

ЭЛЕКТРООЧИСТКА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ОТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРИМЕСИ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

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

Наряду с механическими фильтрами или вместо них в целях тонкой очистки топлив и других диэлектрических жидкостей применяются электрические методы [1, 2], основанные на эффекте разделения фаз под воздействием сильных электростатических полей ($E > 1$ кВ/см). На очищаемые жидкости накладываются ограничения по удельной электропроводности – не менее 10^9 Ом⁻¹·м⁻¹. К таковым относятся моторные масла на нефтяной и синтетической основе (МК-8, МС-20, ИС-20, В-3В трансформаторное масло), жидкости гидравлических систем АМГ-10, ВМП 3.

Кроме этих технических жидкостей методы электрической очистки (ЭО) также применимы к маслам растительного происхождения, в частности, к подсолнечному маслу [3–5], а также горючим и органическим растворителям.

Более эффективной очистке поддаются обычно жидкости, примеси которых обладают большей удельной электропроводностью, чем сама жидкость, а также меньшим временем релаксации ($\tau = \epsilon_0 \epsilon / \sigma$) [6].

В работах [7–9] исследованы вопросы ЭО, в частности, электрорелаксационные процессы в электрофильтрах [7], в работе [8] установлены на моделях различной конструкции основные закономерности процесса очистки в зависимости от времени при различных приложенных напряжениях на электрофильтре и расходах очищаемой жидкости (подсолнечное масло + воск). В работе приведены экспериментальные результаты, полученные на модели электрофильтра с ловушками [8], представляющими собой дополнительные электроды с плавающим потенциалом.

Некоторые теоретические аспекты проблемы ЭО рассмотрены в работе [9], в которой показано что классический чисто экспоненциальный спад концентрации примесей со временем неточен и предложена уточненная зависимость остаточной концентрации от времени с учетом экранирующего действия осаждаемого слоя примеси на внешнее поле. Тем самым созданы предпосылки для поиска обобщающих расчетных формул, пригодных для практических целей. Однако нехватка экспериментальных данных, в частности, для технических масел и более проводящих частиц затрудняет соответствующие обобщения. Чтобы устранить данный пробел, в этой работе проведено экспериментальное исследование процесса электроочистки трансформаторного масла от двух типов примесей (Cr_2O_3 – полупроводник и активированный электропроводящий уголь). Радиус частиц не более 10 мкм, а их начальная концентрация составляла $\varphi_0 = 0,05\%$. Экспериментальный стенд и методика исследований описаны в работе [8]. По полученным данным строились зависимости $\varphi^* = \varphi(t) / \varphi_0$, где $\varphi(t)$ – концентрации среды на выходе из электрофильтра, φ_0 – начальная концентрация, через каждые 5 минут после начала процесса очистки.

Экспериментальные зависимости рис. 1–7 носят такой же характер, как и в случае “подсолнечное масло + воск” [8], что свидетельствует об общности физического механизма процесса ЭО в обоих случаях. Малость начальной концентрации $\varphi_0 = 0,05\%$ по сравнению со случаем высокоомных примесей ($\varphi_0 = 0,5\%$) обусловлена ограничениями, связанными с возможностью создания достаточно сильного электрического поля, необходимого для существования эффекта очистки.

Кривые 1, 2 на рис. 1 соответствуют постоянному расходу жидкости ($Q = 7$ мл/мин) при различных напряжениях на электрофильтре ($U = 6, 15$ кВ – соответственно). Видно, что с повышением U глубина очистки увеличивается.

С целью выявления влияния расхода Q на ЭО были сняты кривые 1–3 рис. 2; $\varphi_0(t)$ при данном напряжении ($U = 9$ кВ) и различных расходах $Q = 20; 10; 4$ мл/мин – соответственно.

Из представленных графиков следует, что расход влияет на электроочистку противоположно влиянию электрического поля, то есть чем больше расход очищаемой жидкости, тем менее эффективна ее очистка. На рис. 3 кривые 1, 2 сняты при напряжении $U = 12$ кВ и расходах $Q = 11,3$, $6,7$ мл/мин соответственно. Отмечено, что величина электрического тока через очистительную ячейку составляет 21 мкА и существенно не варьирует при переходе от одной кривой к другой. Аналогичные данные, но при большем напряжении представлены на рис. 4, из которого следует, что при данном напряжении ($U = 15$ кВ) очистку можно довести практически до 100%. Все представленные на рис. 1–4 экспериментальные данные относятся к суспензии “трансформаторное масло + Cr_2O_3 ”, в которой, как было отмечено, частицы примеси являются полупроводящими.

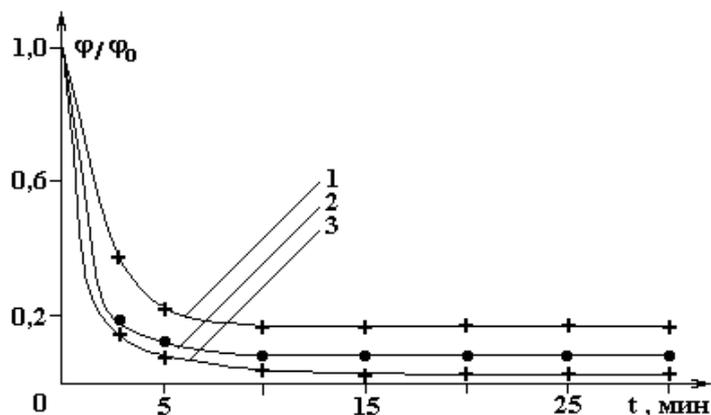


Рис. 1. Зависимость остаточной концентрации примеси частиц Cr_2O_3 в трансформаторном масле от времени. $\varphi_0 = 0,05\%$, $U, 10^3$ В: 1 – 6; 2 – 9; 3 – 15; $Q, \text{мл/мин}$: 1, 2 – 7,0; 3 – 10,0.

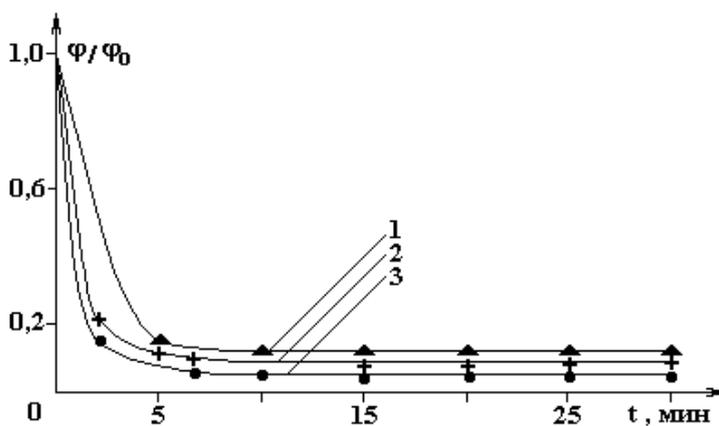


Рис. 2. Зависимость остаточной концентрации примеси частиц Cr_2O_3 в трансформаторном масле от времени. $\varphi_0 = 0,05\%$, $U, 10^3$ В: 1; 2; 3 – 9; $Q, \text{мл/мин}$: 1 – 20; 2 – 10; 3 – 4.

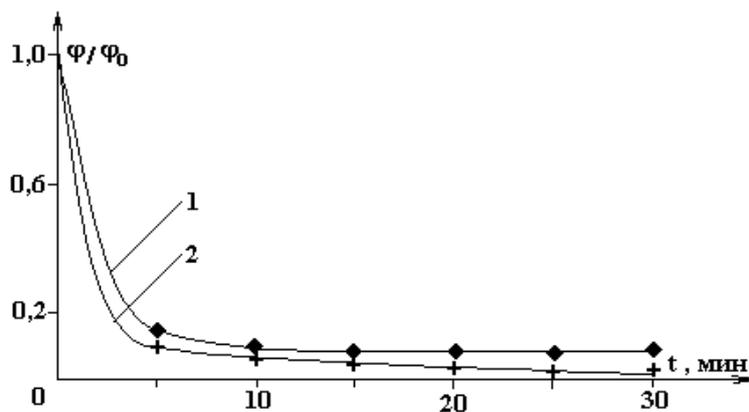


Рис. 3. Зависимость остаточной концентрации примеси частиц Cr_2O_3 в трансформаторном масле от времени. $\varphi_0 = 0,05\%$, $U, 10^3$ В: 1; 2 – 12; $Q, \text{мл/мин}$: 1 – 11,3; 2 – 6,7.

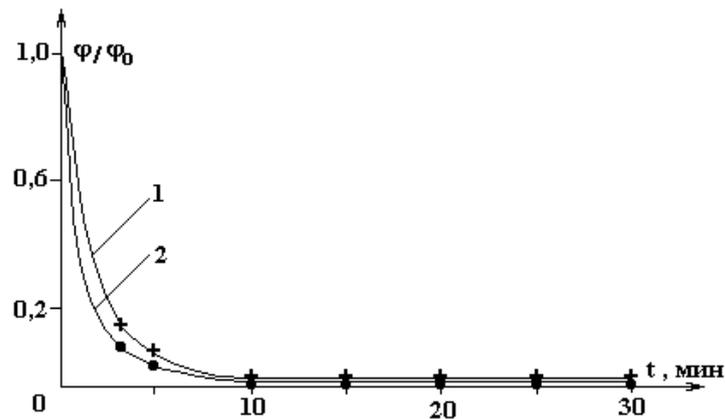


Рис. 4. Зависимость остаточной концентрации примеси частиц Cr_2O_3 в трансформаторном масле от времени. $\varphi_0 = 0,05\%$, $U, 10^3 \text{ В}$: 1; 2 – 15; $Q, \text{ мл/мин}$: 1 – 7,7; 2 – 5.

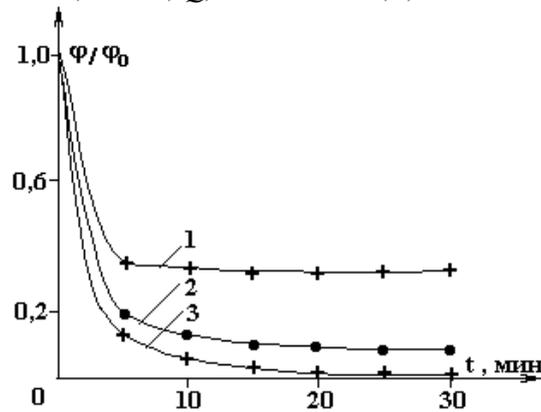


Рис. 5. Зависимость остаточной концентрации примеси угольных частиц в трансформаторном масле. $\varphi_0 = 0,05\%$, $U, 10^3 \text{ В}$: 1; 2; 3 – 5; $Q, \text{ мл/мин}$: 1 – 19; 2 – 10; 3 – 3.

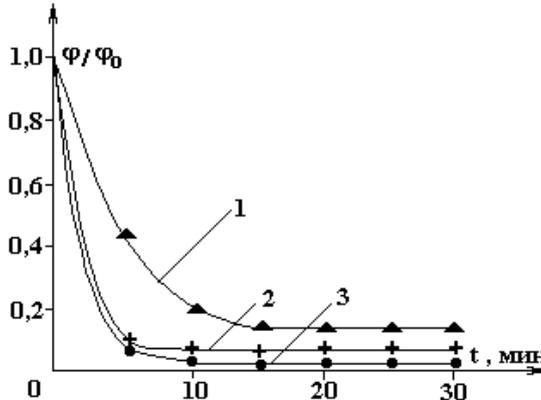


Рис. 6. Зависимость остаточной концентрации примеси угольных частиц в трансформаторном масле. $\varphi_0 = 0,05\%$, $U, 10^3 \text{ В}$: 1; 2; 3 – 7; $Q, \text{ мл/мин}$: 1 – 17; 2 – 8; 3 – 3.

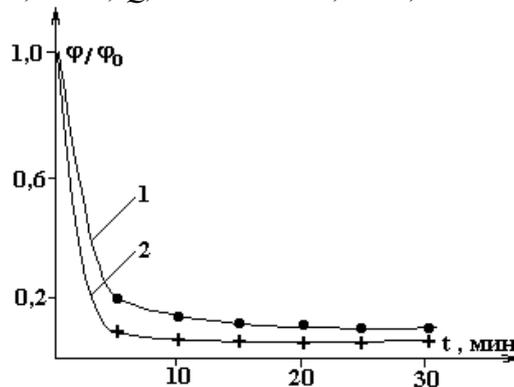


Рис. 7. Зависимость остаточной концентрации примеси угольных частиц в трансформаторном масле. $\varphi_0 = 0,05\%$, $U, 10^3 \text{ В}$: 1 – 5; 2 – 7; $Q, \text{ мл/мин}$: 1 – 10; 2 – 8.

С целью выяснения влияния электрического поля на процесс ЭО при более проводящих частицах примеси, как обычно бывает на практике [1, 2], были использованы частицы активированного угля. Соответствующие данные представлены на рис. 5–7.

Особенность соответствующих кривых – это то, что допустимые напряжения значительно ниже чем в предыдущем случае ($U = 10$ кВ), что оговорено выше. На рис. 5 кривые 1, 2, 3 получены при $U = 5$ кВ при расходах $Q = 19; 10; 3$ мл/мин, соответственно. При минимальном расходе ($Q = 3$ мл/мин) происходит практически полная очистка жидкости по истечении 20–30 минут. Аналогичные результаты представлены на рис. 6 кривые 1–3, но при $U = 7$ кВ и $Q = 17, 8, 3$ мл/мин. Качественные закономерности те же, однако степень очистки более высокая.

Рис. 7 (кривые 1, 2) дает общее представление о ходе кривых $\varphi^*(t)$ при одновременной вариации, как напряжения, так и расхода жидкости. Отличительной чертой опытов, проведенных с проводящими частицами, являются более надежные результаты по сравнению со случаем менее проводящих частиц.

Подводя итоги проведенных исследований, можно заключить, что в дополнении к исследованиям процесса ЭО от диэлектрических примесей [8], в данной работе исследования расширены на случай полупроводящих и проводящих примесей; тем самым охвачен весь диапазон проводимостей твердых тел.

Во всех случаях наблюдается резкий, почти экспоненциальный спад концентрации со временем, согласно полученной ранее зависимости [9]

$$\varphi^* = \frac{(1 - v) \cdot e^{-\lambda t}}{1 - v \cdot e^{-\lambda t}}, \quad (1)$$

где v и λ – параметры, зависящие от геометрических характеристик электрофильтра, величины напряжения и тока, а также свойств среды (подробнее см. [9]).

Однако зависимость (1) теряет смысл по истечению промежутка времени 10–20 мин., когда концентрация φ^* становится постоянной, равной предельно малой в зависимости от напряжения и расхода жидкости. Поэтому в общей сложности экспериментальный ход кривых $\varphi^*(t)$ представляет собой “усеченные” зависимости типа (1). Эффект перехода зависимостей $\varphi^*(t)$ в $\varphi^* = \text{const}$ предположительно [8, 9] связан с нехваткой времени пребывания жидкости в поле, необходимом для ее полной обработки.

К сожалению, зависимость (1) не содержит расход жидкости Q , так как получена в предположении отсутствия ее прокачки через электрофильтр, поэтому объяснения указанного эффекта на основе формулы (1) без дополнительной коррекции невозможно. Тем не менее, в подтверждении выдвинутого предположения оценим время, необходимое для прохождения объема жидкости V через измерительную ячейку электрофильтра.

Определив среднюю скорость течения жидкости формулой

$$\bar{v} = \frac{Q}{S_{\text{эфф}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{эфф}}$ – эффективное поперечное сечение электрофильтра, искомое время можно оценить по формуле

$$t_0 = \frac{l}{\bar{v}}, \quad (3)$$

где l – длина электрофильтра. Подставив (2) в (3), с учетом того, что $l \cdot S_{\text{эфф}} = V$ – полный объем жидкости в ячейке, получим

$$t_0 = \frac{V}{Q}. \quad (4)$$

Ниже приводится таблица экспериментальных $t_{\text{оэ}}$ значений Q , вычисленных по формуле (4) (при $V = 125$ мл) и значения $t_{\text{от}}$ – теоретические.

В строке $t_{\text{оэ}}$ – приведены соответствующие значения, взятые из графиков $\varphi^*(t)$.

Из таблицы видно, что для большинства кривых теоретическая оценка $t_{\text{от}}$ по формуле (4) согласуется с экспериментальной величиной $t_{\text{оэ}}$. Однако было бы преждевременно считать данный вывод окончательным. Возможно, последующий учет расхода жидкости Q в формуле (1) приведет к

более адекватной зависимости остаточной концентрации $\varphi^*(t)$ в процессе электрической очистки диэлектрических жидкостей от примесей.

Экспериментальные $t_{оэ}$ и теоретические $t_{от}$ значения времени обработки, необходимые для прохождения полного объема жидкости через измерительную ячейку

Номер рисунка	2			3		4		5		6		
U , кВ	9			12		15		5		7		
Q , мл/мин	4	10	20	6,7	11,3	5	7,7	10	19	3	8	17
$t_{от}$, мин	31	13	6	19	11	25	16	13	7	40	15	7
$t_{оэ}$, мин	25	15	8	20	12	10	10	25	11	15	15	15

В заключение отметим, что экспериментальный материал, представленный в [8] и дополнительный, приведенный в настоящей работе, представляется более или менее достаточным для поиска обобщающих критериальных расчетных зависимостей применительно к практическим приложениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочанов Э.С., Кочанов Ю.С., Скачков А.Е. Электрические методы очистки и контроля судовых топлив. Л., 1990.
2. Никитин Г.А., Никитин А.Г., Данилов В.М. Экономия нефтепродуктов, используемых в технологических целях. Киев, 1984.
3. Коноплев В.П. и др. О применении электрического поля при рафинации подсолнечного масла в мицелле // Масложировая промышленность. 1975. № 10. С. 17–18.
4. Мартовщук Е.В. и др. Извлечение восков в электрическом поле // Масло-жировая промышленность. 1980. № 9. С. 13–16.
5. Болога М.К., Потемкина П.А., Берил И.И. Электрогидратация эмульсии вода – подсолнечное масло // Электронная обработка материалов. 1986. № 2. С. 63–66.
6. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977. С. 320.
7. Болога М.К., Кожухарь И.А., Гросу Ф.П., Леу В.И. Релаксационные процессы в электрофильтрах // Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей. Сб. докладов VI Международной научной конференции, июнь 2002, Санкт-Петербург, С. 210–213.
8. Болога М.К., Кожухарь И.А., Гросу Ф.П., Леу В.И. Экспериментальное исследование процесса очистки диэлектрических жидкостей от механической примеси в электрическом поле // Электронная обработка материалов. 2001. № 5. С. 34–39.
9. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. К теории очистки диэлектрических жидкостей от механической примеси в постоянном электрическом поле // Электронная обработка материалов. 2001. № 6. С. 35–41.

Поступила 14.05.2002

Summary

Experimental investigation of dielectric fluid electric refinement from mechanical impurity with various electro physical parameters was conducted. The most suitable design of electric filters were determined. Exponential drop of the impurity residual concentration depending on the treatment duration was ascertained.