

УДК 66.086.2

## ОЧИСТКА СЛАБОПРОВОДЯЩИХ СУСПЕНЗИЙ В БЕГУЩЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Назаренко И.П., к.т.н., доц. \*

*Таврический государственный агротехнологический университет*

г. Мелитополь, Украина

Тел. 0619-42-25-85

**Аннотация.** На основе математической модели поля сил в многорядной системе цилиндрических электродов и уравнения движение частицы взвеси в межэлектродной области показано, что применение бегущего электрического поля в устройствах очистки и сепарации слабопроводящих суспензий позволяет увеличить силы, которые действует на поляризуемые частицы суспензии. Уменьшение размеров межэлектродной области позволяет снизить удельный расход энергии на процессы очистки слабопроводящих суспензий.

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

**Постановка проблемы.** Очистка жидкостей является составной частью многих технологий промышленного и сельскохозяйственного производства. Разнообразие свойств продуктов и технологических требований к их очистке способствовало созданию большого числа аппаратов для удаления примесей из жидкостей. Несмотря на большое количество конструктивных решений аппаратов очистки, в принцип их работы заложено не так много физических явлений. Все они могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся все способы очистки в пористых средах, ко второй - в силовых полях. С другой стороны, методы и средства очистки можно классифицировать по способу влияния на дисперсную систему: механические (отстаивание, центрифугирование, очистка в

---

\* Научный консультант: акад. МААО, д.т.н., проф.,  
Л.С. Червинский

гидроциклонах, фильтрация); химические (окисление, восстановление, нейтрализация, осаждение, комплексообразование); физико-химические (коагуляция и флокуляция, флотация и электрофлотация, ионообмен и сорбция, экстракция, дистилляция и вымораживание, электро- и гальванокоагуляция, электродиализ, электролиз, ультра- и гиперфильтрация); физические (очистка в магнитном, электрическом и электромагнитном полях, ультразвуковая обработка, ионизирующее облучение), биохимические (биологические отстойники, аэротенки, биофильтры, окислительные каналы).

Применение электрических методов для очистки жидкостей имеет определенные преимущества, которые заключаются в малых энергозатратах, экологичности, малом гидравлическом сопротивлении аппаратов. К жидкостям, которые могут быть очищены в электрическом поле, относятся всевозможные растительные масла, животные жиры, их растворы, различные нефтепродукты, биотопливо растительного происхождения, трансформаторное масло и др. Небольшие энергозатраты при очистке таких жидкостей обуславливаются их малой удельной электропроводностью (удельная электропроводность растительных масел составляет величину порядка  $10^{-9} \dots 10^{-8}$  См/м).

В настоящее время разработан ряд аппаратов электрической очистки и сепарации слабопроводящих жидкостей в электрическом поле, в которых применяют постоянный электрический ток высокого напряжения или переменный ток промышленной частоты, создающие постоянное или пульсирующее электрическое поле [1,2]. Такой подход исключает возможность применять преимущества бегущего электрического поля - организацию заданной траектории движения частиц примесей и создание благодаря этому аппаратов очистки и сепарации непрерывного действия.

*Анализ последних исследований.* В работе [3] показано, что в бегущем электрическом поле на частицу, которая находится в жидкости, действует сила

Направление и величина этой силы зависит от электрофизических свойств среды и частицы ( $\epsilon, \eta, \sigma_c, \sigma_u$ ).

Бегущее электрическое поле может быть создано системой цилиндрических электродов, расположенных рядами, на которые подается многофазное напряжение.

$$\vec{F} = 4\pi\epsilon_c a^3 \frac{\epsilon_c - \epsilon_u \left( \frac{\sigma_u}{\omega} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega} \right) - \epsilon_u + 2\epsilon_c \left( \frac{\sigma_u}{\omega} - \frac{\sigma_c}{\omega} \right)}{\epsilon_u + 2\epsilon_c} \left( \frac{\sigma_u}{\omega} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega} \right)^2 \times$$

$$\times \left( E_x \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} + E_y \frac{\partial \vec{E}}{\partial y} + E_z \frac{\partial \vec{E}}{\partial z} \right) = A \left( E_x \frac{\partial \vec{E}}{\partial x} + E_y \frac{\partial \vec{E}}{\partial y} + E_z \frac{\partial \vec{E}}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $\epsilon_c, \epsilon_u$  - диэлектрическая проницаемость среды и частицы соответственно, Ф/м;

$\sigma_c, \sigma_u$  - удельная электропроводность среды и частицы соответственно, См/м;

$a$  - радиус частицы, м;

$E$  - напряженность электрического поля, В/м.

В зависимости от электрофизических свойств в бегущем электрическом поле частицы примесей будут двигаться по направлению распространения электрического поля или встречно. Кроме этого, на электродную систему можно подавать две системы напряжений разной частоты с разным чередованием фаз. В результате 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 [4]. Для анализа факторов, которые влияют на величину силы в работе [3] аналитически описано электрическое поле методом комплексного потенциала, и исходя из выражения (1) получены формулы для поля сил в двухрядной многофазной системе электродов:

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

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

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

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

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

где  $W$  - комплексный потенциал, В;

$z$  - функция, которая конформно отображает верхнюю полуплоскость комплексной плоскости на многоугольник;

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

$a_k, c_i$  - параметры отображающей функции;

$U$  - потенциал электродов, В.

В соответствии с формулами (2)...(6) сила прямо пропорциональна второй степени напряжения  $U$  и обратно пропорциональна третьей степени размера области  $h$ . Условие неизменности величины электрического поля (величина напряжения на электродах ограничивается допустимой напряженностью поля по условию пробоя жидкости) при изменении напряжения и размеров области приводит к выводу, что величина силы будет обратно пропорциональна первой степени размера области. Это значит, что при проектировании устройств очистки жидкостей для уменьшения энергозатрат целесообразно уменьшать межэлектродные расстояния.

*Цель исследования.* Теоретически исследовать динамику движения частицы слабопроводящей суспензии в бегущем электрическом поле.

*Основная часть.* Для проектирования аппаратов очистки или сепарации нужно исследовать траекторию движения частицы в бегущем электрическом поле. В соответствии со вторым законом Ньютона уравнение движения частицы в жидкости имеет вид:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} + \vec{F}_c + \vec{F}_g, \quad (7)$$

где  $m$  - масса частицы; кг;

$V$  - скорость движения частицы, м/с;

$F$  - сила, которая действует на незаряженную поляризованную частицу в электрическом поле, Н;

$F_c$  - сила сопротивления вязкой жидкости движения частицы, Н;

$F_g$  - гравитационная сила, Н.

Будем считать, что частицы имеют форму сферы, векторы сил, которые действуют на частицу, лежат в плоскости XY. Гравитационной силой пренебрегаем в связи с ее малой величиной в сравнении с электрической силой. Для определения расчетной формулы для силы сопротивления жидкости движению частицы сделаем оценку числа Рейнольдса [5]

$$R = \frac{2(\zeta - V_p) a}{\nu}, \quad (8)$$

где  $\nu$  - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;

$V$  - скорость движения частицы, м/с;

$V_p$  - скорость движения жидкости, м/с;

$a$  - радиус частицы, м.

При ориентировочной скорости движения частицы  $V=1$  мм/с, размере частицы  $a=50$  мкм,  $\nu=2,5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с (подсолнечное масло при  $t=50$  °С) формула (8) дает значение числа Рейнольдса  $Re=0,002$ . Такое значение числа Рейнольдса дает основание рассчитывать силу сопротивления вязкой жидкости движению частицы, которая имеет форму сферы по следующей формуле [5]:

$$\vec{F}_c = 6\pi\eta a (\zeta - \vec{V}_p) \left( 1 + \frac{3a|\vec{V} - \vec{V}_p|}{8\nu} \right), \quad (9)$$

где  $\eta$  - динамическая вязкость, Па·с;

Оценим произведение, которое стоит в правых скобках формулы (9). Для выше принятых значений радиуса частицы и

кинематической вязкости жидкости это произведение равно 1,00075. Это позволяет упростить выражение (9) для силы сопротивления жидкости и тогда уравнение движения имеет вид

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} + \frac{9\eta}{2a^2\rho} \left( \frac{d\vec{r}}{dt} - \vec{V}_p \right) - \frac{3}{4\pi a^3 \rho} \vec{F} = 0, \quad (10)$$

где  $r$  - радиус - вектор, м;

$\rho$  - плотность вещества частицы, кг/м<sup>3</sup>.

Уравнение (10) является нелинейным уравнением второго порядка. В общем случае такое уравнение не имеет аналитического решения, но для некоторых векторных функций  $F(r)$  оно может быть сведено к линейному уравнению с постоянными коэффициентами. Для анализа поля сил, которые действуют на незаряженную поляризуемую частицу в бегущем электрическом поле на основании формул (2)...(6), была построена топология поля с помощью программных средств MATLAB (рис. 1).

При построении модели действующее значение потенциалов принималось  $U=1$  В, размер области  $h=1$  м. Анализ полей в элементарной межэлектродной области показал, что существует соотношение размеров области, при котором средняя сила будет максимальной. Отношение расстояния между рядами электродов к расстоянию между электродами в ряду лежит в интервале от 0,2 до 1 при движении бегущего поля вдоль рядов электродов [6].

Рассмотрим случай, когда частица находится в области, где  $X$  - составляющая силы равняется 0. Эта область лежит вдоль линии  $X=0$ . В связи с этим частица будет двигаться только под действием  $Y$  - составной силы. Вообще величина этой составляющей может зависеть от координаты  $Y$ , поэтому рассмотрим вид зависимостей силы от координаты  $Y$  для четырехфазной системы электродов со сдвигом фаз между потенциалами противоположных электродов при соотношении размеров 0,5 (рис. 1).

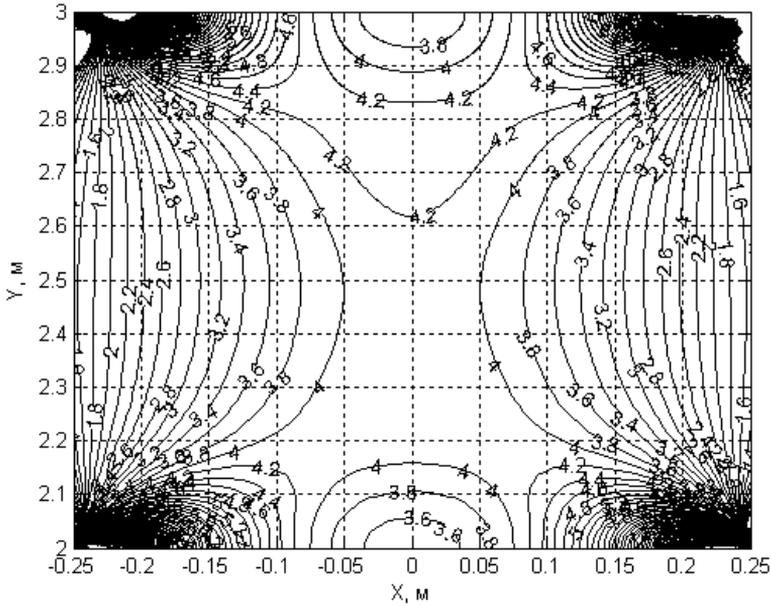


Рисунок 1 - Поле  $Y$  - составляющей силы при соотношении размеров межэлектродной области  $l/h = 0,5$

Такая система напряжений и размеры области позволяют получить максимальную среднюю силу [6]. Эти зависимости имеют вид периодической функции (рис. 2).

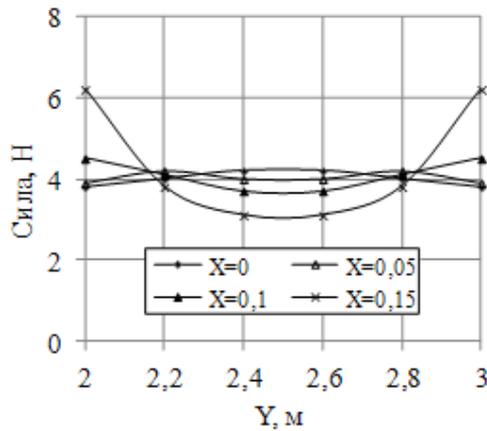


Рисунок 2 - Зависимости  $Y$  - составляющей силы от координаты  $Y$

В центре области для  $X=0$  величина переменной составляющей по отношению к постоянной не превышает 0,05 при средней величине силы 4 Н.

Поэтому в первом приближении принимаем  $F^*=4$ . Тогда при произвольных действующих значениях потенциалов электродов  $U$  и размерах области  $h=1$  величина силы будет

$$F_y = F^* \frac{A \cdot U^2}{h^3}. \quad (11)$$

Ввиду принятых допущений, уравнение движения (10) может быть записано в виде

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{9\eta}{2a^2 \rho} \frac{dy}{dt} = \frac{3F^*}{4\pi a^3 \rho} \frac{A \cdot U^2}{H^3}. \quad (12)$$

Уравнение (12) представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами и правой частью.

Решение такого уравнения состоит из общего решения соответствующего уравнения без правой части и частного решения. Искомое решение есть

$$y = \frac{V_0 - C_3}{\gamma} e^{\gamma t} + y_0 - \frac{V_0 - C_3}{\gamma} + C_3 t,$$

$$C_3 = \frac{F^* A U^2}{6\pi \eta H^3},$$

$$\gamma = -\frac{9\eta}{2a^2 \rho}. \quad (13)$$

Исходя из формулы (11) сила, которая действует на частицу, прямо пропорциональна квадрату напряжения и обратно пропорциональна кубу размера межэлектродной области. К тому же величина электрического поля прямо пропорциональна на-

пряжению и обратно пропорциональна размеру. Вследствие этого появляется возможность увеличить силу, которая действует на частицы при неизменной напряженности поля за счет уменьшения размеров межэлектродной области и тем самым повысить скорость движения частиц.

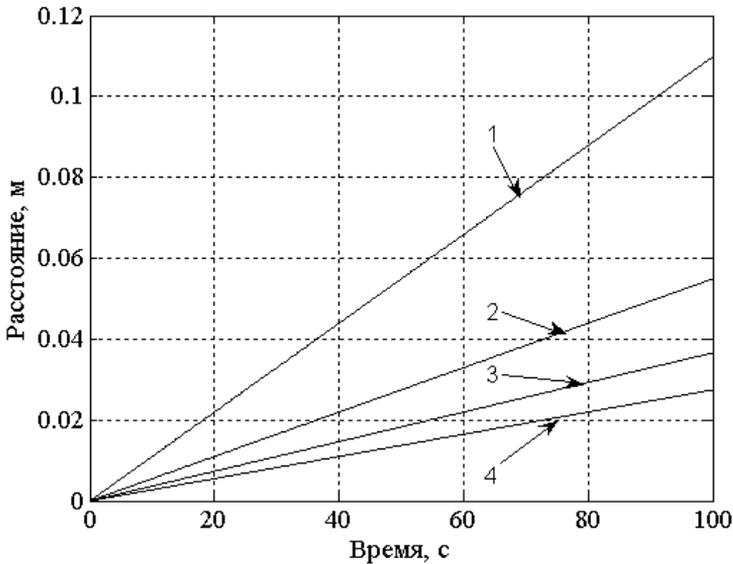


Рисунок 3 - Зависимости Y - координаты частицы от времени при: 1 -  $U = 2$  кВ,  $h = 2$  мм; 2 -  $U = 4$  кВ,  $h = 4$  мм; 3 -  $U = 6$  кВ,  $h = 6$  мм; 4 -  $U = 8$  кВ,  $h = 8$  мм

Это заключение подтверждается результатами математического моделирования движения частицы радиусом  $a=50$  мкм в бегущем электрическом поле, которое создается четырехфазными электродами (рис. 3.). Графики построены для  $\epsilon=2,1 \cdot 10^{-11}$  Ф/м,  $\epsilon_i=2,5 \cdot 10^{-11}$  Ф/м,  $\sigma_c=10^{-8}$  См/м,  $\sigma_i=10^{-7}$  См/м,  $\eta=0,022$  Па·с,  $\rho=895$  кг/м<sup>3</sup>,  $\omega=1800$  рад/с (суспензия подсолнечного шрота в олеиновой кислоте).

**Вывод.** Применение бегущего электрического поля в устройствах очистки слабопроводящих суспензий позволяет увеличить силу, которая действует на поляризуемые частицы путем уменьшения размеров межэлектродной области при не-

изменной напряженности электрического поля, что приводит к увеличению скорости движения частицы.

При этом уменьшаются удельные расходы энергии за счет уменьшения времени, необходимого на очистку суспензии.

#### ЛІТЕРАТУРА

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. 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.

4. 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.

5. Ландау Л. Д. Теоретическая физика : в 10-ти т. : учеб. пособие для физ. спец. ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - М. : Наука, 1973. - Т. 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. - М.: Наука, 1988. - 736 с.

6. Назаренко І. П. Теоретичне обґрунтування геометричних параметрів багатофазних електродних систем електросепараторів слабопровідних суспензій / І. П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання / ТДАТУ.- Мелітополь, 2013. - Вип. 13, т. 2. - С. 75-82.

#### BIBLIOGRAPHY

1. Efendiev O. F. Electrical cleaning in food industry/ O.F.Efendiev. - M.: Pishchevaya promishlennost', 1977. -149s.

2. Bologa M. K. Refining of sunflower oilin electrical field: monograph / M. K. Bologa, I. I. Berill; AN Respubliki Moldova, Institut prikladnoy fiziki. - Moldova: Stinta, 2004.-214 s.ill.

3. Nazarenko I. P. Theoretical research of electrical field interaction with dielectrical suspensions in multielectrode systems / I. P. Nazarenko // Pratsi Tavriiskogo derzhavnogo agrotehnologichnogo universytetu: nauk. fah.vydannya / TDATU.- Melitopol, 2012. - Vyp. 12, t. 1. - S. 35-45.

4. Nazarenko I. P. Electrophysical properties determination of dielectrical suspensions / I. P. Nazarenko, M. O. Rubtsov // Pratsi Tavriiskogo derzhavnogo agrotehnologichnogo universytetu: nauk. fah.vydannya / TDATU.- Melitopol, 2011. - Vyp. 11, t. 3. - S. 167- 175.

5. Landau L.D. Theoretical physics: v 10-ti t.: uchebnoe posobie dlya fiz. spets. un-tov / L. D. Landau, E. M. Lifshits. - M.: Nauka, 1973. - T. 6. Gidrodinamika / L. D. Landau, E. M. Lifshits - M.: Nauka, 1988. - 736 s.

6. Nazarenko I. P. Theretical substantiation of geometrical parameters of multiphases electrode systems of soft conductive suspensions electrostatic separators / I. P. Nazarenko // Pratsi Tavriiskogo derzhavnogo agrotehnologichnogo universytetu: nauk. fah.vydannya / TDATU.- Melitopol, 2013. - Vyp. 13, t. 2. - S. 75-82.

## **PURIFICATION OF DIELECTRIC SUSPENSIONS IN TRAVELING ELECTRIC FIELD**

I. P. Nazarenko

### *Summary*

It is shown that on the basis of mathematical model of the force field in a cylindrical electrode multi-row system and the equations of motion of suspended particles in the interelectrode space, the application of the traveling electric field in the purification and separation devices of dielectric suspensions allows to increase the forces exerted on polarized particles in suspension. Reducing the size of the interelectrode space permits to decrease the specific energy consumption for purification processes of dielectric suspensions.

**Key words:** purification, dielectric suspensions, traveling electric field, electrode.