

М. К. Болога, И. А. Кожухарь, Ф. П. Гросу, В. И. Леу

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ОТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРИМЕСИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Институт прикладной физики АН РМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

**Состояние проблемы.** Очистка жидкостей от механической примеси имеет весьма широкое практическое применение [1–3] и необходимость ее реализации продиктована самыми различными причинами. Трансформаторное масло очищают с целью улучшения электрофизических параметров – понижения тангенса угла потерь, повышение пробивной прочности и долговечности работы [4]; растительные масла – для улучшения вкусовых качеств, продления срока сохранности, придания товарного вида [2]; машинное масло и моторное топливо – для уменьшения эрозии трущихся частей двигателей внутреннего сгорания и увеличения их ресурса [1]; органические растворители – для многократного использования [5]. В некоторых технологиях жидкость специально "загрязняют" диспергированием в ней другой нерастворимой жидкости или твердых частиц с целью адсорбции на них растворимых в исходной среде веществ с последующей сепарацией фаз, чем достигается очистка и от растворимых примесей [2]. Таким образом, процессы очистки (разделение фаз гетерогенных систем) находят применение в различных отраслях промышленности: энергетике, машиностроении, электротехнике, радиоэлектронике, нефтехимической технологии, пищевой промышленности.

Традиционные методы очистки, использующие отстаивание в гравитационном поле, центрифугирование, механические фильтры, обладают определенными недостатками. Скорость отстаивания чрезвычайно мала [3], а при больших объемах производства требует больших емкостей и площадей для их размещения, а следовательно и не малых капитальных вложений, а также затрат времени. Кроме того стойкие коллоидные растворы вообще не разделяются отстаиванием. Центрифугирование имеет ряд преимуществ перед отстаиванием, но одновременно требует сложной техники, и является энергоемким. Механические фильтры ограничивают очистку по размерам частиц, поскольку удаляются из жидкости только частицы, имеющие меньшие размеры, чем поры фильтра, требуют регенерации или замены фильтрующего материала и достаточного напора для преодоления сопротивления фильтрующих слоев. Поэтому проводится поиск новых методов, расширяющих возможности и устраняющих недостатки известных методов [1, 6–15].

Электрогидродинамический метод очистки, предметом исследования которого является настоящая работа, применим для диэлектрических жидкостей и газов и использует следующие физические эффекты: электризацию [16–18], электрофорез [19, 20], электроконвекцию [17, 21–23], диэлектрофорез, структурообразование [17], электростатическое осаждение [23]. Электрическое поле, как силовой фактор достижения указанных эффектов, имеет свою специфику по сравнению с гравитационным и инерционными полями и в определенных условиях является наиболее эффективным средством очистки, а в некоторых случаях – единственно возможным. Но, если широко применяемые для очистки газов (дымовых в энергетике, вредных отходов химической, металлургической промышленности и т.п.) электрофильтры [24] эффективно работают, то для очистки жидкостей они непригодны. Причиной тому является высокая вязкость и плотность несущей фазы и возникающее интенсивное электроконвективное перемешивание среды, препятствующее разделению фаз. Поэтому электрофильтры для жидкости имеют свои особенности.

Анализ литературных данных показывает, что практически все электрофильтры в общем содержат корпус с входным и выходным патрубками, в котором установлены электроды, подключенные к источнику высокого напряжения и предусмотренные специально или существующие в том или ином виде, ловушки для примеси (простейшими из них могут быть внутренние стенки корпуса и поверхности электродов).

Работу электрофильтра в общем следует рассматривать следующим образом: при прокачке обрабатываемой жидкости происходит ее электризация, поляризация, доставка электроконвекцией жидкости к ловушкам и осаждение в них примеси, не исключая при этом возврата электроконвекцией же некоторой части примеси обратно в жидкость. То есть эффект очистки, по-видимому, следует рассматривать как результат противоборства двух процессов: осаждения и структурообразования примеси в ловушках, приводящих к разделению фаз и очистке, а также электроконвективного перемешивания, препятствующего этим процессам.

Следовательно, при расчете и проектировании электрофильтров следует исходить из ряда факторов, предусматривающих как усиление электроосаждения и структурообразования, так и ослабления конвективных течений в ловушках. К этим факторам можно отнести:

- электрические: разность потенциалов и силу тока между электродами, полярность подаваемого напряжения, характер распределения электростатического поля в очистительной ячейке, величину заряда частиц загрязнителя;

- физические параметры среды (очищаемого масла): вязкость, плотность, диэлектрическую проницаемость, удельную электропроводность, причем не только каждой из фаз в отдельности, но и смеси, степень обводнения среды;

- технологические: температуру очищаемой среды, давление в ней, секундный расход жидкости через электрофильтр, исходную концентрацию примесей, удельную производительность устройства и др.;

- конструктивные: схему электрофильтра, соотношение размеров его отдельных элементов, форму и количество рабочих электродов, наличие, тип и параметры изоляционных покрытий.

В работе были исследованы электрофильтры различной конструкции, которые описаны ниже.

**Экспериментальный стенд и методика исследований.** Рабочим участком экспериментального стенда служил электрофильтр, представляющий собой кювету с входным и выходным патрубками, размещенными внутри электродами (высоковольтным и заземленным), подключенными соответственно к источнику высокого напряжения и контуру заземления, а также с ловушками для примеси.

В качестве высоковольтного электрода была использована медная проволока диаметром 2 мм с перфорированным диэлектрическим покрытием, подключенная к отрицательному полюсу источника высокого напряжения, которая укреплялась на крышке кюветы. Заземленным электродом являлась пластинка, размещенная на дне кюветы. В качестве ловушек использованы: ряд знакопеременных пластинчатых электродов (электрофильтр № 1), положительные из которых заземлялись; ряд диэлектрических пластин, расположенных горизонтально (электрофильтр № 2) или вертикально (электрофильтр № 3) и образующих зазор между собой; диэлектрическая пластина с отверстиями (электрофильтр № 4), расположенная на плоском электроде; ряд параллельных плоскому электроду металлических пластин, изолированных от электродов и друг от друга (электрофильтр № 5).

При разработке конструкции электрофильтра ставилась цель создания в нем (вне ловушек) электроконвективных течений жидкости, необходимых для быстрой доставки примеси к ловушкам и обеспечения условий прочного закрепления в них примеси. Первая цель достигалась применением электрода с перфорированным диэлектрическим покрытием [25], причем эффективность очистки в определенной степени зависит от знака высоковольтного электрода (в случае применения воска в качестве примеси и масел в качестве несущей фазы отрицательная полярность высоковольтного электрода оказалась предпочтительней); вторая цель – закрепление примеси в ловушках, то есть реализация эффектов структурообразования и осаждения достигалась применением ловушек с развитой поверхностью и наличием лабиринтов, но с небольшим гидравлическим сопротивлением, состоящих из проводящих (с плавающим потенциалом) и непроводящих элементов. Все перечисленные конструкции в той или иной степени отвечали этим требованиям.

Наиболее эффективным оказался электрофильтр, использующий в качестве ловушек промежуточные электроды с плавающим потенциалом и основные эксперименты проведены на нем.

Экспериментальный стенд, схема которого изображена на рис. 1, включал электрофильтр 1,

напорную емкость 2 с исследуемой жидкостью, подсоединенную к входу электрофильтра 1 силиконовым шлангом 3 с вентилям 4. Выходной патрубком электрофильтра подсоединен через вентиль 5 к измерительной оптической ячейке 6 калориметра (на схеме не показан). Высоковольтный электрод электрофильтра 1 подключался к отрицательному полюсу источника высокого напряжения ИВН-50 и киловольтметру, а в цепи заземления электрофильтра 1 подключался микроамперметр. В процессе экспериментов измерялась температура жидкости, определялась ее вязкость и плотность, расход, время обработки и оптическая плотность, концентрация примеси в жидкости до и после электрофильтрации.

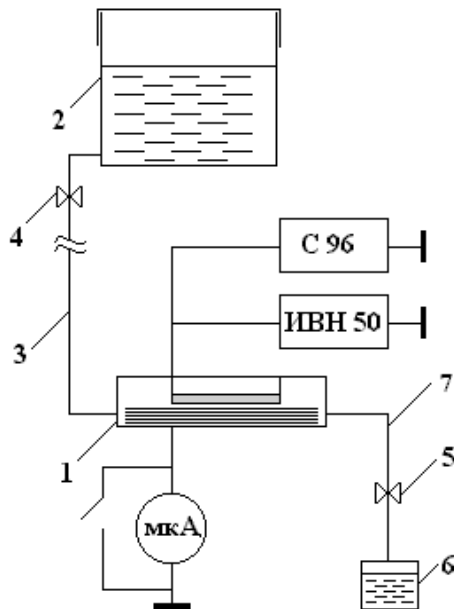


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 – электрофильтр; 2 – емкость с исследуемой суспензией; 3, 7 – соединительные шланги; 4 и 5 – вентиля; 6 – кювета для оптических измерений.

Основные эксперименты проводились в следующей последовательности. Готовились растворы воска с подсолнечным маслом различной концентрации, определялась по известной методике [26] их оптическая плотность с помощью концентрационного фотоэлектрического калориметра КФК 2. По полученным данным строились зависимости  $\varphi/\varphi_0$  – отношения концентрации на выходе  $\varphi$  и входе электрофильтра  $\varphi_0$  при различных напряженностях на электродах; пробы обработанной жидкости брались через каждые 5 минут. В ряде экспериментов жидкость очищали два и три раза (см. ниже).

**Полученные результаты и их обсуждение.** На рис.2 представлены зависимости  $\varphi/\varphi_0$ , полученные на электрофильтрах с различной конструкцией ловушек, которые показывают, что эффективность очистки при прочих равных условиях зависит от конструктивных особенностей ловушек. Наиболее эффективным оказался электрофильтр № 5, что можно объяснить развитостью поверхности ловушки (множества промежуточных электродов большой площади) при плавающем их потенциале, исключающем интенсивное электроконвективное перемешивание жидкости в ловушке и благоприятствующем прочному осаждению на них частиц примеси.

Из полученных результатов следует, что очистка обусловлена преимущественно осаждением примеси на заряженных поверхностях ловушек и в меньшей степени – структурообразованием. Например, в случаях ловушек из диэлектрического материала (электрофильтры № 2, 4), рассчитанных на роль каркаса, упрочняющего структуры, эффективность очистки ниже, чем в электрофильтрах, рассчитанных на осаждение примеси (электрофильтры № 1 и 5).

Для всех конструкций электрофильтров зависимости  $\varphi/\varphi_0$  от времени обработки  $t$  носит характер ниспадающих кривых, стремящихся при  $t \rightarrow \infty$  к некоторой постоянной величине  $\varphi_\infty/\varphi_0$ , в соответствии с зависимостью [27]:

$$\frac{\varphi - \varphi_\infty}{\varphi_0 - \varphi_\infty} = \exp \left[ -C \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U^2 a}{\eta l^2} \cdot \left( \frac{a}{l} \right)^n t \right], \quad (1)$$

где  $\varphi_{\infty} = \varphi(t)_{t \rightarrow \infty}$ ,  $U$  – разность потенциалов между электродами;  $l$  – характерное расстояние между ними;  $a$  – размер частиц примеси;  $C$  – согласно [27] константа для данной конструкции и обрабатываемой жидкости; где  $n$  – число циклов очистки,  $\eta$  – коэффициент вязкости. В электрофильтре № 1 с течением времени  $\varphi/\varphi_0$  даже несколько возрастает, что можно объяснить миграцией примеси вдоль кюветы, но это наблюдается только при определенных разностях потенциалов между электродами и расходах жидкости.

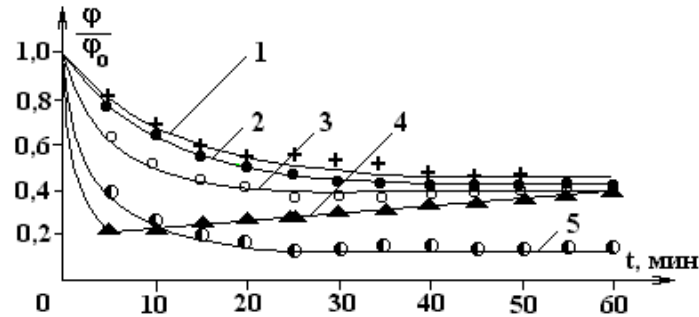


Рис. 2. Зависимость отношения остаточной концентрации к начальной от времени обработки для различных конструкций электрофильтров. 1 – электрофильтр № 2; 2 – электрофильтр № 4; 3 – электрофильтр № 3; 4 – электрофильтр № 1; 5 – электрофильтр № 5.

Закономерность (1) типична для многих релаксационных процессов, в частности электроочистки. Тем не менее, она недостаточно адекватно отражает физические особенности наблюдаемых на опыте явлений. Действительно, из (1) по экспериментальным данным можно найти упомянутую выше константу

$$C = -\frac{1}{\alpha t} \cdot \ln \frac{\varphi - \varphi_{\infty}}{\varphi_0 - \varphi_{\infty}}, \quad (2)$$

( $\alpha$  – множитель при  $t$  в (1)) которая, вопреки ожиданиям, не является постоянной величиной с достаточной точностью для данной жидкости и конструкции электрофильтра, а зависит, хотя и не сильно, и от других факторов, в частности, начальной концентрации  $\varphi_0$ , о чем свидетельствует рис. 3. Поэтому попытка обобщения экспериментальных данных на основе (1) в виде (2) не привела к желаемым результатам. Вместе с тем, зависимость (1) свидетельствует о перспективе очистки жидкости с любой наперед заданной степенью чистоты путем применения повторяющихся циклов согласно формуле

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{C^n}, \quad (3)$$

Из рис. 3 и 4 следует, что для начальной концентрации воска  $\varphi_0=0,5\%$ , при первом цикле очистки остаточная концентрации примеси равна  $\varphi_{\infty_1} = 0,17\%$  и  $\frac{\varphi_0}{\varphi_{\infty_1}} = C_1 = 2,94$ ; при втором цикле

$\varphi_{\infty_2} = 0,08\%$  и  $\frac{\varphi_{\infty_1}}{\varphi_{\infty_2}} = C_2 = 2,13$ ; при третьем цикле  $\varphi_{\infty_3} = 0,03\%$  и  $\frac{\varphi_{\infty_2}}{\varphi_{\infty_3}} = C_3 = 2,67$ .

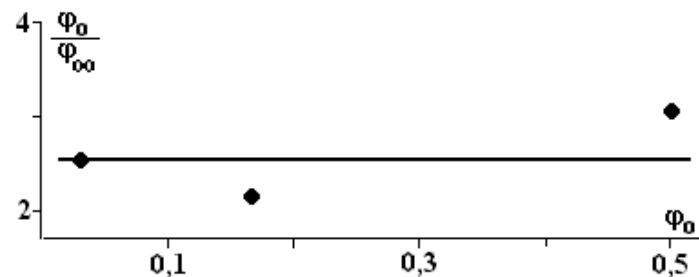


Рис. 3. Зависимость отношения начальной к остаточной концентрации примеси от начальной ее концентрации.

Из полученных результатов следует, что после каждого цикла очистки остаточная концентрация примеси меньше остаточной концентрации предыдущего цикла, т.е.  $\varphi_{\infty_1} > \varphi_{\infty_2} > \varphi_{\infty_3} \dots > \varphi_{\infty_n}$ ; отношение исходной концентрации примеси к остаточной в каждом цикле – величина, близкая к постоянной, то есть  $\frac{\varphi_0}{\varphi_{\infty_1}} = \frac{\varphi_{\infty_1}}{\varphi_{\infty_2}} = \frac{\varphi_{\infty_2}}{\varphi_{\infty_3}} = \frac{\varphi_{\infty_n}}{\varphi_{\infty_{n+1}}}$ , что подтверждает справедливость соотношения (3) и возможность проведения очистки с любой наперед заданной остаточной концентрацией примеси.

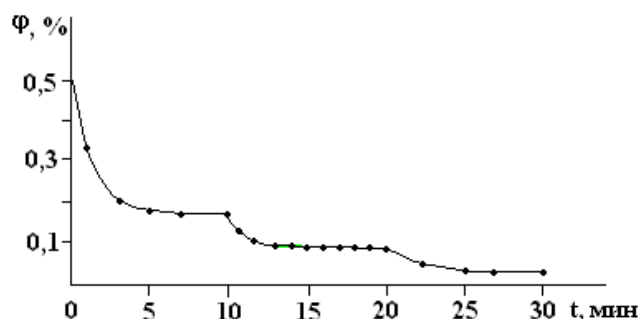


Рис. 4. Очистка суспензии подсолнечное масло – воск в трех циклах:  $\varphi$  – концентрация воска;  $t$  – время обработки.

#### Заключение.

Выявленные закономерности очистки диэлектрических жидкостей от механических примесей в электрическом поле, в частности  $\frac{\varphi_0}{\varphi_{\infty}} = C$ , позволили предложить новый способ очистки путем применения повторяющихся циклов, который позволяет провести очистку жидкости с любой наперед заданной степенью чистоты и разработать методику его расчета.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кочанов Э.С., Кочанов Ю.С., Скачков А.Е. Электрические методы очистки и контроля судовых топлив. Л., 1990.
2. Шмидт А.А. Теоретические основы рафинации растительных масел. М., 1960.
3. Стабников В.Н., Лысянский В.М., Попов В.Д. Процессы и аппараты пищевых производств. М., 1985.
4. Балыгин И.Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков. М.-Л., 1964.
5. Максимук Е.П., Болога М.К. Регенерация органических растворителей при ректификации в электрическом поле // Электронная обработка материалов. 1995. № 1. С. 56–59.
6. Цобек Л.К., Панченко Г.М., Папков В.В. Теоретические основы работы для электрообезвоживания и электрообессоливания нефтяных эмульсий. М., 1970.
7. Берил И.И. Исследование и разработка способа разрушения эмульсий с использованием перфорированных диэлектрических диафрагм: Автореф. дис... канд. техн. наук. М., 1982.
8. Коваленко В.П., Ильинский А.А. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений. М., 1982.
9. Мартыненко А.Г., Коноплев В.П., Ширяева Г.П. Очистка нефтепродуктов в электрическом поле постоянного тока. М., 1974.
10. Попко В.В. Изучение вопроса разрушения эмульсии "вода в масле" в электрических полях и выработка рекомендаций по рациональному использованию электрических полей при электродеэмульсации: Автореф. дис... канд. техн. наук. М., 1970.
11. Коноплев В.П. и др. О применении электрического поля при рафинации подсолнечного масла в мисцелле // Масло-жировая промышленность. 1975. № 10. С. 17–18.
12. Коваленко Е.С. Исследование воздействия электрического поля на бензиновую мисцеллу подсолнечного масла в процессе электроочисток: Автореф. дис... канд. техн. наук. Краснодар, 1976.
13. Мартовщук Е.В. и др. Извлечение восков в электростатическом поле // Масложировая промышленность. 1980. № 9. С. 13–16.

14. *Эфендиев О.Ф.* Очистка бензиновой мисцеллы подсолнечного масла в электрическом поле: Автореф. дис... канд. техн. наук. Краснодар, 1973.
15. *Болога М.К., Поликарпов А.А., Берил И.И.* Электродегидратация эмульсий вода–подсолнечное масло // *Электронная обработка материалов.* 1989. № 6. С. 30–33.
16. *Леб Л.* Статическая электризация. М.-Л., 1963.
17. *Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А.* Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977.
18. *Болога М.К., Кожухарь И.А., Кожевников И.В., Сажин Ф.М.* Электрогидродинамические процессы и устройства // Доклады V Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей". Санкт-Петербург, 1998. С. 147–151.
19. *Бабский В.Г., Жуков М.Ю., Юдович В.И.* Математическая теория электрофореза. Киев, 1983.
20. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. М., 1952.
21. *Остроумов Г.А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М., 1979.
22. *Рубашов И.Б., Бортников Ю.С.* Электрогазодинамика. М., 1971.
23. Основы электрогазодинамики дисперсных систем // *И.П. Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян и др.* М., 1974.
24. *Левитов В.И., Решидов И.К., Ткаченко В.М. и др.* Дымовые электрофильтры / Под общей ред. В.И. Левитова. М., 1980.
25. *Болога М.К., Потемкина Т.А., Берил И.И.* Электродегидратация эмульсии вода–подсолнечное масло // *Электронная обработка материалов.* 1986. № 2. С. 63–66.
26. *Бабко А.К., Пилипенко А.Т.* Фотометрический анализ. М., 1968.
27. *Болога М.К., Кожухарь И.А., Гросу Ф.П., Леу В.И.* Релаксационные процессы в электрофильтрах. Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей // Сборник докладов VI Международной научной конференции, 26 июня – 30 июня 2000 года, Санкт-Петербург, 2000. С. 210–213.

*Поступила 29.05.2001*

### Summary

The results of investigations of the process of sunflower oil purification of wax in direct current electric field for various electrofilters designs are reported. A cyclic method of purification and a method for electrofilter calculation are proposed.

И. Л. Железняк, Ю. П. Ставров, В. И. Тамбовцев

## РАЗДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДОВ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ГАЗА, ИОНИЗОВАННОГО РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Челябинский государственный университет,  
Бр. Кашириных, 129, г. Челябинск, 454021, Россия*

Широкое применение плазмоструйных технологических установок делает необходимым детальное исследование физических процессов, сопровождающих истечение ионизованного газа [1, 2]. При экспериментальном исследовании так называемой технической плазмы, как правило, возникают принципиальные затруднения, связанные, во-первых, с ее высокой температурой и скоростью течения, во-вторых, со сложным химическим составом струи. С целью изучения механизма струйной электризации при истечении “чистой” струи, ионизованной рентгеновским излучением, была создана миниатюрная экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

Ионизационная камера 1 объемом 2 см<sup>2</sup> была изготовлена из капрона, а ее сопловая часть с цилиндрическим отверстием  $d = 0,52$  мм – из стали. При работе установки ток с металлической части