

## ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СЕПАРАЦИИ ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА В БЕГУЩЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

О. Н. Берека, И. П. Назаренко

**Аннотация.** В работе обоснована структура электротехнологического комплекса сепарации подсолнечного масла в бегущем электрическом поле. Разработаны элементы комплекса: источник питания, измерительная камера; технологический блок. Представлены результаты испытаний в производственных условиях.

**Ключевые слова:** электротехнологический комплекс, электрическое поле, сепарация, подсолнечное масло, электрод.

В технологиях производства подсолнечного масла для очистки от нежировых примесей в основном применяются механические методы, такие как фильтрация и центрифугирование. Эти методы имеют большие энерго- и ресурсозатраты. В связи с этим, перспективной является электрическая сепарация масла. Малая электропроводность масла позволяет проводить процесс при малых энергозатратах, тем самым обеспечивая высокую эффективность [1, 2]. Тем не менее, разработанные методы и технические средства электрической очистки обладают серьезными недостатками, ограничивающими широкое их применение в процессах очистки и сепарации, как подсолнечного масла, так и других жидкостей. Эти недостатки связаны с применением постоянного напряжения для создания электрического поля большой напряженности. При этом используют электрофоретический эффект, позволяющий осаждать частицы взвеси на электроды. Такой подход требует очистки электродов, как в периодическом режиме, так и в непрерывном. Кроме этого,

осевшие на электроды частицы заряжаются и отрываются от поверхности электродов, создавая турбулентные течения, что приводит к срыву процесса.

Применение диэлектрофореза в сильно неоднородном пульсирующем поле позволяет только частично решить задачу. Накопление частиц на электродах, расположенных достаточно близко, приводит к возникновению «мостиков» между электродами и срыву процесса. Поэтому такие устройства могут работать только в периодическом режиме с частой промывкой электродных систем.

Более эффективным является применение бегущего электрического поля. В таком поле, кроме силы, направленной в сторону электродов (максимальной напряженности) возникает сила, направленная вдоль линии распространения бегущего поля, то есть вдоль рядов электродов. Эта сила позволяет организовать направленное движение частиц взвеси таким образом, чтобы они сосредоточились на одном из краев рядов электродов.

В общем случае на поляризованную частичку в неоднородном электрическом поле действует сила и момент [3]

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

где  $\vec{F}$  - сила, Н;

$\vec{M}$  - момент, Н·м;

$\dot{A}$  - комплексный параметр, Н·м<sup>3</sup>/В<sup>2</sup>;

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

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

$a$  - радиус частицы, м;

$\omega$  - угловая частота, рад/с;

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

$\overline{\vec{E}}$  - сопряженный комплекс вектора  $\dot{\vec{E}}$ , В/м.

В соответствии с формулами (1) в пульсирующем поле

$$\vec{F} = Re \left( Re(\dot{A}) \left( \overline{E}_x \frac{\partial \dot{E}}{\partial x} + \overline{E}_y \frac{\partial \dot{E}}{\partial y} + \overline{E}_z \frac{\partial \dot{E}}{\partial z} \right) \right), \quad (2)$$

в бегущем поле

$$\vec{F} = Re \left( i \cdot Im(\dot{A}) \left( \overline{E}_x \frac{\partial \dot{E}}{\partial x} + \overline{E}_y \frac{\partial \dot{E}}{\partial y} + \overline{E}_z \frac{\partial \dot{E}}{\partial z} \right) \right), \quad (3)$$

в однородном вращающемся поле

$$\vec{M} = 2 Im(\dot{A}) E^2. \quad (4)$$

Исследование функциональных зависимостей для силы (3) и момента (4) на экстремум показало, что она имеют максимальное значение при угловой частоте

$$\omega = \frac{\sigma_q + 2\sigma_c}{\varepsilon_q + 2\varepsilon_c}. \quad (5)$$

Поэтому для эффективной работы электросепараторов, в которых используется бегущее электрическое поле, требуется определять частоту, соответствующую максимальной силе.

Из приведенного теоретического анализа следует, что электротехнологический комплекс электрической очистки и сепарации должен включать в себя многофазный высоковольтный источник питания регулируемой частоты и напряжения, технологический блок с электродной системой, создающей бегущее поле и устройство для определения частоты поля, оптимальной для

суспензии, подлежащей очистке. На рис. 1 показана структура разработанного комплекса.



Рис.1. Структурная схема электротехнологического комплекса

Источник питания включает в себя персональный компьютер, который реализует функцию двухфазного генератора регулируемой частоты и напряжения с произвольным сдвигом фаз, блок усиления и трансформаторный блок с четырьмя однофазными высоковольтными трансформаторами. Персональный компьютер с программными средствами «Авангард», позволил осуществить функции низкочастотного двухканального генератора в диапазоне частот от 0 до 20 кГц. Сигнал одного из каналов может произвольно сдвигаться по фазе относительно другого. Таким образом, с помощью персонального компьютера реализовывались функции генератора и фазовращателя. Симметричная четырехфазная система напряжений была получена от несимметричной двухфазной системы с помощью четырех трансформаторов. При запуске одновременно двух генераторов (повторный запуск программы) были получены независимые сигналы разных частот, что позволило создать два встречно вращающихся поля.

В усилительном блоке установлены два операционных усилителя общей мощностью 280 Вт, трансформатор питания усилителей, аппаратура управления и защиты, измерительные приборы.

Для создания бегущего поля в технологическом блоке установлена многорядная система из 256 цилиндрических электродов (рис. 2), на которые

подавалось четырехфазное напряжение. Объем технологического блока - 2 дм<sup>3</sup>.

Моделирование электрического поля и поля сил методом комплексного потенциала позволило определить геометрические параметры системы электродов, при которых средняя сила в межэлектродной области имеет максимальное значение. Отношение расстояния между рядами к расстоянию между электродами в ряду должно составлять величину от 0,2 до 0,6 для четырехфазной системы напряжений при его подаче без сдвига фаз между потенциалами противоположных электродов [4].



Рис. 2. Технологический блок

Измерительное устройство предназначено для определения частоты поля, соответствующей максимальной силе (моменту), действующей на частицы. Для ее определения в соответствии с формулой (5) в измерительном устройстве (рис. 3) создавалось два встречно вращающихся поля разной частоты. При определенных значениях напряжения на электродах каждой из частот, частицы взвеси будут находиться в состоянии покоя. Тогда частоту, соответствующую максимальному моменту, можно определить по формуле

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_1 - \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \omega_2}{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \omega_2 - \omega_1}} \omega_1 \omega_2. \quad (6)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  - угловые частоты встречно вращающихся полей, рад/с;

$U_1, U_2$  - напряжения на электродах, которые отвечают системам, создающим встречно вращающиеся поля с угловой частотой  $\omega_1$  и  $\omega_2$  соответственно, В.

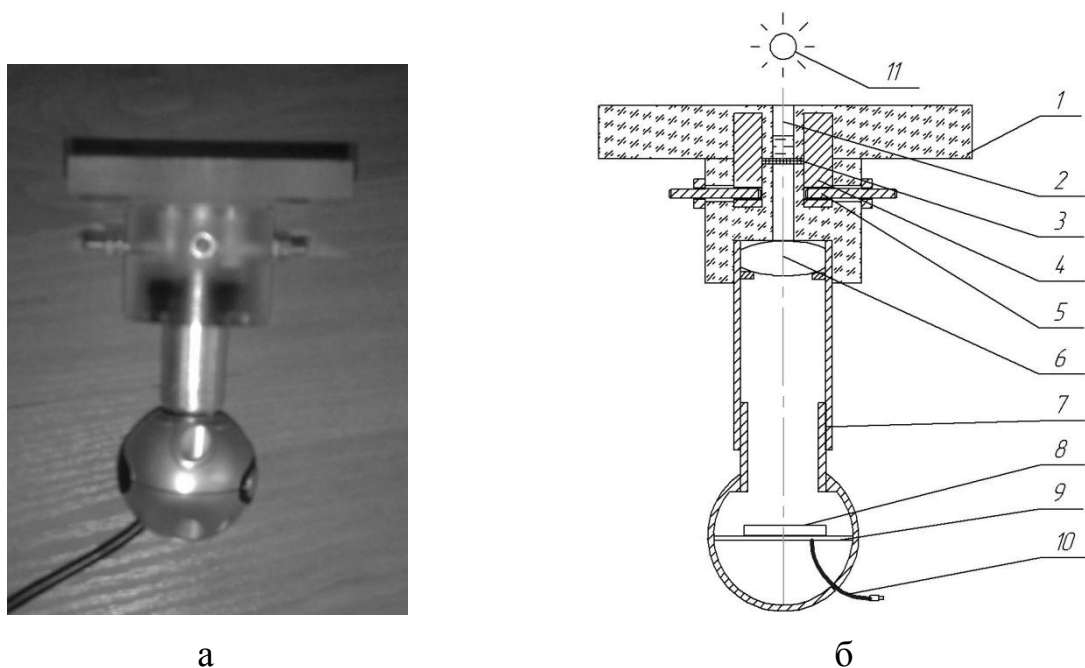


Рис. 3. Общий вид измерительного устройства (а) и его схема (б): 1 - электродная камера; 2 - отверстие с суспензией, которая исследуется; 3 - стеклянное дно; 4 - цилиндрические электроды; 5 - контактные винты с гайками; 6 - линза; 7 - подвижное резьбовое соединение для фокусировки; 8 - ПЗС - матрица; 9 - плата ПЗС - матрицы; 10 - кабель соединения с USB - портом компьютера; 11 - источник света

Измерительное устройство (рис. 3) состоит из электродной камеры 1, которая имеет отверстие 2 со стеклянным тонким дном 3. В отверстие наливается суспензия, которая исследуется. Камера имеет четыре цилиндрических электрода 4, расположенных симметрично вокруг отверстия. На электроды подается четырехфазное высокое напряжение через контактные винты 5. Под действием вращающегося электрического поля частицы суспензии вращаются, а, если создать встречно вращающееся электрическое поле другой частоты, то можно подобрать такую величину напряжения встречного поле, при которой частица прекратит свое вращательное движение. Для ви-

зуализации этого процесса через жидкость пропускается свет от источника 11. Изображение дисперсных частиц с помощью линзы 6 и подвижного резьбового соединения 7 фокусируется на поверхность ПЗС - матрицы 8. Плата ПЗС - матрицы 9 с помощью кабеля 10 соединяется с USB - портом компьютера, на мониторе которого фиксируется изображение частиц суспензии.

Электротехнологический комплекс прошел испытания в производственных условиях на предприятиях Запорожской и Николаевской областей Украины. Предварительно были исследованы энергетические показатели технологического блока, который является активно-емкостной нагрузкой для источника питания. На величину активной составляющей нагрузки прежде всего влияет температура и концентрация примесей. Определение степени влияния этих факторов на величину электропроводности важно для обеспечения нормальной работы источника питания и согласования сопротивлений усилителя и нагрузки.

Для получения зависимости, которая связывает значение функции отклика с входными факторами, применено планирование эксперимента первого порядка. При использовании стандартной методики построения планов первого порядка были составлены матрицы планирования эксперимента, рассчитаны коэффициенты регрессии, модель проверена на адекватность.

Было получено уравнение регрессии в кодированных единицах

$$Y = 29,15 + 1,90x_1 + 10,69x_2, \quad (7)$$

где  $x_1$  - концентрация нежировых примесей;

$x_2$  - температура.

Из уравнения регрессии и рис. 4 следует, что наиболее существенное влияние на межфазную электропроводность технологического блока оказывает температура в интервалах варьирования от 20 до 50 °С. Интервал варьирования концентрации нежировых примесей - от 0,1 до 0,5 %.

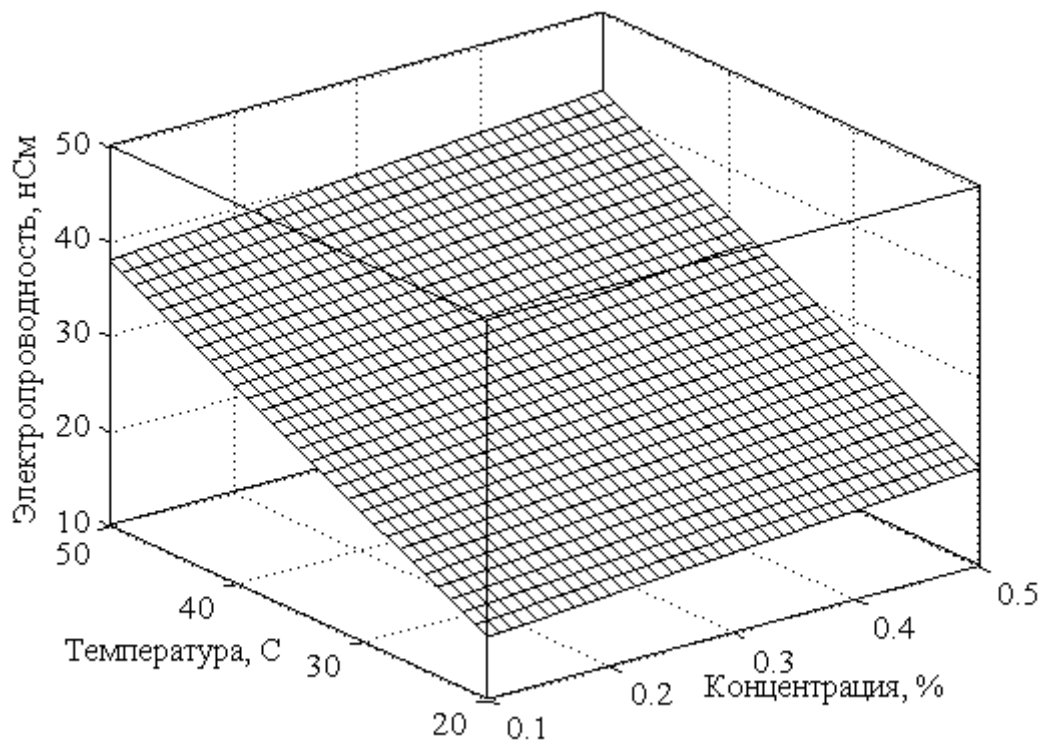


Рис. 4. Зависимость активной электропроводности от концентрации примесей и температуры подсолнечного масла

В производственных условиях определены электрофизические свойства подсолнечного масла и параметры системы напряжений, подаваемой на электроды технологического блока (таблица 1).

Таблица 1

Электрофизические свойства подсолнечного масла

Температура, °С	Удельная электропроводность, нСм/м	Частота, Гц	Пробивное напряжение, кВ	Рабочее напряжение, кВ
25	2,95	207	7,3	5,1
45	4,7	281	7,4	5,2

В качестве базы сравнения эффективности электротехнологического комплекса сепарации была принята технология, включающая очистку масла фильтр - прессом. В технологическую линию производства подсолнечного масла парал-



лельно фильтр - прессу подключался технологический блок, на который подавалось напряжение от источника питания. Технология получения подсолнечного масла позволила осуществить испытания при температуре масла 25 и 45 °С (таблица 2).

Таблица 2

Результаты испытаний электротехнологического комплекса сепарации подсолнечного масла

Температура, °С	Производительность, м <sup>3</sup> /час	Начальная концентрация, %	Конечная концентрация, %	Степень очистки, %	Мощность, технологического блока, Вт	Удельные энергозатраты, кВт·час/м <sup>3</sup>
25	0,1	1,1	0,045	95,9	9,45	0,095
45	0,1	1,1	0,020	98,2	15,12	0,152

Производственная проверка показала, что остаточное содержание нежировых примесей и удельные энергозатраты зависят от температуры подсолнечного масла. При изменении температуры от 25 до 45 °С остаточное содержание нежировых примесей уменьшается с 0,045 до 0,02 % при увеличении удельных энергозатрат с 0,095 до 0,152 кВт·час/м<sup>3</sup>. Разработанный комплекс имеет большую эффективность по отношению к базе сравнения - фильтр-прессу ФПР-16, удельные энергозатраты которого - 1,72 кВт·час/м<sup>3</sup> при остаточном содержании нежировых примесей - 0,03 %.

### 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. 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. 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.

## **ELECTRO-TECHNOLOGICAL COMPLEX OF SEPARATION OF SUNFLOWER-SEED OIL IN THE MOVING ELECTRIC FIELD**

**Bereka O. N., Nazarenko I. P.**

**Annotation.** In work the structure of electro-technological complex of separation of sunflower-seed oil in the moving electric field is grounded. The elements of complex are developed: power supply, measuring chamber; technological block. The results of tests in the terms of productions are presented.

**Keywords:** electro-technological complex, electric field, separation, sunflower-seed oil, electrode.