

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ОЧИСТКЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Институт прикладной физики АН РМ,

ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова

**Государственный аграрный университет Молдовы,

ул. Мирчешть, г. Кишинев, MD-2049, Республика Молдова

1. Введение. К настоящему времени накоплен достаточно богатый экспериментальный материал по изучению процессов электроочистки (ЭО) диэлектрических жидкостей от различных примесей с помощью электростатических полей. Методики и технологии отдельных процессов известны сравнительно давно [1–3], однако широта спектра практических возможностей рассматриваемых методов электроочистки делает их актуальными и на перспективу. Работы ведутся в различных направлениях: усовершенствования применяемых на практике электрофильтров (ЭФ), расширения разновидности жидкостей и примесей, достижения максимальной степени очистки в зависимости от электрофизических и механических свойств среды и требований стандартов.

Авторами выполнены экспериментальные [4 – 6] и теоретические [8] исследования по электроочистке подсолнечного масла от восков для различных конструктивных вариантов электрофильтров [5]; изучен процесс ЭО трансформаторного масла от твердых полупроводящих и проводящих примесей [6] при вынужденной прокачке жидкостей; получены формулы для зависимостей остаточной концентрации частиц примеси от времени $\varphi(t)$ и определяющих параметров процесса [7, 8]. Рассматривался режим отсутствия вынужденного движения жидкости [6], то есть расход жидкости Q через электрофильтр принимался равным нулю, затем результаты [7] расширены на случай очистки жидкости в условиях прокачки [8] и была получена формула для $\varphi^*(t) = \varphi(t)/\varphi_0$

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

где

$$h^* \equiv \frac{h}{H} = \begin{cases} 1 & \text{при } \nu_0^* \leq 1, \\ \frac{Lu}{H\nu_0} & \text{при } \nu_0^* > 1. \end{cases} \quad (2)$$

Величина

$$\nu_0^* = \frac{\nu_0}{\nu_{окр}} = \frac{H}{L} \cdot \frac{\nu_0}{u}, \quad \nu_{окр}^* = \frac{L}{H} \cdot u \quad (3)$$

– безразмерная скорость вынужденного движения; L, H – эффективные длина и высота рабочей ячейки, в виде параллелепипеда; u – поперечная составляющая скорости примесных частиц, равная в общем случае

$$u = u_E + \nu_j + \nu_1, \quad (4)$$

где

$$u_E = \kappa E_0; \quad \nu_j = c \cdot \frac{\nu}{l} \left(\frac{j l^3}{k \gamma \nu^2} \right)^m; \quad \nu_{\perp} = c_0 \cdot \text{Re}^{-\frac{1}{2}} \nu_0 \quad (5)$$

– дрейфовая, конвективно-электрическая и конвективно-вынужденная поперечные составляющие скорости, соответственно.

Выражение для v_j заимствовано из работ по гидродинамике “электрического ветра” [9]. Показатель степени $1 \geq m > 0,5$, причем убывает от 1 до 0,5 с усилением электроконвективного перемешивания жидкости (или газа). В нашем случае режим электроконвекции можно считать ламинарным, то есть принять $m = 1$. Тогда, учитывая что $\nu = \eta$ – динамическая вязкость среды, для v_j получим:

$$v_j = c \frac{j l^2}{k \eta}; \quad (6)$$

где коэффициент пропорциональности $c \sim 1$, j – характерная плотность тока сквозной проводимости, k – подвижность заряженных частиц, ответственных за объемный заряд, обуславливающий электроконвекцию, l – характерный размер течения. В формуле (5) $E_0 \approx U/l_E$ – характерная напряженность поля, U – разность потенциалов между электродами, l_E – характерный масштаб изменения поля. При этом следует иметь в виду, что определение простейшей формулой E_0 оправдано лишь в случае плоскопараллельной системы электродов. В применяемых нами электрофильтрах [5] поля создаются между высоковольтным электродом в виде проволоки – 1, покрытой эмалевой изоляцией и параллельным заземленным плоским электродом – 5 (рис. 1).

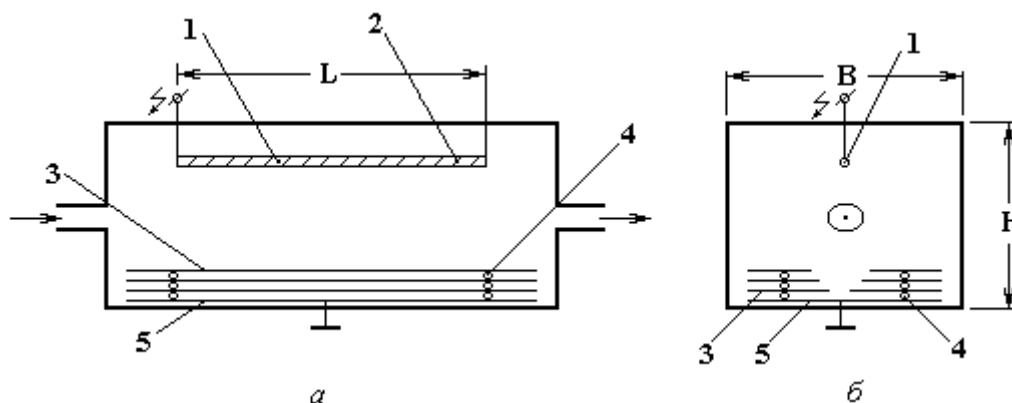


Рис. 1. Схема электрофильтра: а – вид сбоку, б – вид с торца.

1 – высоковольтный электрод ($d = 2$ мм); 2 – насечки на эмалевом покрытии;
3 – электроды с плавающим потенциалом (“ловушки”); 4 – изоляторы, 5 – противозлектрод

В электрофильтре накладываются два течения – вынужденное за счет прокачки жидкости через электрофильтр и электроконвективное, обусловленное “электрическим ветром” (ЭВ), исходящим от насечки изоляции на проволоке – 2. В качестве ловушек загрязнений, помимо электрода – 5, используются электроды – 3, приобретающие потенциалы окружающей среды (“плавающие” потенциалы) и укрепленные на изоляторах – 4. Из сказанного следует, что вопрос о выборе характерных размеров при поиске ответов на те или иные вопросы решаемой задачи ЭО не являются тривиальными. Например, характерные скорости ЭВ будут определяться размерами насечек (“перфорации”), в то время как усредненные скорости по поверхности проволоки (в ее окрестностях), очевидно, будут зависеть от диаметра проволоки, размера завихренностей по поперечному сечению электрофильтра и так далее.

Тем самым видно насколько формулы (1) – (6), полученные в [8], могут оказаться далекими от адекватного описания ими истинной картины электроочистки, поэтому эта модель может служить лишь основой для расчетных формул, учитывающих конструктивные особенности ЭФ и процесса в целом. Путем введения поправочных коэффициентов пропорциональности и модификации степеней определяющих критериев подобия можно рассчитывать на получение приемлемых для практики обобщающих расчетных зависимостей, к чему мы и переходим.

2. Представление зависимости для остаточной концентрации, как функцию времени и параметров задачи. Такое представление приведено в [8] и имеет вид:

$$\varphi^* = 1 - \frac{Lu}{Hv_0} + \frac{Lu}{Hv_0} \cdot \frac{1 - \frac{3\gamma_1\varphi_0 l_E Lu}{\gamma_0 R_0^2 v_0}}{\exp\left[\frac{kE_0 v_0}{Lu} \left(1 - \frac{3\gamma_1\varphi_0 l_E Lu}{\gamma_0 R_0^2 v_0}\right) t\right] - \frac{3\gamma_1\varphi_0 l_E Lu}{\gamma_0 R_0^2 v_0}}; \quad (7)$$

В дальнейшем предстоит упростить и конкретизировать эту зависимость с учетом экспериментальных данных.

Конструктивные особенности электрофильтра учитываются прежде всего симплексом L/H – перед которым в (7) должен быть некий эмпирический коэффициент пропорциональности, ввиду эффективной длины L и высоты H электрофильтра. В качестве l_E можно принять высоту H ячейки ($l_E = H$). Далее, физические параметры дисперсной среды приняты во внимание отношением плотностей осаждаемого слоя γ_1 и жидкости γ_0 . В случае воска в подсолнечном масле $\gamma_1/\gamma_0 \sim 1$; R_0 – учитывает размеры частиц. Если известна функция распределения (плотность вероятности) по размерам, то (7) следовало бы усреднить по этим размерам, что значительно усложнило бы задачу в целом. Поэтому такое усреднение проводить не будем. Как видно из (7) φ^* явно зависит и от начальной концентрации – φ_0 . Вынужденный поток сказывается на процесс посредством скорости v_0 , которую следует выразить через расход Q

$$v_0 = \frac{Q}{S}, \quad (8)$$

где S – эффективное поперечное сечение фильтрующей кюветы.

Заметим, что при $t \rightarrow \infty$ из (1), (4), (5), (7) следует

$$\varphi_\infty^* = \left(1 - \frac{Lv_E}{Hv_0}\right) - c_0 \frac{L}{H} Re_l^{-\frac{1}{2}} = (1 - \eta_{00}^*) - \frac{Lv_E}{Hv_0}, \quad (9)$$

где

$$v_E = u_E + v_j = kE_0 + c \frac{j l^2}{k\eta} \quad (10)$$

– электрическая часть поперечной скорости. Далее, обозначено

$$\eta_{00}^* \equiv c_0 \cdot \frac{L}{H} \cdot Re^{-\frac{1}{2}} = c_0 \cdot \frac{L}{H} \sqrt{\frac{\nu B}{Q}} \quad (11)$$

– коэффициент степени механической очистки в отсутствии поля за счет механической фильтрации жидкости, то есть из-за частичного осаждения частиц примеси на твердые стенки фильтра. Как показывают опыты [6], эта величина может достигнуть $\eta_{00} \cong 0,1 = 10\%$. Учет этого обстоятельства в первом приближении можно осуществить сдвигом начала отсчета начальной концентрации от

$$\varphi_0^* = 1 \text{ до } \varphi_{00}^* \cong 1 - \eta_{00}^* \cong 0,9. \quad (12)$$

Плотность тока можно считать прямо пропорциональной напряженности поля $j = \sigma E_0$. Тогда электрическую часть скорости можно представить в виде:

$$v_E = k_1 E_0, \quad (13)$$

где обозначено

$$k_1 \equiv k + c \frac{\sigma l^2}{k\eta} \quad (14)$$

– эффективный коэффициент подвижности, включающий в себя вторую – конвективную составляющую.

С учетом сказанного для концентрации примеси в стационарном режиме ($t \rightarrow \infty$) получим

$$\varphi_{\infty}^* = \varphi_{00}^* - A\theta, \quad (15)$$

где

$$\theta \equiv \frac{U}{Q}; \quad A \equiv \text{const} \cdot \frac{BLk_1}{H} \quad (16)$$

здесь U – разность потенциалов, A – безразмерная константа ~ 1 , подлежащая определению опытным путем.

3. Обобщение экспериментальных данных по остаточной концентрации при $t \rightarrow \infty$. Как отмечалось [8] маловероятно ожидать линейности по U/Q в формуле (15), поэтому будем искать степенную зависимость, а именно ($A^m \rightarrow A$)

$$\varphi_{00}^* - \varphi_{\infty}^* = A \cdot \theta^m. \quad (17)$$

Логарифмируя это равенство, найдем:

$$m \ln \theta + \ln A = \ln(\varphi_{00}^* - \varphi_{\infty}^*). \quad (18)$$

Обозначив

$$\ln \theta \equiv k; \quad \ln A \equiv n; \quad \ln(\varphi_{00}^* - \varphi_{\infty}^*) \equiv N, \quad (19)$$

по методу наименьших квадратов ищем \min

$$\overline{(mk + n - N)^2} = \min(m, n).$$

Приравнявая производные по n и m нулю, получим систему уравнений

$$\begin{cases} m\bar{k} + n = \bar{N} \\ m\bar{k}^2 + n\bar{k} = \overline{Nk} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m = \frac{\overline{Nk} - \bar{N} \cdot \bar{k}}{\sigma_k^2}; \quad \sigma_k^2 \equiv \overline{k^2} - \bar{k}^2. \\ n = \bar{N} - m \cdot \bar{k} \end{cases} \quad (20)$$

Составим таблицу для определения средних значений.

Расчет конечной степени очистки (по данным [6])

№	Рисунок [6]	Кривая	U , кВ	Q , мл/мин	φ_{∞}^*	$\varphi_{00}^* - \varphi_{\infty}^*$ эксп.	$\varphi_{00}^* - \varphi_{\infty}^*$ теорет.	$ \Delta $ ошибка
1	1	1	6	7,0	0,16	0,74	0,81	0,05
2		2	9	7,0	0,07	0,83	0,84	0,01
3		3	15	10,0	0,02	0,88	0,86	0,02
4	2	1	9	20,0	0,10	0,80	0,75	0,05
5		2	9	10,0	0,06	0,84	0,81	0,03
6		3	9	4,0	0,01	0,89	0,90	0,01
7	3	1	12	11,3	0,08	0,82	0,83	0,01
8		2	12	6,7	0,02	0,88	0,88	0,00
9	4	1	15	7,7	0,02	0,88	0,89	0,01
10		2	15	5,0	0,01	0,89	0,93	0,04
11	5	1	5	19,0	0,32	0,58	0,71	0,13
12		2	5	10,0	0,07	0,83	0,76	0,07
13		3	5	3,0	0,01	0,89	0,87	0,02
14	6	1	7	17,0	0,12	0,78	0,75	0,03
15		2	7	8,0	0,04	0,86	0,81	0,05
16		3	7	3,0	0,01	0,89	0,91	0,02
17	7	1	5	10,0	0,09	0,81	0,76	0,05
18		2	7	8,0	0,06	0,84	0,81	0,03
Σ/n среднее			8,33	9,26	0,07	0,83	0,83	0,04

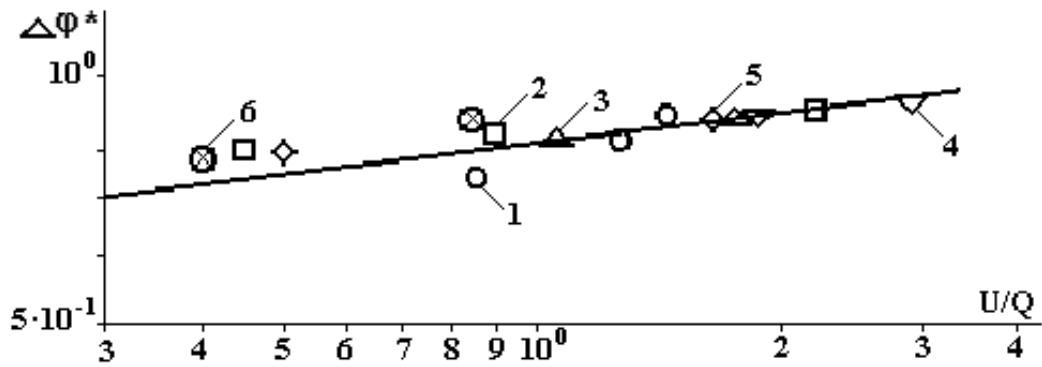


Рис. 2. Обобщающая зависимость $\Delta\varphi_{\infty}^*$ от отношения $\theta \equiv U/Q$.

Обозначения согласно таблице – другие точки совпадают с приведенными на графике. Прямая линия – расчет по формуле (21)

Расчеты приводят к следующей формуле

$$\Delta\varphi_{\infty}^* \cong 0,824 \cdot \left(\frac{U}{Q}\right)^{0,113} \quad (21)$$

или

$$\varphi_{\infty}^* \cong 0,9 - 0,824 \cdot \left(\frac{U}{Q}\right)^{0,113} \quad (22)$$

В приведенной, построенной по результатам [6] таблице, представлены экспериментальные и расчетные данные, соответствующие зависимостям (21) и (22), а также величина абсолютной ошибки между экспериментом и расчетом. Кроме того, на рис. 2 приведен график зависимости (21). Из графика и таблицы следует, что расчетные формулы (21), (22) удовлетворительно аппроксимируют экспериментальные данные.

В заключение заметим, что формулы (21) и (22) носят числовой характер в смысле, что некорректно возводить размерную величину $\theta \equiv U/Q$ в степень, поэтому она должна быть безразмерна. Корректная зависимость должна иметь вид:

$$\Delta\varphi_{\infty}^* = \text{const} \cdot \left(\frac{BLk_1}{H} \cdot \frac{U}{Q}\right)^m = \text{const} \cdot \left(\frac{BLk_1}{H}\right)^m \cdot \left(\frac{U}{Q}\right)^m$$

С другой стороны, из (21) следует

$$\text{const} = \frac{0,824}{\left(\frac{BLk_1}{H}\right)^{0,113}}$$

Приняв во внимание квадратное сечение ячейки [6], то есть $B = H$, а также $L = 1,2 \cdot 10^{-1}$ м при $k \sim q/6\pi\eta a \sim \frac{10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6 \cdot 3,1 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с} \sim 8,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ($a \sim 5 \cdot 10^{-6}$ м; $\eta = 2 \cdot 10^{-2}$ кг/м·с), вместо (21) получим безразмерную зависимость

$$\Delta\varphi_{\infty}^* \cong 24,262 \left(\frac{BLk_1 U}{HQ}\right)^{0,113},$$

более корректную с физической точки зрения.

Представляет интерес обобщение нестационарной зависимости $\Delta\varphi^*(t)$. Однако, как показывают приведенные формулы, это весьма сложная задача, требующая знания многих параметров, и такое обобщение составит предмет дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочанов Е.С., Кочанов И.С., Скалков А.Е. Электрические методы очистки и контроля судовых котлов. Л., 1990.
2. Никитин Г.А., Никитин А.Г., Данилов В.М. Экономия нефтепродуктов используемых в технологических целях. К., 1984.
3. Коноплев В.П. и др. О применении электрических полей при рафинации подсолнечного масла в мицелле. Масложировая промышленность. 1975. № 10. С. 17 – 18.
4. Болога М.К., Потемкина П.А., Берилл И.И. Электрогидратация эмульсий вода – подсолнечное масло // Электронная обработка материалов. 1986. № 2. С. 63 – 66.
5. 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.
6. Леу В.И. Электроочистка трансформаторного масла от механической примеси в постоянном электрическом поле // Электронная обработка материалов. 2002. № 5. С. 55 – 59.
7. 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.
8. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. Электроосаждение механической примеси из диэлектрической жидкости при вынужденном движении в постоянном электрическом поле // Электронная обработка материалов. 2002. № 6. С. 33 – 38.
9. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977. Штиинца, С. 320.

Поступила 11.11.02

Summary

Results of investigations on dielectric liquids purification from mechanical particles in an electric field at pumping are presented. Formulae for residual concentration in dependence on flow rate of pumping are proposed. Experimental data are generalized.
