

УДС 621.359.3(045)

В. В. Гаража, канд. техн. наук, проф.
Динь Тан Хынг, асп. (Вьетнам)

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООЧИСТИТЕЛЕЙ С ВОЛОКНИСТЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

НАУ, Аерокосмічний інститут

Рассмотрен процесс осаждения частиц загрязнений на поверхности волокон поляризационного наполнителя под действием внешнего электрического поля. Поверхность осаждения моделируется в виде матричной структуры. Уравнение эффективности работы поляризационного электроочистителя получено на основании анализа движения одиночной частицы под действием внешних сил на поверхность волокон наполнителя. Приведена проверка адекватности уравнения эффективности при варьировании управляющих параметров процесса электроочистки: длины, плотности упаковки волокон наполнителя, напряжения на электродах и времени обработки дисперсной системы в электрическом поле.

The falling out process of particles of the contamination is considered on surfaces of the filaments polarized stuff under the action of external electric field. The falling out surface is prototyped in the manner of matrix structure. The equation to efficiency of the work polarized electrocleaner (EO) is received on the grounds of analysis of the moving the single particle under the action of external power on surface of the filaments of the stuff. Broughted check to adequacy of the equation to efficiency at variation controlling parameters of the process electrocleaning: the lengths, density of the packing the filaments of the stuff, voltages on electrode and time of the processing dispersion in electric field.

Введение

Рабочие жидкости функциональных систем становятся полноценными конструктивными элементами, от степени совершенства которых зависит надежность, долговечность и безопасность эксплуатации транспортных комплексов.

Одним из критериев конструктивного совершенства рабочих жидкостей гидравлических, масляных и топливных систем является степень их чистоты по содержанию механических загрязнений и эмульсионной воды. Наличие механических примесей и эмульсионной воды резко снижают термостабильность, кислотность, противоизносные и другие эксплуатационные свойства рабочих жидкостей, приводит к повышению износа и отказа в работе отдельных узлов и агрегатов. Только на долю жидкостных систем воздушных судов (ВС) приходится до 50...60% отказов авиационной техники [1]. Применение топлив, масел и спецжидкостей не в полной мере отвечающих требований ГОСТ 17216–71 приводит к росту ремонтных и эксплуатационных расходов, а в отдельных случаях затраты фирм-эксплуатантов могут достичь размеров, соизмеримых со стоимостью поступившей в эксплуатацию приобретаемой техники [2].

Формирование проблемы

В решении проблемы обеспечения безопасности полетов, надежности и ресурса ВС и транспортных комплексов в целом преобладающее значение имеют совершенствование су-

ществующих и разработка новых методов и средств очистки рабочих жидкостей функциональных систем. Комплекс научных исследований в области разработки новых технологий и средств тонкой очистки горюче-смазочных материалов (ГСМ) достиг значительных размеров, но обеспечение чистоты топлив и масел не в полной мере соответствует требованиям ГОСТ 17216–71, поэтому остается актуальной проблема разработки новых и совершенствования существующих технологий и средств тонкой очистки светлых нефтепродуктов и авиаГСМ в частности.

Анализ публикаций

Выполненный анализ публикации [3] показал, что наиболее перспективная технология тонкой очистки светлых нефтепродуктов – очистка диэлектрических жидкостей от механических примесей и эмульсионной воды в квазипостоянном электрическом поле интенсивно развивается. Создано достаточно большое количество удачных конструктивных решений и устройств [4], которые защищены патентами и нашли практическое применение в условиях производства и эксплуатации транспортных систем авиационной и космической промышленности. Как показано в работе [3], наиболее целесообразно выполнять тонкую очистку малоконцентрированных разбавленных суспензий и эмульсий в квазипостоянном электрическом поле поляризационных электроочистителей (ЭО) и электродегидраторов

(ЭДГ). Однако аналитической оценки эффективности очистки и описания процесса взаимодействия дисперсной фазы с электрическим полем поляризационного наполнителя в квазипостоянном внешнем электрическом поле применительно к волокнистой структуре наполнителя не разработано, что затрудняет проектирование и освоение производства поляризационных ЭО и ЭДГ.

Цель аналитических исследований

Целью работы является аналитическая оценка эффективности разрушения малоцентрированных высокодисперсных масляных суспензий в квазипостоянном электрическом поле ЭО с нитевидным волокнистым диэлектрическим наполнителем.

Основная часть

Для анализа эффективности поляризации волокон диэлектрического наполнителя и процесса осаждения частиц дисперсной фазы суспензии (в равной степени, как и эмульсий) применительно к электродегидратору – очистителю [4] поверхность осаждения можно рассмотреть как матричную структуру (рис. 1) в виде отдельных ячеек с определенными для волокнистой среды значениями плотности упаковки α , N_k – количеством камер, формируемых при контакте единичного волокна с соседними волокнами. Согласно работы [6] можно полагать, что структура естественной упаковки волокон близка к ромбической (рис. 2). При этом, так как в ячейку волокнистой среды входит одно целое волокно (на рис. 3 оно заштриховано), то количеству волокон в единице объема матричной системы будет соответствовать количество ячеек (камер) в единице объема.

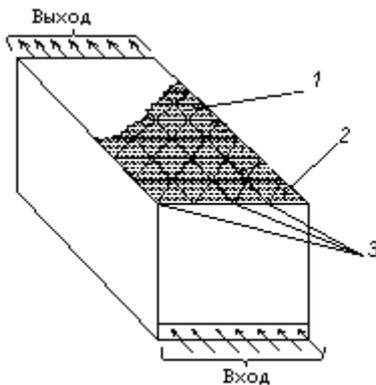


Рис.1. Схема фильтропакета: 1 – ромбовидный сетчатый отрицательный электрод; 2 – волокнистый диэлектрический наполнитель; 3 – плоский изолированный положительный электрод

В работах [7; 8] показано, что в ЭО с волокнистым наполнителем миграция частиц механических примесей осуществляется в поляризованные зоны на поверхность волокон, локализуясь вблизи многочисленных точек контакта волокон друг с другом.

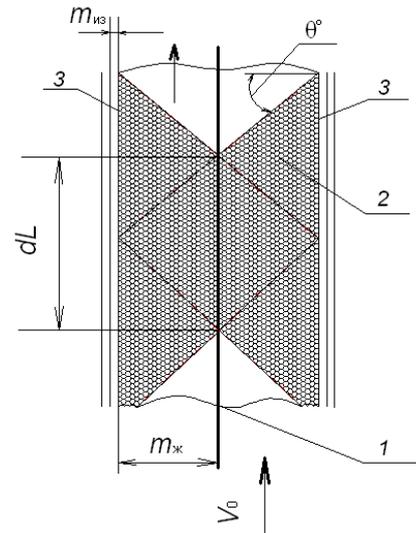


Рис. 2. Структура упаковки волокон: $m_{из}$ – толщина изоляции; $m_{ж}$ – ширина потока очищаемой жидкости; V_0 – скорость потока очищаемой жидкости; θ^0 – угол наклона сетчатого электрода

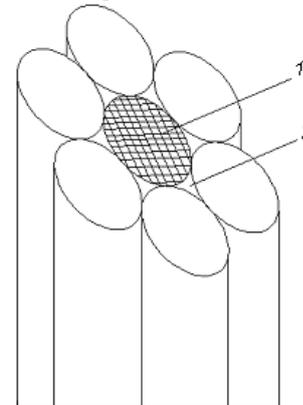


Рис. 3. К расчету количества камер матричной системы: 1 – одиночное волокно; 2 – камера (ячейка), образуемая контактирующими между собой волокнами

Рассматривая двухкомпонентную систему, которая находится под действием электрического поля можно предположить, что в диэлектрическую жидкость с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{ж}$ и находящуюся под действием внешнего электрического поля E_0 , введены волокна наполнителя цилиндрической формы из диэлектрического материала с $\epsilon_n > \epsilon_{ж}$.

Выражения для сил в камерах (каналах) ЭО, действующих между поляризационными волокнами и частицами механических загрязнений, получены в работе [9], из которой следует, что

основные положения, полученные автором, можно распространить и на матричную систему поляризованного электроочистителя.

Отделение частиц загрязнений светлых нефтепродуктов в матричной системе ЭО, в первом приближении, рассматривалось как процесс фильтрации дисперсной фазы суспензии через систему волоконистого поляризованного наполнителя, размещенного между системой электродов (рис. 2).

В основу процесса отделения дисперсной фазы при наложении внешнего электрического поля положен анализ движения одиночной частицы загрязнений, совершаемого в масле (или другом светлом нефтепродукте) под действием приложенных к ней внешних сил.

Такой подход правомерен, так как рассмотрению подвергались малоконцентрированные, разбавленные суспензии и эмульсии. Для таких систем расстояние между частицами загрязнений несоизмеримы с их размерами. Так как принятый характерный размер частиц дисперсной фазы не превышает 25 мкм, а диаметр волокон наполнителя как минимум на порядок больше, т. е. ≥ 250 мкм, то можно считать, что частицы загрязнений не искажают внешнее электрическое поле и не изменяют гидродинамической картины течения масла в матричной системе ЭО или ЭДГО.

Аналогично работе [10] было получено уравнение траектории движения частиц загрязнений в полярных координатах и безразмерном виде:

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\varphi} = \frac{\frac{F}{R^3} \left[\frac{\varepsilon_n - \varepsilon_j}{(\varepsilon_n + \varepsilon_j) R^2} + \cos\varphi \right] - \frac{F}{R^3} \sin 2\varphi + 0,5 \left[\ln R^2 - \left(1 - \frac{1}{R^2}\right) \right] \cos\varphi}{\frac{F}{R^3} \sin 2\varphi + 0,5 \left[\ln R^2 - \left(1 - \frac{1}{R^2}\right) \right] \sin\varphi} \times$$

где R и φ – соответственно текущий радиус-вектор и угол между ним и вектором напряженности электрического поля, а F , являясь силовым фактором, численно характеризует отношение скорости частицы за счет действия электрического поля к скорости потока вязкой жидкости V_0 .

Для реализованных конструкций ЭО с поляризованным наполнителем при $\varepsilon_n > \varepsilon_j$ коэффициент ψ^* очистки (осаждения) для одиночного цилиндрического волокна согласно [11] можно аппроксимировать выражением

$$\psi^* = c F^\gamma$$

где $\gamma = 2/3$, а $c = 0,8 \dots 1,0$.

Численные значения констант выбираются в зависимости от структуры и конструктивных особенности матричной системы очистительного пакета.

Используя выражения коэффициента очистки для одиночного цилиндрического волокна, в соответствии с работой [10] выполнена интегральная оценка эффективности для электроочистительного пакета, соответствующего конструктивной схеме на рис. 1 и 2.

Для этого случая коэффициент очистки ЭО будет равен:

$$\Psi = 1 - e^{-\psi^* S_n} \quad (1)$$

где Ψ – коэффициент эффективности (коэффициент очистки); S_n – эффективная площадь сечения, на которую осуществляют осаждение частиц; ψ^* – численное значение коэффициента осаждения для одиночного волокна.

Применительно к рассматриваемой конструкции (рис. 2) ЭО, конкретизирован параметр S_n с целью определения возможности оценки эффективности разрушения дисперсных систем по формуле (1) и использования ее как базы для получения стационарного уравнения эффективности работы ЭО.

Зона осаждения ЭО выполнена в виде камерной (пористой) структуры, для которой изменение концентрации дисперсной фазы $d\delta_1$ на участке ЭО длиной dL (рис. 2) пропорционально концентрации частиц загрязнений на входе δ_0 , количеству камер (пор) волокон в единице объема n_k и эффективному сечению камеры (поры) $S_{\text{эф}}$ (эффективной площади захвата):

$$d\delta_1 = -\delta_0 n_k S_{\text{эф}} dL \quad (2)$$

Интегрированием выражения (2) получено изменение концентрации дисперсной фазы за один проход жидкости:

$$\delta_1 = \delta_0 e^{-n_k S_{\text{эф}} L},$$

а коэффициент очистки, характеризующий эффективность работы ЭДГ, можно оценить выражением

$$\Psi_k = \frac{\delta_0 - \delta_1}{\delta_0} = 1 - e^{-n_k S_{\text{эф}} L} \quad (3)$$

Количество камер (пор) n_k – волокон в единице объема ЭО (длина волокна равна единице) определялось по формуле

$$n_k = \frac{6\alpha_n}{\pi R^2 \cdot 1},$$

где R – эквивалентный диаметр волокна; количество камер, формируемых при контакте одного волокна с соседними волокнами, равно 6 (согласно рис. 3).

Численное значение α_n – плотность упаковки волокон в ЭО, определялась из соотношения

$$\alpha_n = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_{ni}}{W_0},$$

где k – количество волокон в объеме W_0 ЭО, $\omega_n = \pi \cdot R^2 \cdot H$ – объем одного волокна (предполагая, что длина волокна равна высоте H рабочего объема ЭО).

Рабочий объем W_0 ЭО :

$$W_0 = Hh_{ж}cL, \quad (4)$$

где (на рис. 2) H – высота электроочистительного пакета; $h_{ж}$ – расстояние между соседними электродами; c – количество электродных модулей в ЭО; L – длина электроочистительного пакета ЭО.

За эффективное сечение (фактора сплошности волокнистого наполнителя) камеры (поры) принята эффективная площадь захвата частиц одним цилиндрическим волокном или камерой, которая формируется в области точек контакта соседних волокон, образуя цилиндрическую поверхность эквивалентного радиуса r_0 . Каждая камера (пора) имеет 6 полужон захвата в соответствии с рис. 3.

Учитывая, что согласно работе [6] соотношение между эффективным радиусом поверхности перед волокном r_0 и радиусом захвата r_3 равно 1,3, т. е. $r_0 = 1,3 r_3$ (рис. 4), получена формула для эффективной площади сечения одной камеры :

$$S_{эф} = \frac{6}{2} \cdot \frac{4}{3} r_0 b = \frac{2r_0^3}{R} = \frac{4,394r_3^3}{R}. \quad (5)$$

Расстояние между параллельными гранями камеры (рис. 6) $\sqrt{3}R$, $2R$ и $2R$, а усредненное значение соответственно равно:

$$l = 1,91R. \quad (6)$$

Тогда эффективность очистки одной камеры, характеризуемая коэффициентом очистки аналогично формуле (3) запишем:

$$\psi_k = 1 - e^{-n_k S_{эф} l}. \quad (7)$$

Подставив в формулу (6) выражение (5), получим:

$$\psi_k = 1 - e^{-1,91n_k 4,39 \frac{r_3^3}{R} R}.$$

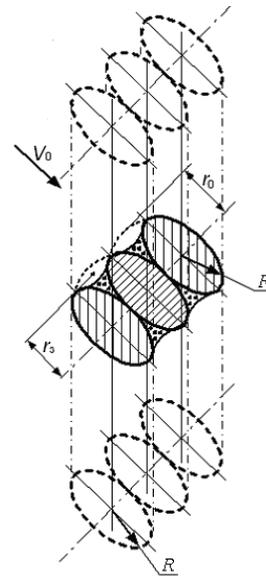


Рис. 4. Зоны осаждения частиц: R – радиус волокна; r_0 – эффективный радиус цилиндрической поверхности перед волокнами; r_3 – радиус захвата

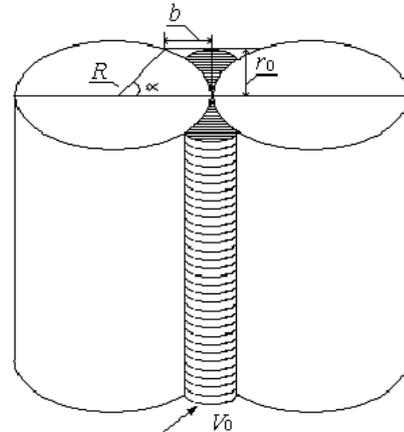


Рис. 5. К определению параметров эффективного сечения захвата частиц: R – радиус волокна; r_0 – эффективный радиус цилиндрической поверхности перед волокнами

Тогда в соответствии с формулами (3), (4), (5) уравнение эффективности работы электроочистителя принимает вид:

$$\psi_{эо} = 1 - e^{-\frac{6\alpha_n 4,394r_3^3}{\pi R^2 R} L} = 1 - e^{-8,4\alpha_n L \frac{r_3^3}{R^3}}. \quad (8)$$

Выразив длину электроочистительного пакета L через скорость потока жидкости V_0 и время обработки светлых нефтепродуктов в электрическом поле $t_э$, в окончательном виде эффективность работы ЭО имеем:

$$\Psi_{\text{ЭО}} = 1 - e^{-8,4\alpha_n V t, \frac{r_z^3}{R^3}} \quad (9)$$

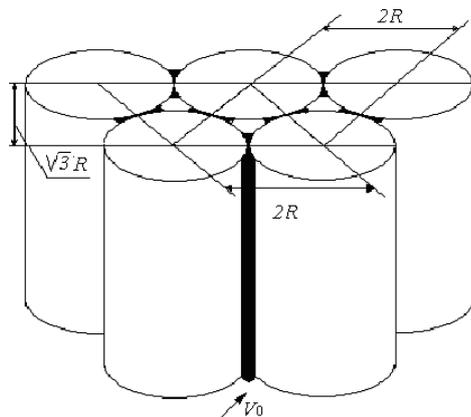


Рис. 6. Схема размещения и параметры оценки между параллельными гранями камер

Из анализа выражения (9) следует, что эффективность работы ЭО с волокнистым поляризационным наполнителем зависит от плотности упаковки волокон α_n , соотношения r_z/R – радиуса захвата к радиусу волокна наполнителя r_z/R , длины волокон L . Коэффициент очистки Ψ будет возрастать с увеличением времени обработки суспензии в электрическом поле и уменьшением диаметра R волокон поляризационного наполнителя.

Проверка адекватности изменения эффективности работы ЭО согласно формулы (9) при варьировании управляющих параметров процесса электроочистки: плотности упаковки α_n , времени обработки суспензии в электрическом поле t , и напряжении на электродах выполнялась расчетным методом с использованием программного обеспечения MATLAB [12], применяя исходные данные:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ (Ф/м)}; \varepsilon_{\text{ж}} = 2,4; \varepsilon_{\text{частиц}} = 8,0; \\ \varepsilon_{\text{щетины}} &= 4,0; R_{\text{щетины}} = 0,125 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}; \varepsilon_{\text{шерсти}} = 4,4; \\ R_{\text{шерсти}} &= 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}; \varepsilon_{\text{капрон}} = 7,0; R_{\text{капрон}} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}; \\ r_{\text{частиц}} &= 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}; V = 4,0 \cdot 10^{-3} \dots 10,0 \cdot 10^{-3} \text{ (м}\cdot\text{с)}; \\ \mu_{\text{АМГ-10}} &= 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ (Н}\cdot\text{с/м}^2\text{)}; t = 0,0 \dots 75 \text{ (с)}; \\ \alpha &= 0,2 \dots 0,5; U = (3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11) \cdot 10^3 \text{ (В)}; \\ E_{\text{оср}} &= (0,94; 1,25; 1,56; 1,87; 2,18; 2,5; 2,81; \\ &3,17; 3,44) \cdot 10^6 \text{ (В/м)}; \\ L = Vt &= 0,06 \dots 0,3 \text{ (м)} [7; 8; 13]. \end{aligned}$$

Результаты расчетов показаны на рис. 7, 8 и 9.

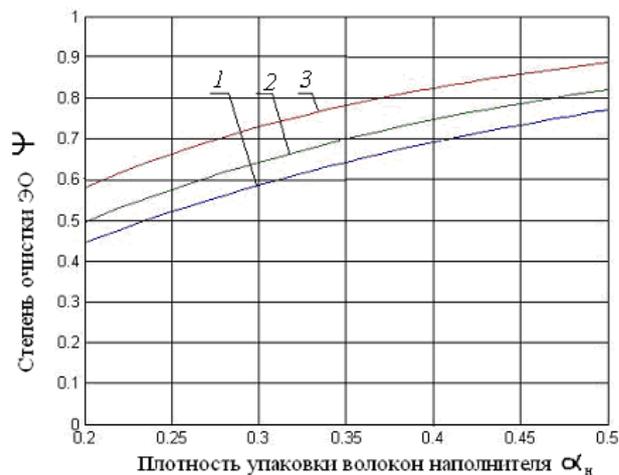


Рис. 7. Зависимость степени очистки Ψ ЭО от плотности упаковки α_n волокон наполнителя

Как следует из рис. 6, увеличение плотности упаковки α_n волокнистого наполнителя в 2,5 раза приводит к росту эффективности ЭО Ψ в 1,53; 1,55 и 1,68 раза соответственно для шерсти – кривая 1, щетины – кривая 2 и капрона – кривая 3.

Смещение кривых эквидистантно вверх относительно друг друга обусловлено размерами эквивалентных диаметров шерсти, щетины и капрона, которые соответственно были равны 200, 250 и 800 мкм.

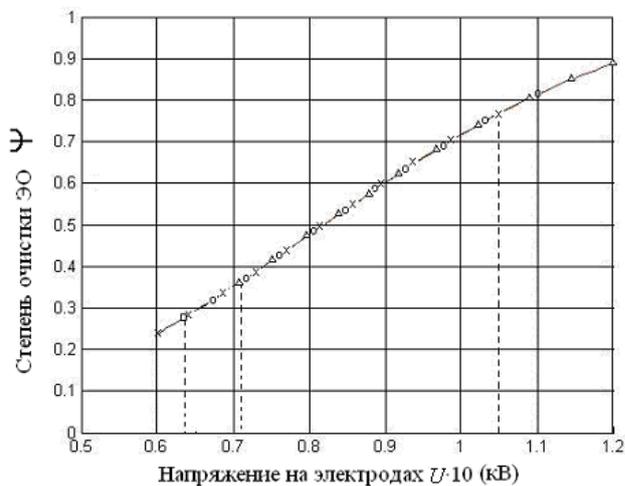


Рис. 8. Зависимость степени очистки Ψ ЭО от напряжения U на электродах: -x---x- – капрон; -o---o- – щетина; --v---v- – шерсть

Увеличение напряжения U на электродах электроочистительного пакета ЭО приводит к увеличению r_z радиуса захвата, повышению эффективности работы ЭО. Согласно рис. 7 при $U = 12$ кВ степень очистки достигает $\Psi = 0,89$ при

$\alpha_{\text{н}} = 0,5$ и использования волокон из шерсти и времени обработки $t_3 = 75$ (с).

Как показали расчеты рис. 8, время обработки суспензии в ЭО существенно влияет на эффективность очистки, так как увеличение t_3 приводит к изменению гидродинамической картины течения жидкости в электроочисти-тельном пакете ЭО.

Кривые 1, 2, 3 на рис. 8 показывают, что на эффективность очистки ЭО Ψ влияет так же материал волокон наполнителя.

Можно ожидать, что использование волокон (нитей) шерсти наиболее целесообразно, так как им характерен трибоэффект, то её поляризационные свойства выше, чем у щетины и капрона. Характерно так же, что увеличение времени обработки в 2 раза приводит к росту степени очистки соответственно в 1,5; 1,54; 1,6 раза для шерсти, щетины и капрона.

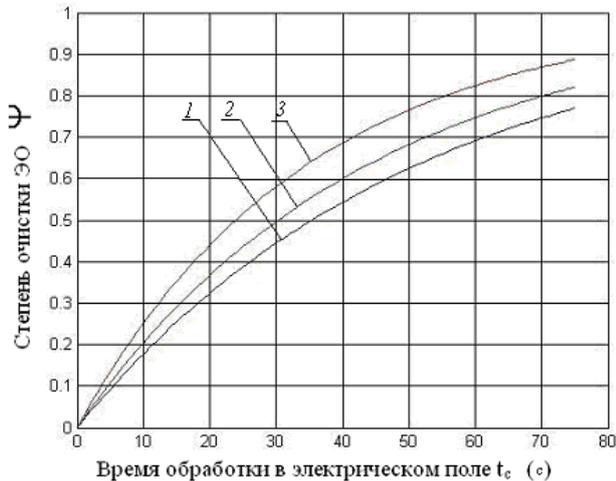


Рис. 9. График зависимости степени очистки Ψ ЭО от времени обработки в электрическом поле t_3 : 1 – капрон; 2 – щетина; 3 – шерсть

Выводы

Выражение для оценки эффективности ЭО (8) позволяет определить коэффициент очистки Ψ в широких диапазонах варьирования параметров, характеризующих процесс разрушения дисперсных систем, и его можно рекомендовать для оценочных расчетов при проектировании электроочистителей. Однако окончательные рекомендации по применению уравнения эффективности можно сделать только после экспериментальных исследований сопоставлением расчетных и данных экспериментов.

Литература

1. Попов В. И. Движение частиц слабодисперсных диэлектрических эмульсий в неоднородном электрическом поле // Магнитная гидродинамика. – 1979. – №4. – С. 58 – 60.
2. Расчет гравитационного очистителя непрерывного действия для очистки авиационных топлив от загрязнений: “Исследование эксплуатационных свойств авиаГСМ и спецжидкостей”: Сб. науч. тр. / С. А. Пузик, В. С. Манзий, А. М. Ипатов, В. С. Шевчук – К.: КИИГА, 1986. С. 115 –120.
3. Garazha V. V., Davidenko Y. P., Dinh Tan Hung. The analysis and the trends of electrocleaners development Proceedings of the National Aviation University 2’2005. – P. 45.
4. Пат. Украины № 3687-XII от 15.12.1993г., пат. Азербайджана №20030237 от 05.05.2005г., а. с. №1493318 от 16.11.1987г. и № 724201 от 30.06.1986 г.
5. Гаража В. В., Давиденко Ю. П., Казанец В. И. Влияние конструктивно-технологических параметров на эффективность очистки моторных масел в квазипостоянном электрическом поле // Промислова гідроліка і пневматика. – 2005. – №2(8). – С.53.
6. Сандуляк А. В. Очистка жидкостей в магнитном поле. – Л.: Выща шк., 1984. – 166 с.
7. Халиль С. А. Высокоэффективное восстановление эксплуатационных свойств рабочих жидкостей авиационных гидромасляных систем в квазипостоянном электрическом поле: Дисс.... канд. техн. наук. – К. – 2001. – 186 с.
8. Белогузов В. С. Разработка и исследование поляризационного электроочистителя рабочих жидкостей авиационных систем: Дисс.... канд. техн. наук: – К., 1980. – С.230.
9. Havlicek V., The improvement of efficiency of fibrous dielectric filters by application of an external electric field, Int. G. Air and Water Poll., 1961. – Vol. 4, Nos, ¾. – P. 225– 236.
10. Zebel G., Deposition of aerosol flowing past a cylindrical fiber in a uniform electric field // Journal of colloid science. – 1965. – 20, №6. – P. 522 – 524.
11. Кирпи А. А. Влияние внешнего электрического поля на осаждение частиц в волокнистом фильтре // Теоретические основы химической технологии. – 1971. – №5. – С.760 – 763.
12. Кривченко В. Г. Разработка электроочистителя с наполнителем из гранул конденсаторной керамики для очистки авиационных топлив и масел. Дисс... канд. техн. наук: – К., 1987.

Стаття надійшла до редакції 14.12.06.