

# НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Ф.П. Гросу, М.К. Болога, В.И. Леу, Ал.М. Болога

*Институт прикладной физики АН Молдовы,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, [mbologa@phys.asm.md](mailto:mbologa@phys.asm.md)*

Рассматриваются наиболее характерные особенности процессов электрической фильтрации идеальных и слабопроводящих диэлектрических жидкостей. Констатируется, что в жидких диэлектриках в сильно неоднородных электрических полях наблюдаются явления, аналогичные коронному разряду в газах, со всеми вытекающими последствиями. Процессы электрической очистки (сепарации) трактуются именно с позиций коронного разряда, в частности объясняются электрическая зарядка дисперсных частиц и их транспорт к «электроду-коллектору». С позиций коронного разряда трактуются и пороговые явления при электросепарации: пороги возникновения эффекта очистки и исчезновения, как следствия – появления и исчезновения коронного разряда. Обсуждаются две концепции: экранировки внешнего электрического поля полем объемного электрического заряда и омического сопротивления, осевшего на «электрод-коллектор» слоя дисперсных частиц; обе точки зрения приводят к идентичным результатам. Необходимы дальнейшие исследования, в частности экспериментальные по «ампер–секундным» характеристикам процесса электрической сепарации, а также теоретические в целях уточнения обсужденных концепций и выработки рекомендаций по модернизации и эффективному применению электрической сепарации.

УДК 665:37.014

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность вопросов разделения гетерогенных систем, в частности диэлектрических, типа суспензий, эмульсий, аэрозолей и т.д. сомнений не вызывает. Трудно представить области науки, техники, химической, пищевой, медицинской промышленности и т.п., где задачи, связанные с сепарацией, не возникали бы. Об этом свидетельствуют систематические международные симпозиумы, в том числе и конференции [1].

Существует много способов разделения гетерогенных сред, например центрифугирование, осаждение частиц, механическая фильтрация, не говоря уже о химических возможностях. Свообразными, однако, представляются методы сепарации с помощью электрических полей. Они стали применяться на промышленных предприятиях еще в 50-х годах прошлого столетия в целях очистки дымов от микрочастиц продуктов сгорания (сажи, аэрозолей и т.п.), попадающих в атмосферу и загрязняющих ее. В этом отношении можно указать работы [2–4], непосредственно посвященные вопросам электрической фильтрации воздуха и других газов.

Физическая сущность методов электрической очистки (ЭО), применяемых в газовых электрофильтрах, основывается на явлении коронного разряда. Среди множества особенностей данного типа газового разряда [5–7] выделим те, которые имеют непосредственное отношение к рассматриваемым вопросам. Прежде всего отметим, что этот тип разряда характерен для неоднородных электрических полей, когда возможна сильная *локальная* ионизация среды в ограниченной области пространства - между электродами, создающими поле. При достаточном напряжении между электродами это может произойти в окрестностях электродов малой геометрической кривизны (тонкие проволоки, иглы и т.д.), в которых среда сильно ионизована и в случае газов характеризуется также слабым *свечением*. Эта весьма узкая область размерами порядка радиуса кривизны электрода носит название «коронирующего» слоя, или просто «короны». За пределами данного слоя, в так называемой *внешней* области короны, возникает зона электрически заряженной среды зарядом некоторой объемной плотности  $\rho$ , знака коронирующего электрода. Под действием кулоновской силы  $\mathbf{f} = \rho\mathbf{E}$  среда приходит в макроскопическое движение. Таким образом, другой особенностью коронного разряда является то, что он всегда сопровождается гидродинамическими явлениями, известными под названием электрогидродинамических (ЭГД), или просто «электрического» ветра (ЭВ).

Указанные особенности специфичны и для процесса электрической очистки в целом, ибо дисперсные частицы, подлежащие удалению из очищаемого газа, попадая в область объемного заряда, заряжаются, приобретая некоторый электрический заряд  $q$ . Под действием кулоновской силы  $\mathbf{F} \equiv q\mathbf{E}$  и частично за счет ЭГД потока ( $\mathbf{f} = \rho\mathbf{E}$ ) эти частицы уносятся к противоположному электроду, одновременно служащему и коллектором для их сбора [2–4]. Так вкратце объясняется принцип работы электрического фильтра для газов.

Рассматриваемые явления в общих чертах наблюдаются и в жидких диэлектриках, в которых имеет место, в том числе и «электрический ветер» [8–10], что особенно примечательно. В общем, наличие ЭГД явлений при электрических разрядах в той или иной системе электродов явно говорит о том, что в этих разрядах заряды одной электрической полярности существенно преобладают над таковыми другой полярности. В самом деле, общая формула для плотности электрического тока имеет вид:

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \equiv (k^+ \rho^+ + k^- \rho^-) \mathbf{E} \approx k(\rho^+ + \rho^-) \mathbf{E}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – удельная электропроводность;  $k^\pm$  – подвижности ионов соответствующего знака; в предположении их примерного равенства получим приближенное равенство (1). С другой стороны, избыточная плотность объемных зарядов

$$\rho = \rho^+ - \rho^- \quad (2)$$

и если, например,  $\rho^+ / \rho^- \gg 1$ , то для чисто кулоновской ЭГД силы получим простую формулу:

$$\mathbf{f} = \rho \mathbf{E} = \mathbf{j} / k, \quad (3)$$

причем  $\rho \approx \rho^+$ . Объемная плотность зарядов  $\rho$  и коэффициент подвижности  $k$  в приведенной формуле (3) всегда соответствуют знаку коронирующего электрода.

Данный подход, объединяющий формулы (1)–(3) и описывающиеся ими ЭГД явления, как в случае газов, так и жидкостей носит общее название – «униполярной» проводимости [11]. Заметим, что эти формулы отвечают бинарным электрическим системам, содержащим два типа носителей тока, однако они приближенно остаются в силе и для многокомпонентных систем, если под  $k^\pm$  и  $\rho^\pm$  подразумевать эффективные значения, определяемые равенствами [12]:

$$k^+ \equiv \frac{\sum_i k_i^+ \rho_i^+}{\sum_i \rho_i^+}; \quad k^- \equiv \frac{\sum_i k_i^- \rho_i^-}{\sum_i \rho_i^-}; \quad \rho^+ \equiv \sum_i \rho_i^+; \quad \rho^- \equiv \sum_i \rho_i^-. \quad (4)$$

## ДРУГИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭО И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электрическая сепарация, в принципе, возможна и в электрических полях плоскопараллельного конденсатора, то есть в условиях однородного электрического поля и *отсутствия* коронного разряда. Типичным таким случаем является электролиз, когда на электродах в результате сепарации выделяется вещество. Однако это имеет место в проводящих средах – электролитах, а не диэлектрических, которые здесь рассматриваются. В последнем случае за счет «зарядки – перезарядки» на обкладках конденсатора также могло бы иметь место незначительное разделение фаз, которое, однако, должно быть крайне неэффективным, поскольку имела бы место *поверхностная*, то есть контактная, зарядка частиц. Случай коронного разряда принципиально отличается тем, что электрическая зарядка частиц происходит в сравнительно большом *пространстве*, занятом объемным зарядом, благодаря чему их зарядка происходит значительно эффективнее, ибо охватывает гораздо большее число заряжаемых частиц. К тому же не следует забывать и о транспортной роли электрического ветра.

Таким образом, использование явления «коронирования» (тока) в электрических фильтрах является принципиальной их особенностью. Именно поэтому в качестве одной из основных характеристик электрофильтра, наряду с определяемой характеристикой «концентрация частиц–время», должна приводиться по крайней мере еще одна – «ампер–временная». Кстати, аналогичная ситуация имеется и при электролизе, когда именно *ток* играет решающую роль в процессе. И это понятно, ибо массоперенос по закону Фарадея однозначно связан с переносом заряда, и нечто подобное имеет место и при электрической сепарации. Этому вопросу, к сожалению, не уделяется должного внимания, и в большинстве работ, посвященных электрической очистке, в качестве основного электрического параметра, как правило, приводится напряжение  $U$  на фильтре без данных о зависимости остаточной концентрации дисперсных частиц и от силы электрического тока. То что сила тока должна являться определяющим фактором процесса электрической сепарации, свидетельствуют и опытные данные, согласно которым до появления электрического тока в цепи рабочей ячейки эффекта сепарации нет, хотя напряжение на ячейке отлично от нуля [13].

В пользу *токовой* концепции электрической сепарации говорит и тот факт, что исследователями [14], а также авторами данной работы [13] на проволоках сравнительно большого диаметра

(~ 1 мм), покрытых эмалевой изоляцией и служащих электродами в электрофилтрах, специально создавались насечки («царапины»), чтобы вызвать на них электрический разряд. Ввиду малости размеров этих насечек, разумеется, разряд от них носил коронный характер.

К особенностям электрической сепарации следует отнести и тот факт, что имеется *порог* напряжения ( $U > U_{cr} \Rightarrow j \neq 0$ ), при котором начинается процесс ЭО и который, очевидно, одновременно является и порогом возникновения коронного разряда. С целью выявления новых особенностей ЭО обратимся к типичным экспериментальным зависимостям концентраций дисперсной среды  $\varphi(t)$  при различных напряжениях, приведенных на рис. 1, по данным работы [13].

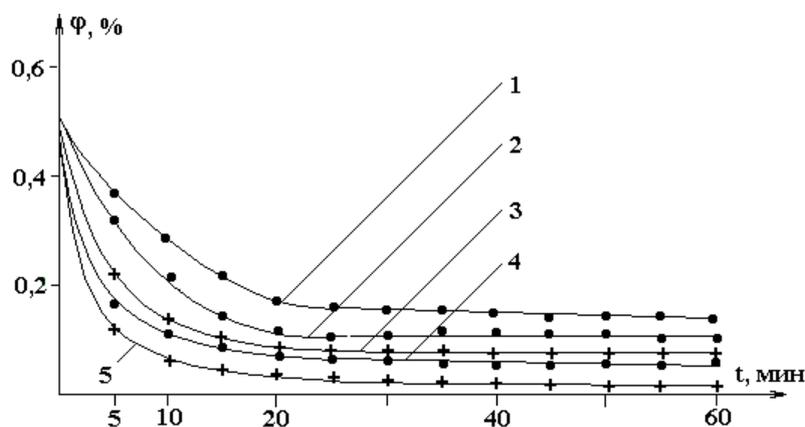


Рис. 1. Зависимость остаточной концентрации от времени обработки для суспензии подсолнечное масло-воск (0,5%)  $U, 10^3 \text{ В}$ : 1–9; 2–15; 3–18; 4–20; 5–23

В соответствии с теоретическими представлениями о релаксационных процессах, в частности об «ампер-секундных» характеристиках электрического разряда в диэлектрических жидкостях в условиях поля плоскопараллельного конденсатора [15], можно было бы ожидать, что кривые рис. 1 последуют простой экспоненте [16]:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cdot \exp(-\alpha t) \quad (5)$$

где  $\varphi_0$  – начальная концентрация;  $\alpha$  – декремент релаксационного процесса, зависящий от напряжения и других факторов. Однако зависимость (5) не соблюдается. Это видно хотя бы из того, что при больших временах ( $t \rightarrow \infty$ ) концентрация не стремится к нулю, как это следует из (5), а к некоторой, отличной от нуля, постоянной, что четко видно из рис. 1.

Данное несоответствие легко устранить, введя предельную концентрацию  $\varphi_\infty \equiv \varphi(t)|_{t \rightarrow \infty} = \text{const} \neq 0$  по формуле

$$\varphi(t) = \varphi_\infty + (\varphi_0 - \varphi_\infty) \cdot \exp(-\alpha t) \quad (6)$$

Тем не менее, несмотря на то что эта формула удовлетворяет и начальному условию, и условию на бесконечности и не является адекватной, что хорошо просматривается из того же рис. 1, который показывает, что «критические» длительности процесса очистки  $t_c$  составляют примерно 30; 35; 40; 45; 50 мин для напряжений: 9; 15; 18; 20; 23 кВ соответственно. При времени, большем указанного, концентрации просто остаются постоянными на минимальном уровне, причем подчеркиваем, что речь идет не об асимптотах, а о горизонтальных секущих  $-\varphi(t) = \varphi_\infty$  при  $t > t_c$ . Это означает, что имеем дело с другой особенностью, интересной прежде всего своей неожиданностью: существует, оказывается, *порог* не только начала процесса ЭО при  $U > U_c$ , но и порог завершения очистительного процесса при времени  $t = t_c$ , после которого дальнейшая сепарация полностью прекращается.

Прежде чем перейти к обсуждению установленных «пороговых» эффектов, отметим некоторые особенности влияния электрической проводимости частиц  $\sigma_1$  на процесс электрической сепарации. А именно экспериментально установлено, что диэлектрические частицы из воска с очень малой удельной проводимостью в подсолнечном масле (рис. 1), перемещаясь к «электроду-коллектору» и достигая его, оседают, образуя прилипший слой гетерозаряда, то есть заряда противоположного знака электрода. В этом легко убедиться коммутацией полярности высокого напряжения на электрофилтре, в результате которого осевшие частицы моментально отталкиваются от коллектора, что и подтверждает сказанное.

В принципе то же самое происходит и в случае полупроводниковых частиц (окись хрома,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) или проводящих (угольных) [17]. Разница лишь в том, что частицы у коллектора собираются не в виде слоя, а в виде «облака», заполняющего лабиринты «электродов–коллекторов», называемых еще ловушками. Такое поведение полупроводящих и проводящих частиц объясняется их частичной перезарядкой на электродах.

В обоих случаях чистая жидкость из пространства вне ловушек удаляется потоком, а сам фильтр после каждого цикла очистки промывается. В конце очистки перед промывкой электрофильтра на него подается напряжение противоположной полярности по отношению к знаку рабочего напряжения, вследствие чего происходят быстрое отталкивание частиц из ловушек, о чем сказано выше, и последующая их эвакуация промывающим потоком.

## К ТЕОРИИ ПОРОГОВЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ЭО ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Среди наиболее важных вопросов, возникающих по обсуждаемой тематике, основным, на наш взгляд, следует признать существование *порога* электрической сепарации гетерогенной системы при любом напряжении на электрофильтре. На этот вопрос и попытаемся ответить, ограничиваясь случаем диэлектрических частиц.

На основе вышеизложенного относительно особенностей коронного разряда и обусловленных им закономерностей электрической сепарации можно указать на три основных объясняющих фактора. Это, во-первых, экранирующее действие объемных зарядов, сопровождающих весь процесс ЭО. Экранировка может привести к такому спаду напряженности поля в области коронирования, при котором корона может «потухнуть», что приведет к исчезновению процесса в целом. Во-вторых, ограничивающим внешнее поле фактором, в случае диэлектрических (непроводящих) частиц, может выступить осевший на «электрод–коллектор» слой достаточно большого электрического *сопротивления*, для того чтобы привести к тому же спаданию напряженности поля в области коронирования, что и экранировка объемным зарядом. Наконец, особый, трудно устранимый фактор, ограничивающий очистительный процесс, – это малый размер частиц. Установлено, что чем меньше размер дисперсных частиц, тем труднее они поддаются процессу очистки. Этого вопроса, требующего специального рассмотрения, в данной работе не коснемся, сосредоточив свое внимание на первых двух факторах, ограничивающих электроочистку.

## ВЛИЯНИЕ ЭКРАНИРОВКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОЛЕМ ОБЪЕМНЫМ ЗАРЯДОМ

Зная факт наличия заряженного слоя, можно понять, почему со временем падает эффект очистки. Это происходит из-за экранировки внешнего электрического поля указанным слоем. Наблюдаемое же *внезапное* прекращение эффекта сепарации теперь можно объяснить *коронным* характером электрического разряда. Действительно, допустим, что критическому напряжению  $U_c$  соответствует некоторая критическая напряженность  $E_c$  начала разряда в жидкости. Далее в процессе снятия кривой  $\varphi^*(t)$ , естественно, при некотором напряжении  $U > U_c$  и, следовательно,  $E > E_c$  со временем, по мере накопления заряженных частиц на коллекторе при *фиксированном* поданном напряжении  $U$ , из-за эффекта экранировки напряженность поля в окрестностях коронирующих точек будет падать, одновременно будет уменьшаться и разрядный ток, однако здесь важно уменьшение *напряженности* поля. Когда напряженность, уменьшаясь от первоначального значения  $E_0 > E_c$ , достигнет критического  $E_c$ , разряд погаснет, а вместе с ним исчезнет процесс зарядки частиц, а следовательно, и сама сепарация, что уже было отмечено.

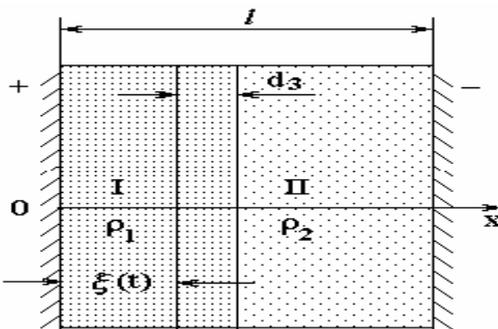


Рис. 2. Расчетная модель электрофильтра

В простейшей модели [18], которую рассмотрим, считаем, что осаждаемый слой однородный и плотность зарядов в нем постоянная, равная  $\rho_1$ , согласно рис. 2. За пределами этого слоя имеется второй слой, по предположению, также однородный, объемной плотностью  $\rho_2$ , причем знаки зарядов одинаковые, совпадающие со знаком «коронирующего» электрода, в нашем случае - отрицательный. Естественно, со временем  $\rho_2$  будет уменьшаться из-за убыли концентрации дисперсных заряженных частиц за пределами  $\xi$ -слоя, и к концу процесса очистки этим зарядом в первом приближении можно будет пренебречь по сравнению с  $\rho_1$ . Тогда согласно теореме Гаусса–Остроградского экранирующую напряженность можно оценить по формуле

$$E_1(x > \xi) = \frac{1}{2\varepsilon_1} \cdot \rho_1 \cdot \xi, \quad (7)$$

где  $\xi$  – толщина слоя; индекс «1» относится к характеристикам слоя. Учитывая, что  $\rho_1 < 0$ , убеждаемся в том, что этот заряд приводит к уменьшению поля в области коронирования. Так как со временем правая часть (7) возрастает как за счет роста  $\rho_1$ , ввиду возможного уплотнения частиц, так и за счет увеличения толщины слоя  $\xi$ , то экранировка может оказаться достаточно эффективной, вплоть до значений напряженности, равной критической  $E_c$ . Действительно, оценим численно правую часть равенства (1). Имеем:

$$E_1 \sim \frac{1}{\varepsilon_1} \cdot |\rho_1| \cdot \xi \sim \frac{1}{\varepsilon_1} \cdot |\mathbf{j} \cdot \nabla \tau_1| \cdot \xi \sim \frac{1}{\varepsilon_1} \cdot j \cdot \frac{\tau_1}{\xi} \cdot \xi \sim \frac{j}{\sigma_1} \leq E_0,$$

то есть напряженность  $E_1$  не выше начального  $E_0$ , но может быть того же порядка, что подтверждает вышесказанное.

Полагаем суммарную напряженность в окрестности коронирующего электрода равной начальной  $E_0$  за вычетом экранирующей (7). Тогда условие существования сепарации гласит:

$$E = E_0 - \frac{|\rho_1| \cdot \xi}{2\varepsilon_1} > E_c. \quad (8)$$

Из этой формулы найдем предельную толщину  $\xi_{mE}$  осаждаемого слоя частиц, определяемую начальной напряженностью и плотностью зарядов:

$$\xi < \frac{2\varepsilon_1 \cdot (E_0 - E_c)}{|\rho_1|} \equiv \xi_{mE}. \quad (9)$$

Фигурирующая здесь напряженность  $E_0$  определяется рабочим напряжением  $U$  на электрофилтре, будучи, очевидно, прямо пропорциональной этой величине:  $E_0 \sim U$ , поэтому чем больше напряжение  $U$ , тем больше и толщина критического слоя и, следовательно, меньше остаточная минимальная концентрация  $\varphi_\infty$ . Как следует из (9), величина  $\xi_{mE}$  является максимально возможной толщиной слоя, которую следует ожидать в процессе электрической очистки при *данном* напряжении (напряженности) на электрофилтре. Обращаем внимание – не путать величину  $\xi_{mE}$  с максимальной величиной  $\xi_m$ , определяемой всей массой дисперсных частиц в жидкости при условии их полного оседания в слой (см. ниже, вторая из формул (10)). Очевидно, ввиду идеальности последнего условия всегда  $\xi_{mE} < \xi_m$ .

Максимальное время обработки  $t_c$ , после которого процесс разделения фаз прекращается, можно вычислить исходя из формулы для зависимости толщины слоя от времени [18]:

$$\xi(t) = \frac{1 - \exp(-\lambda t)}{1 - \nu \cdot \exp(-\lambda t)} \cdot \xi_m, \quad \xi_m \equiv \varphi_0 l / (\gamma_1^*), \quad (10)$$

где  $\xi_m$  – максимальная толщина слоя (при  $t \rightarrow \infty$ ), которая при малых начальных концентрациях  $\varphi_0$  дается второй из формул (10);  $l$  – расстояние между электродами, предполагаемыми плоскими;  $\gamma_1^* \equiv \gamma_1 / \gamma$ ;  $\gamma_1$  – плотность вещества частиц;  $\gamma$  – плотность среды ( $\gamma_1^* \sim 1$ ). Остальные параметры определены формулами:

$$\nu \equiv A\varphi_0 / E_0; \quad \lambda \equiv bqE_0(1 - \nu) / l; \quad A = -\rho_1 l / \varepsilon_2. \quad (11)$$

Потенцируя формулу (10), получим выражение для критического времени  $t_c$ , то есть времени, минимально необходимого для проведения процесса ЭО:

$$t > t_c \equiv \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{1-\nu \cdot B}{1-B}; B \equiv \frac{2 \cdot \varepsilon_1 \cdot (E_0 - E_c)}{|\rho_1| \cdot \xi_m} \equiv \frac{\xi_{mE}}{\xi_m}; b = 1/(6\pi\eta a), \quad (12)$$

где  $B$  – подвижность частиц по Стоксу;  $\eta$  – динамическая вязкость,  $a$  – радиус частиц (одинаковый для всех). Приведем численную оценку длительности процесса очистки  $t_c$  при следующих данных: очистка на 80%, то есть  $B = \xi_{mE}/\xi_m = 0,8$ ;  $\nu = 0,2$ ;  $\lambda = 0,05 \text{ мин}^{-1}$  [18]. По первой формуле (12) получим  $t_c \approx 29$  мин, что соответствует опытным данным [18].

### ОМИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ

Приведенные соображения о пороговых явлениях носили «электростатический» характер в том смысле, что не учтено наличие токов через электрофильтр и основное внимание уделено зарядообразованию. Теперь рассмотрим этот же вопрос с точки зрения закона Ома, заметив предварительно, что исчезновение эффекта электросепарации, в принципе, допускает объяснения и без непосредственного привлечения процессов зарядообразования.

Действительно, усреднив плотности электрических токов  $j_1 = j_2 \equiv j$  по слоям «1» и «2» с учетом  $E_1 = -d\varphi_1/dx$  и  $E_2 = -d\varphi_2/dx$ , получим

$$\int_0^{\xi} \sigma_1 d\varphi_1 = \bar{\sigma}_1 \cdot \varphi_1|_0^{\xi} = \bar{\sigma}_1 \cdot [\varphi_1(\xi) - \varphi_1(0)] = \bar{\sigma}_1 \cdot U_1 = j \cdot \xi;$$

$$\int_{\xi}^l \sigma_2 d\varphi_2 = \bar{\sigma}_2 \cdot \varphi_2|_{\xi}^l = \bar{\sigma}_2 \cdot [\varphi_2(l) - \varphi_2(\xi)] = \bar{\sigma}_2 \cdot U_2 = j \cdot (l - \xi).$$

Таким образом, ввиду  $j_1 = j_2$ , будем иметь

$$\bar{\sigma}_1 \cdot U_1 \cdot (l - \xi) = \bar{\sigma}_2 \cdot U_2 \cdot \xi, \quad (13)$$

где  $\bar{\sigma}_1$ ,  $\bar{\sigma}_2$  – некоторые средние значения на первом ( $x \in [0; \xi]$ ) и втором ( $x \in [\xi; l]$ ) интервалах, на которых имеются падения напряжений  $U_1$  и  $U_2$ . Найдем их, составив еще одно уравнение, согласно которому сумма напряжений должна равняться заданному общему напряжению  $U$  на электрофильтре:

$$U_1 + U_2 = U. \quad (14)$$

Из системы (13), (14) найдем

$$U_1 = \frac{\bar{\sigma}_2 \cdot U}{\bar{\sigma}_2 \cdot \xi + \bar{\sigma}_1 \cdot (l - \xi)} \cdot \xi; \quad U_2 = \frac{\bar{\sigma}_1 \cdot U}{\bar{\sigma}_2 \cdot \xi + \bar{\sigma}_1 \cdot (l - \xi)} \cdot (l - \xi), \quad (15)$$

а соответствующие средние напряженности полей по участкам равны:

$$\bar{E}_1 = \frac{U_1}{\xi} = \frac{\bar{\sigma}_2 \cdot U}{\bar{\sigma}_2 \cdot \xi + \bar{\sigma}_1 \cdot (l - \xi)}; \quad \bar{E}_2 = \frac{U_2}{l - \xi} = \frac{\bar{\sigma}_1 \cdot U}{\bar{\sigma}_2 \cdot \xi + \bar{\sigma}_1 \cdot (l - \xi)}. \quad (16)$$

Эти соотношения являются прямыми следствиями простого закона Ома, и примечательно то, что они справедливы безотносительно к наличию или отсутствию электризации среды, то есть равны ли нулю, или нет плотности зарядов  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . На первый взгляд это может показаться странным, однако ничего странного нет, так как усредненные удельные проводимости  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_2$  неявно учитывают эти заряды. При  $\rho_1 = 0$  и  $\rho_2 = 0$  автоматически просто имели бы  $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1$  и  $\bar{\sigma}_2 = \sigma_2$ .

Применительно к толкованию пороговых явлений основной интерес представляет напряженность поля во второй зоне, где происходит зарядка частиц. Обозначив отношение  $\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_2 \equiv \mu$  с учетом  $l \gg \xi$ , формуле (16) для  $E_2$  придаем вид

$$E_2 = \frac{\mu \cdot U}{\xi + \mu \cdot l} = \frac{\mu}{\xi_* + \mu} \cdot \frac{U}{l}, \quad (17)$$

где  $\xi_* \equiv \xi/l$  – относительная толщина слоя. Полагая для подсолнечного масла [13]  $\bar{\sigma}_2 \sim 10^{-9}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>, а для слоя воска  $\bar{\sigma}_1 \sim 10^{-13}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>, получим  $\mu \sim 10^{-4}$ . Далее,  $\xi \approx \xi_m \approx \varphi_0 \cdot l \approx 5 \cdot 10^{-3} \cdot l$ . Тогда согласно (17) напряженность  $E_2$  в области коронирования, по этим данным, ослабевает в 50 раз по сравнению с  $(U/l) \approx E_0$ , то есть на один-два порядка. По-видимому, это вполне достаточно для исчезновения коронного разряда, что равносильно экранированию внешнего поля (за « $\xi$ -слоем»). Этим можно объяснить пороговое исчезновение коронного разряда, а следовательно, и самого процесса электрической сепарации.

Таким образом, пороговое значение *напряженности* электрического поля, при которой наступает процесс электрической очистки, объясняется наличием порога самого электрического разряда (при  $E = E_c$ ). Так как всякий процесс ЭО начинается с некоторой надкритичной напряженности  $E_0 - E_c$  (см. формулу (9)), то по мере завершения этого процесса, в силу указанных выше причин, происходит падение напряженности  $E_0$  до  $E_c$  при *сохранении* исходного напряжения  $U$ . Переход  $E_0 \rightarrow E_c$  обязан либо экранировке поля  $E_0$  за счет электрических зарядов « $\xi$ -слоя», либо, что равносильно, резкому возрастанию электрического сопротивления этого слоя. Скорее всего имеет место совместное действие обоих факторов.

В заключение заметим, что в электрических фильтрах, в принципе, могут применяться и переменные электрические поля, если время электрической релаксации частиц существенно меньше периода колебаний внешнего электрического поля, так, чтобы за один полупериод колебаний поля заряд частиц мог бы успевать менять свой электрический знак. Однако по ряду причин переменные поля в электрофильтрах реже применяются, чем постоянные. Одна из таких причин – нерегулярные сдвиги по фазам внешнего поля и процессов электрической зарядки различных по физическим параметрам частиц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bologna M.K., Grosu F.P., Leu V.I. Separation of Dielectric Liquids from Mechanical Impurities in a Direct Electric Field. *Proceedings of the 2nd European Conference on Fietration and Separation*. Compiègne, France, October, 2006.
2. Капцов Н.А. *Коронный разряд и его применение в электрофильтрах*. М.: Огиз, 1947.
3. Нестеров С.Р. *Влияние электрического ветра на очистку газов в электрофильтрах. Обзор отечественной и зарубежной литературы*. Отчет НИИОГАЗ. М.: 1968. С. 42.
4. Левитов В.И., Рашидов И.К., Ткаченко В.И. и др. *Дымовые электрофильтры*. М.: Энергия, 1980. 448 с.
5. Лёб Л. *Основные процессы электрических разрядов в газах*. М.: Физматгиз., 1950. 695 с.
6. Капцов Н.А. *Электрические явления в газах и вакууме*. М.: Гостехиздат, 1950.
7. Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М. *Основы электродинамики дисперсных систем*. М.: Энергия, 1974. 420 с.
8. Петриченко Н.А. Электрический ветер в изолирующих жидкостях. *Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук*. ЛГУ, Ленинград, 1973.
9. Остроумов Г.А., Петриченко Н.А. Электрический ветер в изолирующих жидкостях. *Электронная обработка материалов*. 1974, (6), 37–39.
10. Болога М.К. Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
11. Гросу Ф.П. Термоэлектроконвективные явления и их прикладные аспекты. *Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора хабилитат технических наук*. Кишинев, 2009.
12. Гросу Ф.П., Болога М.К. О биполярных структурах объемного заряда в слабопроводящей диэлектрической жидкости во внешнем электростатическом поле. *Электронная обработка материалов*. 2007, **43**(1), 47–51.

13. Болога М.К., Кожухарь И.А., Гросу Ф.П., Леу В.И. Исследование процесса очистки диэлектрических жидкостей от механической примеси в постоянном электрическом поле. *Электронная обработка материалов*. 2001, (5), 34–39.
14. Болога М.К., Потемкина Т.А., Берил И.И. Электродегидратация эмульсии вода – подсолнечное масло. *Электронная обработка материалов*. 1986, (2), 63–66.
15. Сканава Г.И. *Физика диэлектриков (область слабых полей)*. М.; Л.: ГИИТЛ, 1958.
16. Болога М.К., Кожухарь И.А., Гросу Ф.П., Леу В.И. Релаксационные процессы в электрофильтрах. *Сборник трудов Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидких диэлектриков»*. Санкт-Петербург, 26–30 июня 2000, с. 210–213.
17. Леу В.И. Электроочистка трансформаторного масла от механической примеси в постоянном электрическом поле. *Электронная обработка материалов*. 2002, (5), 55–59.
18. 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), 35–40.

Поступила 05.07.11

### Summary

The most characteristic features of the processes of electrical filtration of ideal and low-conducting dielectric fluids are considered. It is noted that in liquid dielectrics in highly inhomogeneous electric fields the phenomena, similar to those at corona discharge in gases with all its consequences, are observed. The processes of electrical purification (separation) are interpreted in terms of corona discharge. In particular, the electric charging of dispersed particles and their transport to the "electrode-collector" are considered. Threshold phenomena at electric separation such as appearance and disappearance of separation effect are treated from the standpoint of corona discharge as well. Two concepts, namely screening of an external electric field by the field volumetric electric charge and ohmic resistance of the layer of dispersed particles, deposited on the collector, are discussed. Both approaches lead to the identical results. To clarify the above-mentioned theoretical concepts and to work out recommendations for the modernization and efficient use of electrical separation the further studies on the experimental time-current characteristics of the process of separation are needed.

---