

УДК66.086.2

## ОЧИСТКА И СЕПАРАЦИЯ ПОДСОЛНЕЧНОГО МАСЛА В БЕГУЩЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

И. П. Назаренко

## ОЧИЩЕННЯ ТА СЕПАРАЦІЯ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ В БІЖУЧОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

І. П. Назаренко

## PURIFICATION AND SEPARATION OF SUNFLOWER-SEED OIL IS IN THE MOVING ELECTRIC FIELD

I. Nazarenko

*Представлені результати експериментальних досліджень по очищенню і сепарації соняшникової олії в біжучому електричному полі. Обґрунтовані технологічні параметри процесу (величина напруги, що подається на багаторядну систему електродів; частота; час), які забезпечують ефективно очищення масла від нежирових домішок і гідратованих фосфатидів, а також їх розділення в двох зустрічно біжучих полях.*

*Ключові слова: електрика, поле, напруга, очищення, сепарація, олія, електрод, діелектрик, фосфатиди.*

*Представлены результаты экспериментальных исследований по очистке и сепарации подсолнечного масла в бегущем электрическом поле. Обоснованы технологические параметры процесса (величина напряжения, подаваемого на многорядную систему электродов; частота; время), которые обеспечивают эффективную очистку масла от нежировых примесей и гидратированных фосфатидов, а также их разделение в двух встречно бегущих полях.*

*Ключевые слова: электричество, поле, напряжение, очистка, сепарация, масло, электрод, диэлектрик, фосфатиды.*

### 1. Введение

Для очистки и сепарации подсолнечного масла применяется гравитационное отстаивание, центрифугирование и фильтрация. Как показал анализ, эти методы имеют существенные недостатки: большую энергоёмкость для центрифугирования и фильтрации; низкие качественные показатели для гравитационного отстаивания; избирательность применения в зависимости от плотности жидкости и частиц для центрифугирования и гравитационного отстаивания; возможность разделения взвешенных частиц только по признакам плотности и размера для гравитационного отстаивания, центрифугирования и фильтрации.

Современное развитие систем очистки подсолнечного масла направлено на усовершенствование существующих и разработку новых методов и технических средств, обладающих минимальными энерго- и ресурсозатратами на осуществление процесса, повышение технологичности, обеспечение экологической чистоты и возможности разделения ценных компонентов, которые извлекаются из масла при рафинации для их дальнейшего использования. В связи с этим, перспективным методом является очистка подсолнечного масла в электрическом поле. Малая электропроводность масла позволяет подавать на электродные системы высокое напряжение, обеспечивая при этом высокую эффективность очистки при малых энергозатратах.

Сложность применения устройств очистки и сепарации подсолнечного масла в электрическом поле predetermined нестабильностью электрофизических свойств, как дисперсной фазы, так и дисперсионной среды масла, непредвиденностью процесса накопления примесей на электродах, которая приводит к срыву процесса, и др. Исследование процессов очистки и разработка технологий и технических средств в основном были направлены на использование постоянного напряжения. Закономерности очистки масла в бегущем электрическом поле исследованы недостаточно, хотя применение такого поля позволяет устранить многие недостатки существующих методов электроочистки в приложении к технологии производства подсолнечного масла.

## **2. Анализ литературных данных**

Разработанные методы и технические средства электроочистки подсолнечного масла от нежировых примесей, основываются на электрофоретическом взаимодействии частиц примесей с электрическим полем, и силе, которая действует на поляризованные частицы в неоднородном поле [1, 2]. Они обладают рядом недостатков: накопление зарядов вблизи электродов при малой электропроводности частиц приводит к уменьшению поля в межэлектродном пространстве; перезарядка частиц с большой электропроводностью на электроде приводит к их отрыву и возникновению турбулентных течений в приэлектродной области [3]. Для повышения эффективности очистки подсолнечного масла от фосфатидов разработаны технология и электросепаратор, в котором постоянное электрическое поле интенсифицирует процесс коагуляции гидратированных фосфатидов с последующим выпадением их в осадок [4]. Тем не менее, в масле остается достаточно большое количество мелких несоагулированных частиц, которые тяжело удаляются гравитационным осаждением.

Общим недостатком известных устройств электроочистки слабопроводящих суспензий является необходимость удаления накопленных на осадительных электродах частиц [5]. Применение бегущего электрического поля позволяет избежать этого благодаря дополнительной силе, возникающей в таком поле, которая зависит от удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости, как среды, так и частиц [6, 7]:

$$\vec{F} = 4\pi\epsilon_c a^3 \operatorname{Re} \left[ i \frac{(\epsilon_c - \epsilon_c) \left( \frac{\sigma_c}{\omega} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega} \right) - (\epsilon_c + 2\epsilon_c) \left( \frac{\sigma_c}{\omega} - \frac{\sigma_c}{\omega} \right)}{(\epsilon_c + 2\epsilon_c)^2 + \left( \frac{\sigma_c}{\omega} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega} \right)^2} \times \right. \\ \left. \times \left( \bar{E}_x \frac{\partial \dot{E}}{\partial x} + \bar{E}_y \frac{\partial \dot{E}}{\partial y} + \bar{E}_z \frac{\partial \dot{E}}{\partial z} \right) \right], \quad (1)$$

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

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

$a$  – радиус частицы, м;

$\omega$  – угловая частота, рад/с;

$\dot{E}$  – комплекс вектора напряженности электрического поля, В/м.

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

Под действием этой силы частички движутся вдоль электродов, создающих бегущее поле, и сосредотачиваются в крайней области, что позволяет их выгружать в непрерывном режиме работы устройства.

Таким образом, повышение эффективности технологии производства подсолнечного масла требует решения научно-прикладной проблемы разработки научно - технических основ создания и применения технических средств очистки и сепарации масла в бегущем электрическом поле высокой напряженности.

### 3. Цель и задачи исследований

Целью исследований является обоснование технологических параметров процессов очистки и сепарации подсолнечного масла от нежировых примесей и гидратированных фосфатидов в бегущем электрическом поле.

Для достижения поставленной цели необходимо установить:

– экспериментальные зависимости степени очистки подсолнечного масла от нежировых примесей и гидратированных фосфатидов;

– экспериментальные зависимости коэффициента разделения нежировых примесей от гидратированных фосфатидов подсолнечного масла.

### 4. Обоснование технологических параметров процессов очистки и сепарации в электрическом поле

Процесс очистки и сепарации в бегущем электрическом поле определяется величиной напряжения, подаваемого на электроды технологического блока, частотой напряжения, которая зависит от электрофизических свойств масла, и временем.

#### **4. 1. Условия проведения экспериментов**

Исследования проводились на экспериментальной установке, состоящей из четырехфазного высоковольтного источника питания переменного тока и камеры с электродами (рис. 1). Источник питания включает в себя двухфазный генератор регулируемой частоты с произвольным сдвигом фаз, усилитель и повышающие трансформаторы. В качестве генератора использовался персональный компьютер с программными средствами «Авангард», которые позволили 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) можно получить независимые сигналы разных частот, что дает возможность создания двух встречно бегущих полей.

Для создания бегущего электрического поля применялись цилиндрические электроды, расположенные рядами. На рис. 1 показаны только верхние электроды каждого из рядов.

Стенки камеры (рис. 2) выполнены из оргстекла. Объем камеры составляет  $150 \text{ см}^3$ . В камере содержится десять рядов цилиндрических электродов диаметром 1,6 мм по девять электродов в ряду. Расстояние между осями электродов составляет 6 мм. Электроды вмонтированы в стенку камеры таким образом, чтобы соединение электродов между рядами осуществлялось с помощью соединительной шины, как показано на рис. 1. Половина электродов каждого ряда имеют вывод для подключения высоковольтного провода через эпоксидную изоляцию с одной стороны камеры, а вторая половина – с противоположной стороны. Такая конструкция позволяет выполнять схему подачи напряжения на электроды, как без сдвига фаз между потенциалами противоположных электродов, так и со сдвигом фаз.

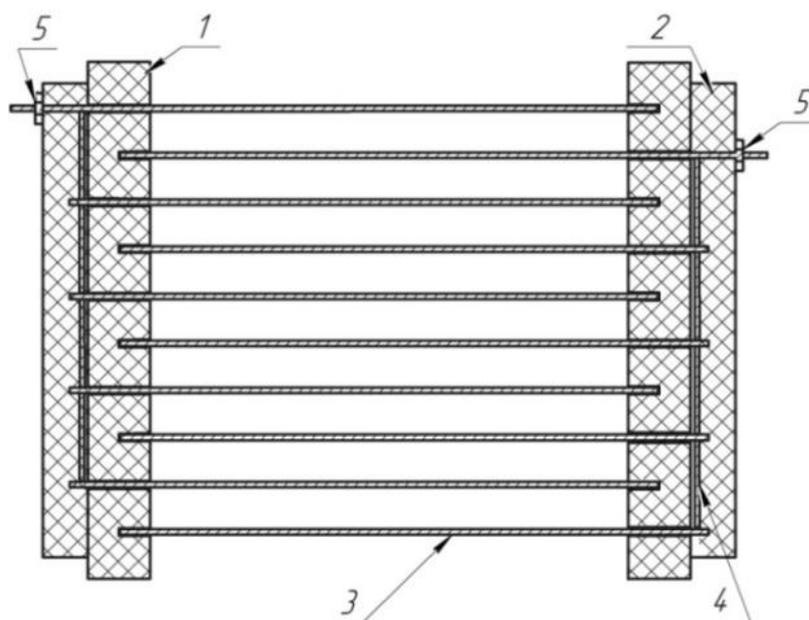


Рис. 1. Электродная система камеры: 1 – стенка камеры; 2 – эпоксидная изоляция; 3 – цилиндрический электрод; 4 – соединительная шина; 5 – выводы для подачи напряжения

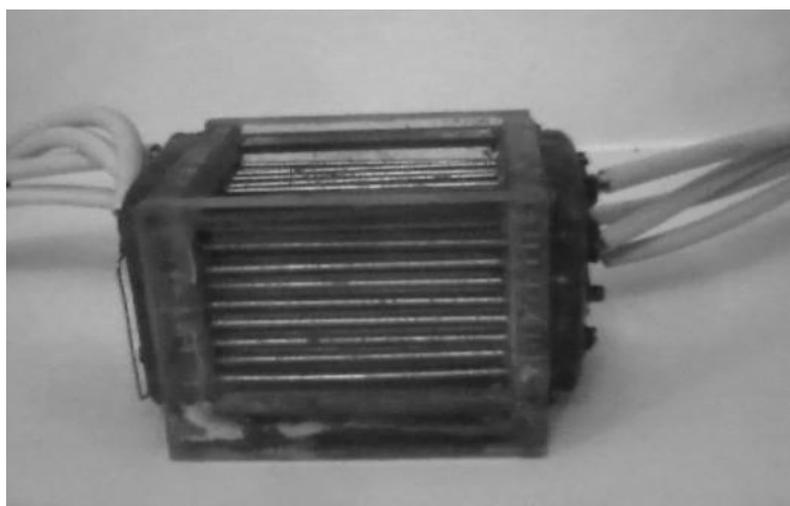


Рис. 2. Общий вид камеры

Для проведения исследований использовалось нефильрованное подсолнечное масло. Такое масло включает в себя сопутствующие вещества и нежировые примеси: обрывки клеток; органическую и минеральную пыль, фосфатиды, пескообразные вещества и др. Электрическая очистка направлена на удаление нежировых примесей и фосфатидов. Обрывки клеток не связаны с жидкостью и поэтому не нуждаются в дополнительной обработке, они могут удаляться непосредственно под воздействием сил электрического поля. Для удаления фосфатидов проводилась их гидратация. Количество воды, необходимое для проведения этого процесса, определялось экспериментально.

При очистке масла от нежировых примесей и гидратированных фосфатидов действующее фазное напряжение на электродах устанавливалось на уровне 5000 В. При разделении этих фракций в камере создавались два встречно бегущих поля путем подачи на электроды двух систем напряжений

разных частот с противоположным чередованием фаз. Напряжение каждой из систем напряжений составляло 2500 В. Величины напряжений определялись экспериментально из условия отсутствия разрядов.

Исследование функции (1) на экстремум показало, что она имеет максимальное значение при угловой частоте

$$\omega = \frac{\sigma_u + 2\sigma_c}{\varepsilon_u + 2\varepsilon_c}. \quad (2)$$

Поэтому, предварительно были определены электрофизические свойства дисперсной фазы подсолнечного масла: удельная электропроводность частиц нежировых примесей –  $8,2 \cdot 10^{-8}$  См/м; их диэлектрическая проницаемость –  $4,9 \cdot 10^{-11}$  Ф/м; удельная электропроводность частиц гидратированных фосфатидов –  $8 \cdot 10^{-8}$  См/м; их диэлектрическая проницаемость –  $12 \cdot 10^{-11}$  Ф/м. Эти показатели определялись по методике, изложенной в [8] без извлечения частиц из среды. Определены удельная электропроводность и диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды при различном содержании воды (табл. 1). По формуле (2) рассчитана угловая частота, соответствующая максимальной силе, действующей на частицы.

При исследованиях процесса очистки подсолнечного масла от фосфатидов из масла предварительно были удалены центрифугированием клеточные и другие нежировые примеси. Затем в масло добавлялась кипяченая вода при температуре 80 °С, смесь тщательным образом перемешивалась и выдерживалась до начала процесса образования частиц фосфолипидных комплексов и выпадения в осадок крупных частиц комплексов и воды. После этого суспензия заливалась в камеру очистки.

Содержание нежировых примесей определялось по ДСТУ 5063:2008 [9], содержание фосфатидов – по ГОСТ 7824-80 [10].

В качестве критерия оценки качества очистки применен показатель «степень очистки», а качества сепарации – «коэффициент разделения». Эти показатели рассчитывались по формуле:

$$C = \frac{100(X_1 - X_2)}{X_1}, \quad (3)$$

где  $C$  – степень очистки (коэффициент разделения), %;

$X_1$  – массовое содержание частиц взвеси в суспензии до очистки или сепарации, %;

$X_2$  – массовое содержание частиц взвеси в суспензии после очистки или сепарации, %.

Таблица 1

Условия экспериментальных исследований процесса сепарации нежировых примесей и гидратированных фосфатидов подсолнечного масла

Содержа	Удельная	Диэлектрическ	Угловая	Угловая
---------	----------	---------------	---------	---------

ние воды, %	электропроводность, См/м	ая проницаемость, Ф/м	частота для нежировых примесей, рад/с	частота для фосфатидов, рад/с
0,3	$5 \cdot 10^{-9}$	$3,2 \cdot 10^{-11}$	814	4402
0,5	$8 \cdot 10^{-9}$	$3,25 \cdot 10^{-11}$	867	4410
1	$10,5 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^{-11}$	896	4414
1,5	$18 \cdot 10^{-9}$	$3,35 \cdot 10^{-11}$	1008	4470
2	$25,5 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$	1128	4527

#### 4.2. Обсуждение результатов исследования процессов очистки и сепарации масла

Результаты экспериментальных исследований по очистке подсолнечного масла от нежировых примесей (рис. 3) показывают, что для достижения степени очистки 98 % достаточно проводить процесс на протяжении 70 с.

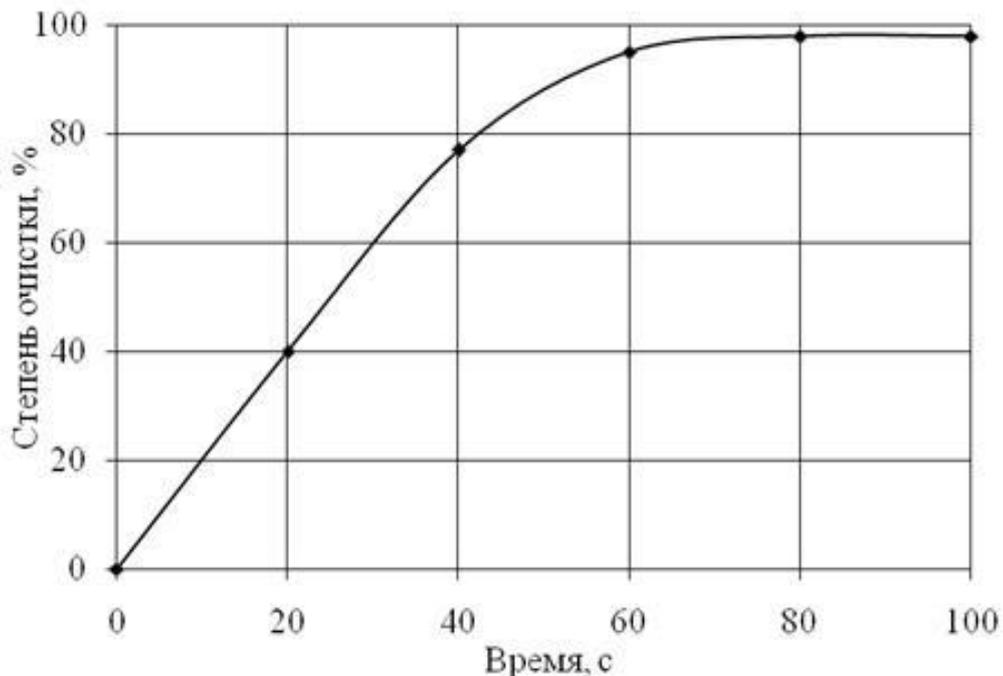


Рис. 3. Динамика очистки подсолнечного масла от нежировых примесей

Из результатов экспериментальных исследований процесса очистки масла от гидратированных фосфатидов в бегущем электрическом поле (рис. 4) следует, что увеличение содержания воды более 1,5 % не приводит к повышению степени очистки, кроме того, существенно снижается напряжение пробоя масла. Получена степень очистки 75 % и 73 % для содержания воды 1,5 и 2 % соответственно за 70 с проведения процесса. Сравнительно низкая степень очистки масла от фосфатидов связана с неполной гидратацией некоторых видов фосфатидов.

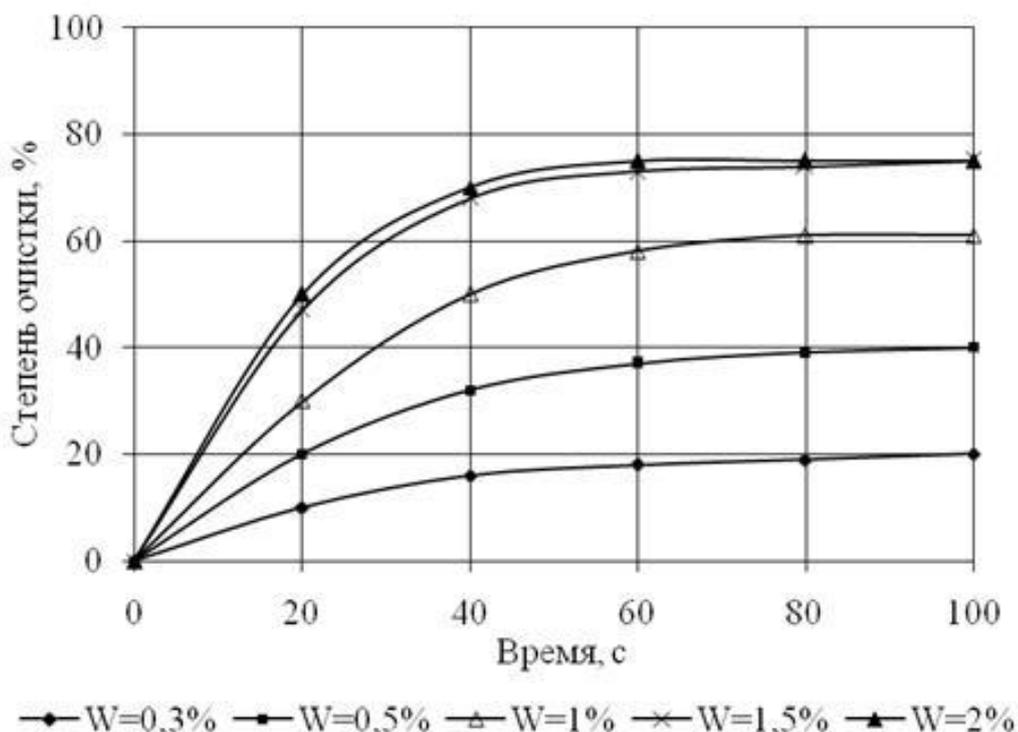


Рис. 4. Динамика очистки подсолнечного масла от гидратированных фосфатидов при разном содержании воды

Для разделения нежировой и фосфатидной фракций гидратация масла осуществлялась при содержании воды 1,5 %. Процесс гидратации проводился таким же образом, как и в предыдущем опыте, но из масла не удалялись нежировые (клеточные) примеси. Дисперсная фаза главным образом была представлена двумя фракциями: нежировыми примесями и гидратированными фосфорсодержащими частицами. Результаты разделения фракции гидратированного масла (рис. 5) показывают, что коэффициент разделения несколько меньше соответствующих степеней очистки фракций, но эта разница небольшая – до 8 %.

Время проведения процесса разделения в сравнении с процессами очистки увеличивается и достигает 300 с для разделения обеих фракций. Большее время разделения связано с уменьшением в два раза величин напряжений (2500 В), создающих встречно бегущие поля с различными частотами. Суммарное же действующее напряжение, как и в экспериментах по очистке составляет 5000 В.

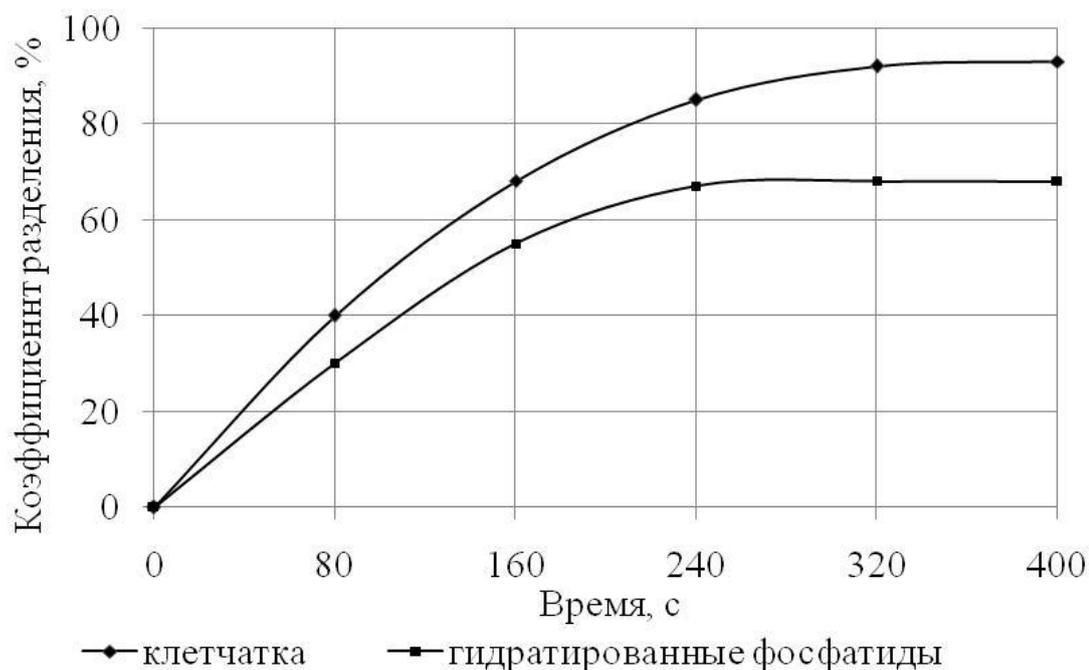


Рис. 5. Динамика разделения нежировых примесей и гидратированных фосфатидов подсолнечного масла

## 5. Выводы

Экспериментальные исследования показали возможность осуществления процессов очистки подсолнечного масла от нежировых примесей и фосфатидов, а также разделения этих фракций в бегущем электрическом поле.

Обоснованы технологические параметры процесса: время; напряжение и частота электрического поля.

Для обеспечения степени очистки подсолнечного масла от нежировых примесей не менее 98 % напряжение должно быть 5000 В, частота - 814 рад/с, время - 70 с. Для обеспечения степени очистки масла от фосфатидов не менее 75 % напряжение должно составлять 5000 В, угловая частота - 4470 рад/с, время - 70 с.

Для разделения нежировых примесей и фосфатидов время обработки должно быть не менее 300 с. При этом обеспечивается коэффициент разделения для нежировых примесей 90 %, а для фосфатидов - 67 %.

## Литература **!!+DOI**

1. Delgado, A. V. Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena [Text] / A. V. Delgado, F. Gonzales-Caballero, R. J. Hunter, L. K. Koopal, J. Lyklema // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 309. – P. 194–224. doi: 10.1016/j.jcis.2006.12.075.

2. Ahualli, S. A simple model of the high-frequency dynamic mobility in concentrated suspensions [Text] / S. Ahualli, A.V.Delgado, C. Grosse // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol. 301, Issue 2. – P. 660–667. doi: 10.1016/j.jcis.2006.05.042.

3. Грановский, М. Г. Электрообработка жидкостей (очистка топлив, масел, вод) [Текст] / М. Г. Грановский и др.; под ред. И. С. Лаврова. – Л.: Химия, 1976. – 216 с.
4. Болога, М. К. Рафинация подсолнечного масла в электрическом поле: монография [Текст] / М. К. Болога, И. И. Берилл. – АН Республики Молдова, Институт прикладной физики. – Молдова: Stinta, 2004. – 214 с.
5. Эфендиев, О. Ф. Электроочистка жидкости в пищевой промышленности [Текст] / О. Ф. Эфендиев. – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 149 с.
6. Назаренко, І. П. Теоретичні дослідження взаємодії електричного поля з діелектричними суспензіями в багатоелектродних системах [Текст] / І. П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання. – 2012. – Вип. 12, Т. 1. – С. 35–45.
7. Пат. 94810 Україна, МПК В 01D35/6. Спосіб електричної очистки діелектричних рідин [Текст] / І. П. Назаренко, В. А. Дідур (Україна). – № а 200911592; заявл. 13.11.2009; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.
8. Назаренко, І. П. Визначення електрофізичних властивостей діелектричних суспензій [Текст] / І. П. Назаренко, М. О. Рубцов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання. – 2011. – Вип. 11, Т. 3. – С. 167–175.
9. ДСТУ 5063:2008. Олії. Методи визначання нежирових домішок і відстою [Текст] / Увед. 01.04.2009. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 11 с.
10. ГОСТ 7824-80. Масла растительные. Методы определения фосфорсодержащих веществ [Текст] / Введ. 01.01.82. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 7 с.

### References !!+DOI

1. Delgado, A. V., Gonzales-Caballero, F. R., Hunter, J., Koopal, L. K., Lyklema, M. (2007). Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena. *Journal of Colloid and Interface Science*, 309, 194–224. doi: 10.1016/j.jcis.2006.12.075.
2. Ahualli, S., Delgado, A. V., Grosse, C. (2006). A simple model of the high-frequency dynamic mobility in concentrated suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 301 (2), 660–667. doi:10.1016/j.jcis.2006.05.042.
3. Granovsky, M. G. et al.; Lavrov, I. S. (Ed.) (1976). *Liquids Electro processing (purification of fuels, oils, water)*. Leningrad, Chemistry, 216.
4. Bologa, M. K., Beryl, I. I. (2004). *Sunflower oil refining in an electric field: monograph*. Academy of Sciences of the Republic of Moldova, Institute of Applied Physics. Moldova, Stinta, 214.
5. Efendiev, O. F. (1977). *Liquids electric purification in the food industry* / O. Efendiev. Moscow, Food Industry, 149.
6. Nazarenko, I. P. (2012). Theoretical study of the interaction of electric fields and dielectric suspensions in many electrode systems. *Proceedings of Tavria State Agrotechnological University*, 12, 35–45.

7. Nazarenko, I. P., Didur, V. A. (2009). Method of electrical purification of dielectric fluids. Pat. 94810 Ukraine, IPC B 01D35/6.

8. Nazarenko, I. P. (2011). Determination of electrical properties of dielectric suspensions. Proceedings of Tavria State Agrotechnological University, 3, 167–175.

9. DSTU 5063: 2008. (2009). Oils. Methods for determination of fat-free lean impurities and sediment. Kiev. State Committee of Ukraine, 11.

10. GOST 7824-80. (1982). Vegetable oils. Methods for determination of phosphorous. Moscow, Publishing of Standards, 7.

*Представлены результаты экспериментальных исследований по очистке и сепарации подсолнечного масла в бегущем электрическом поле. Исследования проводились на экспериментальной установке, которая представляет собой технологический блок и источник питания. В технологическом блоке расположена многорядная система цилиндрических электродов, создающих бегущее электрическое поле.*

*Показана возможность осуществления процессов очистки подсолнечного масла от нежировых примесей и фосфатидов и разделения этих фракций в бегущем электрическом поле. Обоснованы технологические параметры процесса: время; напряжение и частота электрического поля, которые позволяют получить степень очистки масла от нежировых примесей 98 %, а от гидратированных фосфатидов - 75 %. При сепарации этих фракций коэффициент разделения нежировых примесей достигает 90 %, а фосфатидов - 68 %.*

*Ключевые слова: электричество, поле, напряжение, очистка, сепарация, масло, электрод, диэлектрик, фосфатиды.*

Назаренко Игорь Петрович

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра электроснабжения сельского хозяйства

Таврический государственный агротехнологический университет

пр. Б. Хмельницкого 18, г. Мелитополь, Запорожская обл., Украина, 72312

Сведения о наличии печатных произведений в общегосударственных и международных базах данных: 34

Контактный тел.: (068) 7968132

E-mail: nazarenko-64@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6365-6777>

Назаренко Ігор Петрович

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра електропостачання сільського господарства

Таврійський державний агротехнологічний університет

пр. Б. Хмельницкого 18, м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна, 72312

Відомості про наявність друкованих творів у загальнодержавних та міжнародних базах даних: 34

Контактний тел.: (068) 7968132

E-mail: nazarenko-64@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6365-6777>

Igor Nazarenko

PhD, associate professor

Department of providing with electric power of agriculture

Tavria State Agrotechnological University,

V.Khmelnitsky Avenue, 18, Melitopol, Zaporizhia obl. Ukraine, 72312

For information about the availability of printed works in national and international databases: 34

Contact tel.: (068) 7968132

E-mail: nazarenko-64@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0001-6365-6777>

**Назаренко І. П.**

пр. 50 річчя Перемоги, 22<sup>В</sup>

Запорізька обл.

Мелітополь

72313