

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М., 1982.
2. Липин Ю.В., Рогачев А.В., Харитонов В.В. Вакуумная металлизация полимерных материалов. Л., 1997.
3. Оулет Р., Барбье М., Черемисинофф П. Технологическое применение низкотемпературной плазмы / Пер. с англ. М., 1983.
4. Бровикова И.Н., Менагаришвили С.Д. Исследование процесса модификации поверхности поливинилхлорида в низкотемпературной плазме // Физика и химия обработки материалов. 1994. № 4–5. С. 89–93.

Поступила 30.12.04

Summary

The process for the polymer materials metallization using the magnetron sputtering system has been investigated. Both electron density and mean energy were determined in the near-to-substrate region. It was show that pre-treatment in the oxygen-containing plasmas as well as the adjustment of the magnetron plasma physical parameters provide the optimization of polymer materials metallization process.

Ю.А. Микипорис

ТРИБОЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИЯ ЖИДКОСТЕЙ НА НЕФТЯНОЙ ОСНОВЕ

Ковровская государственная технологическая академия,
ул. Маяковского, 19, г. Ковров, 601910, Россия

Трибоэлектризация жидких неполярных диэлектриков, к которым относятся нефтяные масла, связана с существованием двойного электрического слоя Квинке–Гельмгольца–Гуи, образующегося на границе раздела фаз (рис.1) [1–3]. Возникновение двойного электрического слоя является следствием относительного перемещения жидкости и твердого тела.

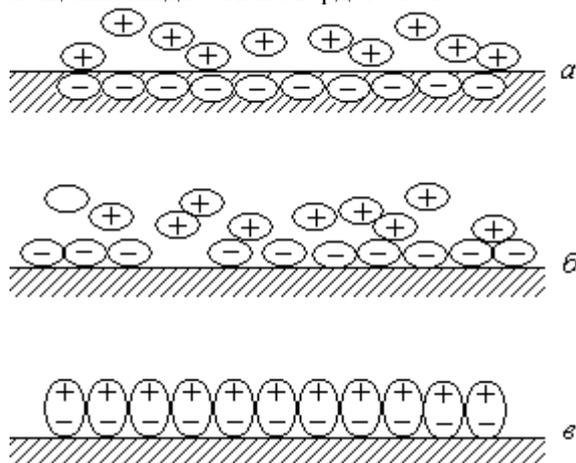


Рис. 1. Схема строения двойного электрического слоя: а – ионного; б – адсорбционного; в – ориентационного

Теория трибоэлектризации жидкостей, развитая Гэвисом, Козманом и Бобровским [4], в настоящее время не удовлетворяет современным требованиям. В частности, не исследовано дополни-

тельное воздействие трибоэлектризации на твердые частицы в поверхностных и объемных фильтрах. Следует отметить, что сложность гидродинамических и электростатических процессов позволяет выполнять эту задачу с помощью математического моделирования.

Схема движения загрязненной жидкости (например, моторного масла, топлива или рабочей жидкости) внутри поверхностного фильтра представлена на рис. 2.

Под действием гидродинамических (движущих) сил жидкость проходит через фильтро-элементы (сетки-электризаторы). Вследствие электризации трением между сетками, выполненными из материалов разной поляризационной ориентации (например, фторопласт – капрон – металл), и корпусом возникают двойной электрический слой и соответственно трибоэлектрическое поле [2].

Система уравнений, описывающих движение твердой частицы загрязнений по осям X и Y , имеет вид

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{Д.х} + F_{Э} + F_{СТ.х}; \\ m\ddot{y} = F_A + F_{Г} + F_{Д.у} + F_{СТ.у}, \end{cases} \quad (1)$$

где $F_{Д.х}$ – движущая гидродинамическая сила (по X); F_A – сила Архимеда (по оси Y); $F_{Э}$ – трибоэлектрическая сила; $F_{СТ.х}$ – сила гидравлического сопротивления по Стоксу (по X); $F_{Г}$ – сила гравитации; $F_{Д.у}$ – движущая гидродинамическая сила (по Y); $F_{СТ.у}$ – сила гидравлического сопротивления по Стоксу (по Y).

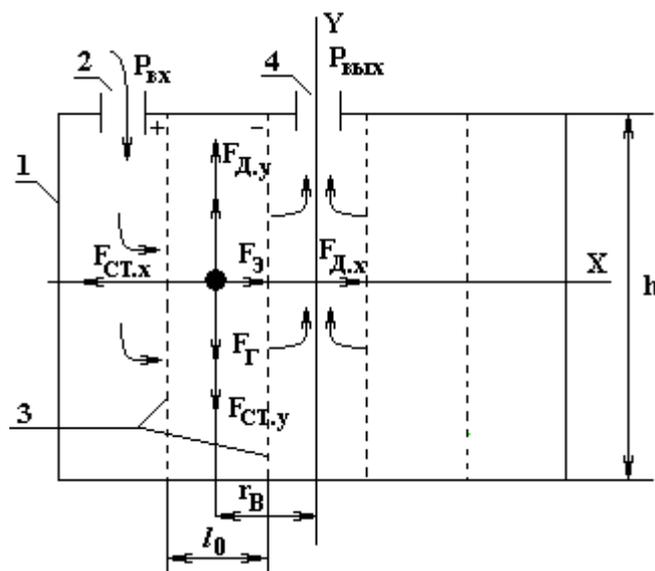


Рис. 2. Схема движения твердой частицы в жидкости: 1 – крышка (корпус); 2, 4 – отверстия входа и выхода жидкости соответственно; 3 – сетки-электризаторы

Принимая форму частицы шарообразной с диаметром d_q , представим

$$F_{Г} = m_q g = \frac{\pi d_q^3}{6} \cdot \rho_q g, \quad (2)$$

где m_q – масса частицы; ρ_q – плотность частицы,

$$F_A = m_{ж} g = \frac{\pi d_q^3}{6} \cdot \rho_{ж} g, \quad (3)$$

где $m_{ж}$ – масса жидкости в объеме частицы; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости,

$$F_{Э} = q \cdot E_x, \quad (4)$$

где

$$q = 4\pi\epsilon_0 E_x r^2 \left(1 + \frac{2(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \right) \cdot \frac{en_0 mt}{4\pi\epsilon_0 E_x + en_0 mt}, \quad (5)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; r – радиус частицы; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – относительная диэлектрическая проницаемость жидкой среды и материала твердой частицы соответственно; e – заряд электрона; t – время движения частицы; n – концентрация ионов; m – подвижность ионов, [4],

$$E_x = \frac{U}{x \ln(1 + l_0/r_B)}, \quad (6)$$

где E_x – напряженность трибоэлектрического поля; U – электрический потенциал,

$$F_{CT} = 3\pi\mu d_q \cdot v, \quad (7)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости; v – скорость движения частицы;

$$F_D = \frac{\pi d_q^2}{4} \cdot \rho_{ж} \frac{v^2}{2}. \quad (8)$$

С учетом (2) – (3) система (1) примет вид

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \frac{\pi d_q^2}{4} \rho_{ж} \frac{v_x^2}{2} + qE_x - 3\pi\mu d_q v_x; \\ m\ddot{y} = -\frac{\pi d_q^2}{6} g(\rho_q - \rho_{ж}) + \frac{\pi d_q^2}{4} \rho_{ж} \frac{v_y^2}{2} - 3\pi\mu d_q v_y. \end{cases} \quad (9)$$

Введем обозначения:

$$E_0 = \frac{U}{x_0 \ln(1 + l_0/r_A)}; \quad (10)$$

$$a_x = a_y = 3\pi\mu d_x; \quad (11)$$

$$b_x = b_y = \frac{\pi d_x^2}{8} \rho_{ж}; \quad (12)$$

$$c_y = \frac{\pi d_x^2}{6} g(\rho_x - \rho_{ж}); \quad (13)$$

$$c_x = -qE_0; \quad (14)$$

С учетом (10) – (14) нелинейная система дифференциальных уравнений движения частицы (9) будет представлена в виде

$$\begin{cases} m\ddot{x} = b_x v_x^2 - a_x v_x - c_x; \\ m\ddot{y} = b_y v_y^2 - a_y v_y - c_y. \end{cases} \quad (15)$$

Интегрирование первого уравнения системы (15) возможно только приближенными методами (численными или аналитическими). Интегрирование второго уравнения можно провести аналитически, но получающееся при этом выражение для v_y довольно сложное.

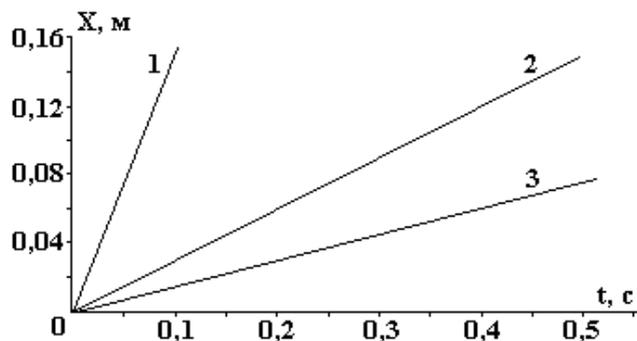
Поэтому в первом приближении ($m\ddot{x}$) и ($m\ddot{y}$) считаем пренебрежимо малыми по сравнению с суммой слагаемых в правой части уравнений (15):

$$\begin{cases} 0 = b_x v_x^2 - a_x v_x - c_x; \\ 0 = b_y v_y^2 - a_y v_y - c_y. \end{cases} \quad (16)$$

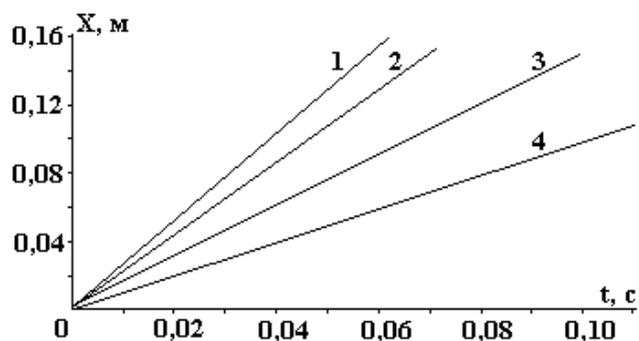
Правомерность такого пренебрежения обосновывается также в работах Б.А. Русакова [5] и П.Н. Белянина [6].

По результатам решения системы уравнений на ЭВМ построены графики (рис. 3), описывающие координаты движения частицы загрязнения в зависимости от ее диаметра и величины электрического потенциала на сетках–электризаторах, а также выявлены следующие закономерности: 1) чем выше трибоэлектрический потенциал, тем эффективнее осаждение частиц загрязнений; 2) дополни-

тельное воздействие трибоэлектрического поля улучшает эффективность осаждения малых (до 10 мкм) частиц загрязнений; 3) для крупных частиц (100 мкм и более) дополнительное воздействие трибоэлектрического поля незначительно.



При $U = 500$ В; $d_{ч}$, мкм: 1 – 10; 2 – 50; 3 – 100



При $d_{ч} = 10$ мкм; U , В: 1 – 1500; 2 – 1000; 3 – 500; 4 – 0

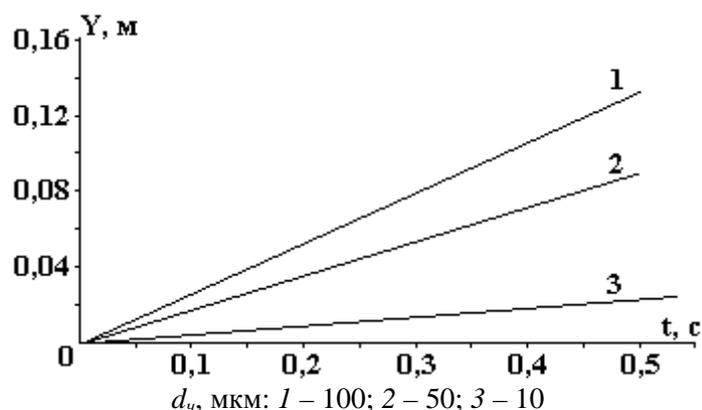


Рис. 3. Результаты расчета

Теоретически спрогнозирована эффективность очистки рабочей жидкости сравнением вероятности осаждения частиц загрязнений при трибоэлектризации и без нее (см. таблицу).

Сравнительная эффективность трибоэлектрофильтрации

Размерные группы	Вероятность осаждения частиц, %				Сравнительная эффективность, %			Среднее значение, %
	Без трибоэлектризации	С трибоэлектризацией			0,5 кВ	1,0 кВ	1,5 кВ	
		0,5 кВ	1,0 кВ	1,5 кВ				
До 10 мкм	1	14	21	27	13	20	26	20,0
До 50 мкм	35	46	50	56	11	15	21	15,5
До 100 мкм	75	78	82	88	3	7	13	7,6
Свыше 100 мкм	100	100	100	100	0	0	0	0

Предполагаемая сравнительная эффективность осаждения частиц загрязнений на сетке фильтра в среднем при U , кВ: 0,5 – 6,7%; 1,0 – 10,5%; 1,5 – 15%. Таким образом, среднее значение сравнительной эффективности осаждения частиц загрязнений составило 10,7%.

Экспериментальные исследования (с участием Р.В. Смьшников) проведены на ЗАО «МЗ Ковровец» (г. Ковров) на специально спроектированном и изготовленном стенде. Рабочая жидкость типа ВМГЗ из бака подавалась насосом через кран-дроссель по трубопроводу в испытываемое устройство – трибоэлектрофильтр (рис. 4), а затем сливалась в бак. Анализы проб рабочей жидкости сводились к определению весового или объемного содержания загрязнений, а также их гранулометрического состава. Для этого использовали прибор ПКЖ-904, предназначенный для автоматического

контроля чистоты жидкости (измерение размеров и определение количества инородных частиц в жидкостях).

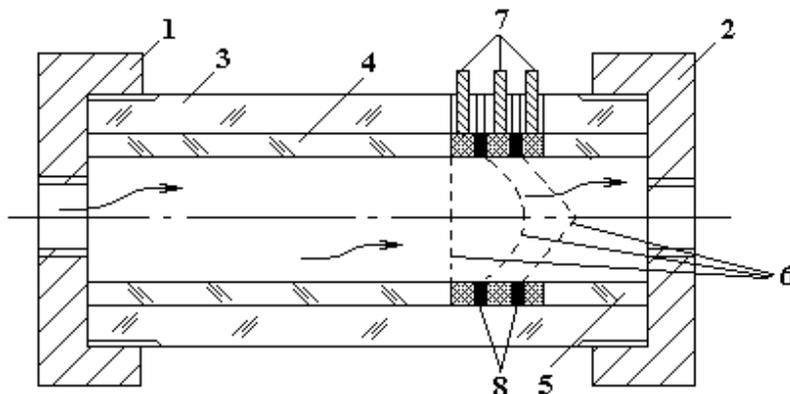


Рис. 4. Трибоэлектрофильтр: 1, 2 – крышки; 3 – корпус; 4, 5 – сменные вставки; 6 – сетчатые элементы; 7 – выводы напряжения; 8 – втулки-изоляторы

При движении рабочей жидкости в полости вставки 4, выполненной из материала, диэлектрическая проницаемость которого выше, чем у исследуемой жидкости, происходит электризация сеток 6 посредством трения частиц загрязнений жидкости. Концентрированный заряд снимается с сетчатых элементов 6, а масло сливается в бак. Электрическое напряжение измерялось вольтметром В7-40 с входным сопротивлением не менее 10^{10} Ом.

Исследования эффективности очистки при традиционном однофакторном подходе к эксперименту требуют значительного числа продолжительных опытов, что связано с большими трудозатратами, а также с длительностью испытаний. Одним из путей повышения эффективности исследований является экстремальное планирование экспериментов.

Функция отклика в данном случае имеет вид

$$Y = U = f(x_1, x_2, x_3, x_4),$$

где U – потенциал на вставках, В; $x_1 = \varepsilon$ – относительная диэлектрическая проницаемость материала вставки; $x_2 = t$ – температура жидкости, °С; $x_3 = Q$ – расход жидкости, л/мин; $x_4 = l$ – расстояние между сетками-вставками, мм.

Эксперимент проводился по дробной полуреplikе полного факторного плана типа 2^{4-1} . Для проверки адекватности модели использован критерий Фишера.

Окончательное уравнение регрессии имеет вид

$$U = 1033 + 19,2(\varepsilon - 2,3) + 7,5(t - 40) + 12,5(Q - 16) + \\ + 205(l - 10) + 3,8(\varepsilon - 2,3)(l - 10) - 0,5(t - 40)(Q - 16) + \\ + 1,5(t - 40)(l - 10) + 2,5(Q - 16)(l - 10).$$

На основе составленной регрессионной модели сделан вывод о том, что главными факторами, влияющими на величину потенциала на вставках, являются расстояние между ними, а также температура и расход очищаемой жидкости.

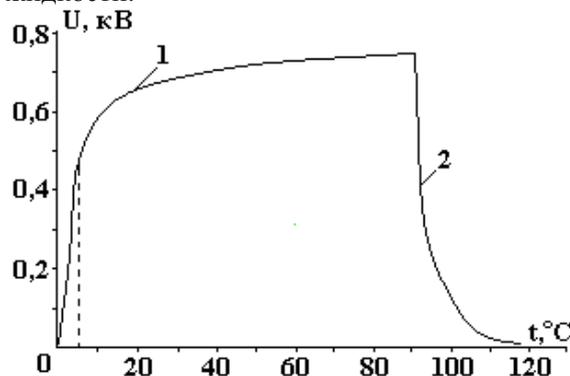


Рис. 5. Зависимость электрического потенциала от температуры: τ_p – время разгона; τ_e – время выключения; 1 – стенд включен, $\tau_p = 7$ с; 2 – стенд выключен, $\tau_e = 4,5$ с

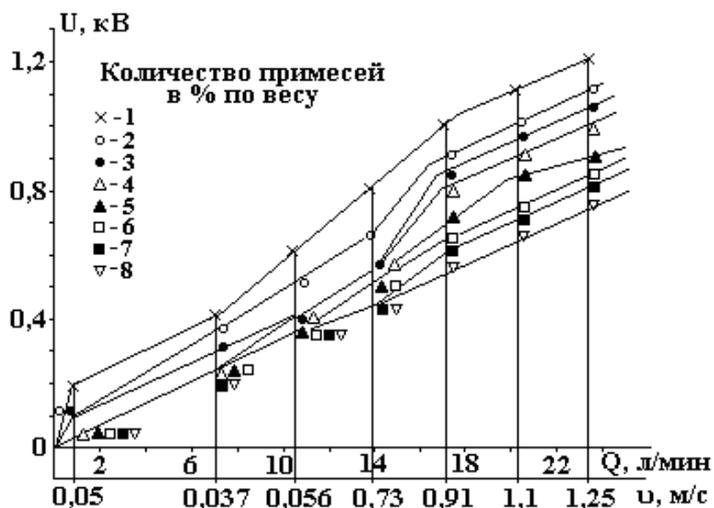


Рис. 6. Влияние примесей на электрический потенциал. 1 – 0,005; 2 – 0,01; 3 – 0,015; 4 – 0,02; 5 – 0,03; 6 – 0,035; 7 – 0,045; 8 – 0,085%

Величина электрического потенциала возрастает, по результатам экспериментальных исследований, с увеличением скорости жидкости, а также температуры (рис. 5, 6). При выключении станда наблюдалось снижение заряда на сетках устройства, что можно объяснить явлением релаксации. С увеличением количества примесей величина электрического потенциала падает из-за уноса заряда частицами. Проведенные эксперименты подтвердили возникновение электрических потенциалов при течении жидкости типа ВМГЗ.

Опытным путем установлено, что природа загрязнителя (алюминий, медь, кварцевая пыль) не оказывает значительного влияния на трибоэлектризацию.

На рис. 7 показана экспериментальная зависимость электрического потенциала от размера ячеек, перепада давления P и расхода Q .

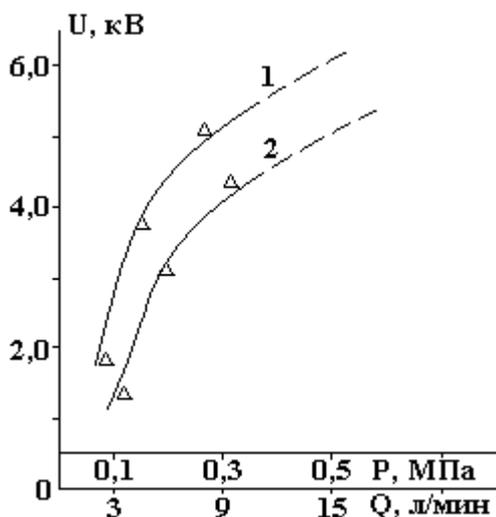


Рис. 7. Зависимость электрического потенциала от размера ячеек, перепада давления и расхода. $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$, d , мкм: 1 – 20; 2 – 50

Величина трибоэлектризации (потенциал U) возрастает при увеличении перепада давления P , расхода жидкости Q , температуры жидкости t и уменьшении размера ячеек сетчатых элементов d , а также при контакте жидкостей с материалами из пластмасс. Это объясняется тем, что при движении жидкости с большей скоростью соответственно большее количество ионов участвует в электролитическом механизме образования электростатического заряда на сетках устройства (концентрация же ионов в определенном объеме жидкости одинакова). Способность элементов с мелкими ячейками создавать больший электрический потенциал вызвана также тем, что поверхность разделения фаз «сетка–жидкость» у этих материалов больше и соответственно они могут адсорбировать большее количество ионов определенного знака.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований автором разработан самоэлектризующийся фильтр, на который получено свидетельство о полезной модели Российского агентства по патентам и товарным знакам № 28451 от 12.07.2002 года.

На ОАО «КЭМЗ» (г. Ковров) проведены производственные испытания самоэлектризующегося фильтра. В качестве рабочей жидкости использовали масло МГЕ-10А. Из полученных результатов следует, что при прохождении жидкости через трибоэлектрофильтр наиболее качественно

задерживаются частицы загрязнения диаметром 10–25 мкм (рис. 8), которые сопоставимы по размерам с зазорами трущихся пар гидромашин.

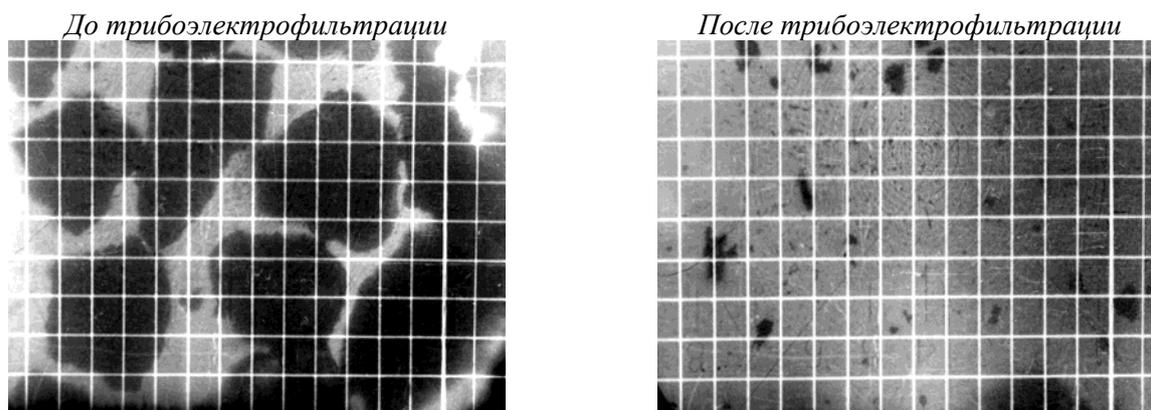


Рис. 8. Микрофотография частиц загрязнений (сетка увеличения $0,05 \times 0,05 \times 150$)

С целью определения эффективности трибоэлектрофльтрации в условиях эксплуатации исследованы два гидропривода управления экскаваторов ЭО-4225А, один из которых оснащен серийным фильтром со специальной вставкой из фторопласта, а другой – обычным серийным фильтром. Трибоэлектрофильтр–вставка (рис. 9) выполнен из фторопласта размером ячеек 200 мкм и установлен на фильтроэлемент грубой очистки. При использовании в гидросистеме управления экскаватором ЭО-4225А фильтров типа «Реготмас» трибоэлектризатор устанавливается внутри фильтроэлемента.



Рис. 9. Трибоэлектрофильтр–вставка

Результаты показали, что фильтр с трибоэлектризационной вставкой очищает рабочую жидкость в среднем эффективнее на 11%. Особенно это заметно в малых размерных группах: до 10 мкм – на 22%; до 50 мкм – 14; до 100 мкм – 12 и свыше 100 мкм – на 6%. Отказов в работе гидропривода управления экскаватором ЭО-4225А и изменения вязкости не наблюдалось.

Сравнение результатов испытаний и расчетов физико-математической модели проведено по анализу гранулометрического состава механических примесей. По результатам прогнозирования физико-математической модели при напряжении $U = 0,5–1,5$ кВ средняя тонкость очистки d трибоэлектрофльтрации соответственно на 6,7–15% выше обычной фльтрации с тем же размером ячеек сетки. Таким образом, средние значения эффективности трибоэлектрофльтрации: теоретическое – 10,7%; экспериментальное – 11%. Усредненная оценка физико-математической модели проведена с использованием квадратичных и абсолютных погрешностей. По результатам расчетов относительная квадратичная ошибка – 12,5%, абсолютная – 25%. Исходя из того, что относительные интегральные показатели ошибок достаточно сопоставимы, можно сделать вывод о качестве математической модели.

Выводы

1. Разработана и экспериментально подтверждена физико-математическая модель трибоэлектрофльтрации в виде дифференциальных уравнений и вспомогательных расчетных формул, после решения которых определены координаты движения твердых частиц, а также теоретически спрогно-

зирована эффективность очистки, равная в среднем 10,7% при изменении электрического потенциала от 0,5 до 1,5 кВ.

2. Получено уравнение регрессии, позволившее минимизировать количество опытов с достаточной точностью и достоверностью, при этом выявлены главные факторы.

3. В результате лабораторных испытаний трибоэлектрофильтра установлено, что электрический потенциал возрастает от 0,1 до 5,5 кВ при увеличении перепада давления, расхода и температуры рабочей жидкости и уменьшении размера ячеек фильтра от 400 до 20 мкм. Наибольшее значение потенциала наблюдалось на элементах, изготовленных из фторопласта с эффективным осаждением частиц размером 10 мкм и менее.

4. Эксплуатационные испытания трибоэлектрофильтра – вставки в гидросистеме управления экскаватором ЭО-4225А показали, что рабочая жидкость очищается эффективнее в среднем на 11%, особенно в малых размерных группах: до 10 мкм – 22%; до 50 мкм – 14%.

5. Проведенные исследования в производственных условиях подтвердили теоретические предпосылки и результаты опытов. Так, сравнительная эффективность по тонкости очистки (11% – при испытаниях, 10,7% – в теории), а также полученные сопоставимые относительные интегральные показатели ошибок подтвердили адекватность физико-математической модели. Трибоэлектрофльтрация рабочей жидкости (с тонкостью очистки в 10 мкм и менее) позволяет увеличить ресурс гидроагрегатов привода управления землеройной машиной от 1,8 до 6,7 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Микипорис Ю.А., Татарнов В.В.* Влияние трибоэлектрической обработки топлива на его поверхностное натяжение // *Электронная обработка материалов.* 1996. № 1. С. 33–35.
2. *Микипорис Ю.А.* Трибоэлектризация топлив // *Электронная обработка материалов.* 1997. № 5–6. С. 52–53.
3. *Микипорис Ю.А.* Влияние трибоэлектризации на поверхностное натяжение // *Электронная обработка материалов.* 1999. № 4. С. 44–46.
4. *Бобровский С.Б.* Теоретические и экспериментальные исследования условий образования и накопления электрических зарядов при перекачке нефтепродуктов: Дис. докт техн наук. М., 1969.
5. *Русаков Б.А.* Повышение ресурса двигателей ВАТ путем совершенствования систем очистки масла / Дис. канд. техн. наук. Рязань, 1994.
6. *Белянин П.Н., Черненко Ж.С.* Авиационные фильтры и очистители гидросистем. М., 1964.

Поступила 23.12.04

Summary

The article is dedicated to the researching of a mineral oil after tribo- electricity treatment in special apparatus – triboelectrofilters. Using triboelectrofilters it is possible to improve industrial environment, save materials and enhance the reliable work of mechanisms.
