01D35/6. Спосіб електричної очистки діелектричних рідин / І. П. Назаренко, В. А. Дідур (Україна). - № а 200911592; заявл. 13.11.2009 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.

4. Назаренко І. П. Теоретичні дослідження взаємодії електричного поля з діелектричними суспензіями в багатоелектродних системах / І. П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання / ТДАТУ.- Мелітополь, 2012. - Вип. 12, т. 1. - С. 35-45.

5. Назаренко І. П. Визначення електрофізичних властивостей діелектричних суспензій / І. П. Назаренко, М. О. Рубцов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання / ТДАТУ.- Мелітополь, 2011. - Вип. 11, т. 3. - С. 167-175.

6. Назаренко І.П. До питання визначення електрофізичних властивостей діелектричних суспензій / І.П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету - Вип. 11. Т. 4. - Мелітополь, 2011. - С. 66-70.