

В.С. Нагорный

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СООБЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА КАПЛЯМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ПОЛЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия*

В настоящее время актуальной задачей является разработка инновационных электрокаплетруйных технологий. Электрокаплетруйное оборудование и технологии базируются [1–3] на создании (с использованием микропроцессоров или микроЭВМ) линейной последовательности потока монодисперсных капель рабочей жидкости. Таких капель в секунду может быть сформировано до ста тысяч на одном сопле, причем одинакового диаметра – порядка десятков, сотен микрометров, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга, с возможностью сообщения (при необходимости) любой выбранной капле рабочей жидкости из этой последовательности заданной величины электрического заряда того или иного знака и отклонения (в случае необходимости) данной капли в электрическом поле в заданную точку, определяемую технологическим процессом.

Характерными особенностями и преимуществами электрокаплетруйных технологий являются:

– отсутствие подвижных перемещающихся с трением механических элементов в устройствах, их реализующих;

– микропрограммное управление процессами получения линейного потока монодисперсных капель рабочей жидкости с одинаковым расстоянием между каплями, сообщения управляемого как по величине, так и по знаку электрического заряда каплям, их отклонения в электрическом поле, что обеспечивает гибкость управления;

– бесконтактное нанесение рабочих жидкостей, заряженных и незаряженных, на объекты с любой формой поверхностей из различных материалов (химические нити, ткани, пластмассы, стекло, металл, керамика, бумага, куриные яйца и т. д. и т.п.).

Во всех технических и научных приложениях разрабатываемых электрокаплетруйных оборудований и технологий управляемая капля рабочей жидкости является одновременно и **исполнительным элементом** (!) автоматических систем, что существенно увеличивает их быстродействие и позволяет максимально использовать преимущества микропроцессорного управления.

В статье исследуется процесс сообщения электрического заряда каплям диэлектрических рабочих жидкостей в электрическом поле коронного разряда.

В основу данного способа [1–3] положено явление возникновения во внешней зоне коронного разряда, происходящего в электроотрицательных газах и их смесях (каким является воздух) в резко неоднородном электрическом поле, униполярного потока ионов знака коронирующего электрода. Коронный разряд в газах возникает при определенной, так называемой начальной [4], напряженности $E_{кн}$ электрического поля в непосредственной близости от игольчатого электрода при приложении высокого напряжения к электродам типа игла–плоскость.

Начальная напряженность электрического поля $E_{кн}$ коронного разряда находится из условия выполнения самостоятельности коронного разряда в электроотрицательных газах и их смесях:

$$\int_0^{l_k} \alpha_e dx = \ln[(1 + \gamma_u) / \gamma_u] \cong K = \text{const}, \quad (1)$$

когда во внутренней области коронного разряда выполняется неравенство

$$\alpha_e = \alpha_1 - \alpha_a > 0. \quad (2)$$

Здесь α_e – эффективный коэффициент ударной ионизации, определяющий процесс размножения электронов в коронирующем слое при ударной ионизации; α_1 – коэффициент ударной ионизации электронами (первый коэффициент ионизации Таунсенда), определяющий число ионизаций электронами на единицу пути при их движении в электрическом поле вдоль силовых линий, равный произведению числа столкновений на единичном пути электрона с молекулами газа на вероятность того, что эти столкновения закончатся ионизацией, и зависящий от отношения напряженности электрического поля E к давлению p газа; α_a – коэффициент прилипания, характеризующий процесс образования в коронирующем слое устойчивых отрицательных ионов за счет присоединения атомами и молекулами газа лишнего электрона, который уже теряет способность к ионизации; γ_u – обобщенный коэффициент вторичной ионизации, характеризующий среднее количество электронов, образующихся в пределах коронирующего слоя в результате процессов вторичной ионизации; l_k – длина силовых линий в пределах коронирующего слоя; x – путь от катода лавины электронов.

Выполнение условия (2) соответствует так называемому пороговому значению $(E/p)_a = c$, и, следовательно, самостоятельный разряд в газе возможен лишь при $E/p \geq c$.

При реализации способа сообщения униполярного электрического заряда каплям диэлектрических жидкостей в поле коронного разряда расстояния h между электродами типа игла–плоскость относительно малы (не более десятков мм), а радиус закругления игольчатого электрода r_0 составляет от $0,5 \cdot 10^{-2}$ до $9,0 \cdot 10^{-2}$ мм.

На основании проведенных исследований для рассматриваемых в работе приложений получена [4] формула для начальной напряженности электрического поля возникновения коронного разряда $E_{\text{кн}}$, дающая хорошее совпадение результатов расчета с результатами экспериментов в указанном выше диапазоне изменений h и r_0 , принципиальным отличием которой от известных является учет в ней зависимости $E_{\text{кн}}$ от расстояния h между электродами:

$$E_{\text{кн}} = A \rho_0 + B \sqrt{h \rho_0 / r_0}. \quad (3)$$

Здесь

$$A = \frac{c p_0 T}{T_0}, \quad B = \sqrt{\frac{K p_0 T}{a b_1 T_0}}.$$

Коэффициенты a и c находятся из выражения $\alpha_e = p a [(E/p) - c]^2$ вблизи порогового значения $(E/p)_a$, при котором выполняется условие (2) самостоятельности коронного разряда. Относительная плотность ρ_0 газа (воздуха) характеризуется выражением $\rho_0 = p T_0 / (p_0 T)$, где p, p_0 – соответственно абсолютные текущее давление и давление газа (воздуха) при нормальных атмосферных условиях ($p_0 = 101,3$ кПа, $T_0 = 293$ К); T, T_0 – абсолютные температуры газа (воздуха) при p и p_0 соответственно. Коэффициенты a, c находятся экспериментально для данного типа газа, конфигурации электродов и характера напряжения на них.

Коэффициент K определяется из условия (1) выполнения самостоятельности коронного разряда в воздухе; b_1 – эмпирический коэффициент, характеризующий расстояние от электрода с малым радиусом кривизны r_0 , в пределах которого до момента возникновения коронного разряда электрическое поле вблизи порогового значения E/p имеет ярко выраженную неоднородность по длине межэлектродного промежутка (максимальный коэффициент усиления).

При аппроксимации электродной системы сообщения электрического заряда каплям диэлектрических жидкостей софокусными гиперблоидами вращения получено выражение для границы x_k внутренней области короны, вне которой возникает униполярный поток ионов знака потенциала острого электрода:

$$x_k = h - [(h^2 + r_0 h) - 2U \sqrt{h^2 + r_0 h} / (c' \rho_0 \ln \frac{\sqrt{h^2 + r_0 h} + h}{\sqrt{h^2 + r_0 h} - h})]^{0,5}, \quad (4)$$

где h – расстояние между электродами; $c' = c p_0$. При нормальных атмосферных условиях для воздуха $c' = 24,11 \cdot 10^3$ В/см.

Наличие отверстия в плоском электроде не оказывает заметного влияния на распределение электрического поля в непосредственной близости от острия, что и подтвердили результаты моделирования реальных электродных заряжающих диэлектрические жидкости систем в электролитической ванне в широком диапазоне (от 1 до 4 мм) изменения диаметра отверстия. Поэтому этим влиянием можно пренебречь.

Для коаксиальных электродов формулу (3) можно переписать в виде

$$E_{\text{кн}} = A\rho_0 + B\sqrt{[(R/r_0) - 1]\rho_0}, \quad (5)$$

где R – радиус закругления некоронирующего электрода.

Для $R = 5$ мм в диапазоне изменения r_0 от $0,5 \cdot 10^{-2}$ до $9,0 \cdot 10^{-2}$ мм в выражении (5) для воздуха коэффициенты $A = 34,2$ кВ/см, $B = 0,345$ кВ/см.

Расчеты $E_{\text{кн}}$ по выражению (5), полученному из (3), наиболее точно совпадают с экспериментальными данными во всем диапазоне возможных радиусов закругления $r_0 = (0,5 - 9,0) \cdot 10^{-2}$ мм коронирующих электродов для коаксиальных цилиндров при таких малых межэлектродных расстояниях, когда внутренняя область коронного разряда, где $\alpha_e > 0$, становится соизмеримой с расстоянием между электродами [4]. Расчеты по формулам Пика, Таунсенда, Леша, Александрова, Энгеля и Штенбека, не учитывающим зависимость $E_{\text{кн}}$ от расстояния между электродами при таких малых межэлектродных промежутках, дают большие расхождения с экспериментальными данными [4].

Величина начального напряжения короны $U_{\text{кн}}$ для коаксиальных электродов определяется из (5) по формуле

$$U_{\text{кн}} = E_{\text{кн}} r_0 \ln(R/r_0). \quad (6)$$

На основании формулы Потенье для сообщаемого электрического заряда капле диэлектрической жидкости в поле коронного разряда получим

$$q(t) = \frac{12\pi\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2r^2en_0bE_k}{(4\varepsilon_0 + enbt)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)}t, \quad (7)$$

где $\varepsilon_0 \cong 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума (электрическая постоянная); ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости; ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость окружающей каплю диэлектрической жидкости среды (для газов $\varepsilon_2 \cong 1$); r – радиус капли диэлектрической рабочей жидкости, м; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; n_0 – средняя концентрация ионов по всему межэлектродному промежутку; b – подвижность ионов, м²/(В·с); E_k – средняя напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке при коронном разряде, м/В; n – концентрация электронов в поле коронного разряда; t – время нахождения капли диэлектрической жидкости в поле коронного разряда.

Выражение (7) можно переписать в виде

$$q(t) = \frac{q_{\text{max}}en_0bt}{(4\varepsilon_0 + enbt)}, \quad (8)$$

где

$$q_{\text{max}} = \frac{12\pi\varepsilon_0\varepsilon_1\varepsilon_2r^2E_k}{(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)} \quad (9)$$

– максимальный электрический заряд капли диэлектрической рабочей жидкости в поле коронного разряда.

На основе формулы Потенье исследована динамика электризации капель диэлектрических жидкостей различного диаметра и различной диэлектрической проницаемостью (результаты представлены на рисунках). Получены соответствующие зависимости с числовыми коэффициентами сообщаемого в поле коронного разряда капле диэлектрической жидкости электрического заряда в функции от радиуса капли, диэлектрической проницаемости жидкости, подвижности униполярных ионов при отрицательной и положительной короне (положительном и отрицательном потенциале

напряжения на игольчатом электроде), а также значения средней напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке.

Все зависимости получены для наиболее реального случая сообщения электрического заряда каплям диэлектрических рабочих жидкостей при реализации электрокапеструйных технологий, когда коронный разряд происходит в воздухе между электродами типа игла–плоскость.

При этом средняя концентрация ионов по всему межэлектродному промежутку при коронном разряде в соответствии с [5] будет составлять $n_0 = 10^{14}$ ион/м³. Поэтому в первом приближении, принимая в (7) $n_0 = n = 10^{14}$ ион/м³, выражение для воздуха переписываем в виде

$$q(t) = \frac{533,82 \cdot 10^{-17} \cdot \varepsilon_1 \cdot r^2 \cdot b \cdot E_k \cdot t}{(35,40 \cdot 10^{-12} + 1,60 \cdot 10^{-5} \cdot b \cdot t)(\varepsilon_1 + 2)}. \quad (10)$$

Рассмотрим способ сообщения каплям отрицательного электрического заряда при отрицательном потенциале игольчатого электрода. В этом случае во внешней области коронного разряда возникнет униполярный поток отрицательных ионов. Подвижность отрицательных ионов в воздухе [2] $b^- = 1,80 \cdot 10^{-4}$ м²/В·с.

Тогда выражение (10) переписывается в виде

$$q(t) = \frac{960,87 \cdot 10^{-21} \cdot \varepsilon_1 \cdot r^2 \cdot E_k \cdot t}{(35,40 \cdot 10^{-12} + 2,88 \cdot 10^{-9} \cdot t)(\varepsilon_1 + 2)}. \quad (11)$$

На рис. 1–3 представлены результаты исследований сообщения каплям отрицательного электрического заряда, то есть в поле отрицательного коронного разряда в воздухе.

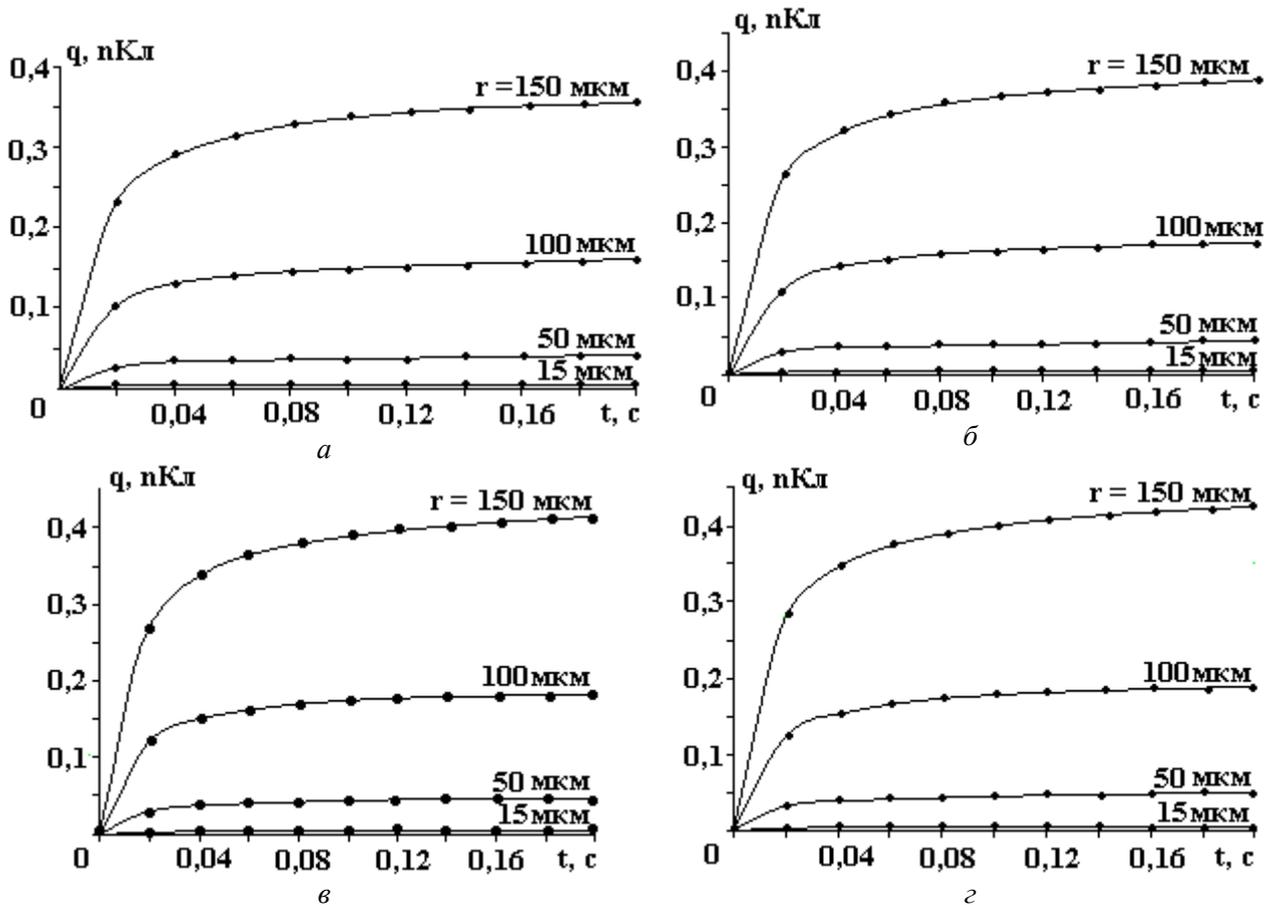


Рис. 1. Динамика электризации капель различных размеров в поле отрицательного коронного разряда при относительной диэлектрической проницаемости диэлектрических жидкостей $\varepsilon_1 = 2$. а – 2; б – 2,4; в – 3,8; г – 3,0, $E_k = 10^5$ В/м

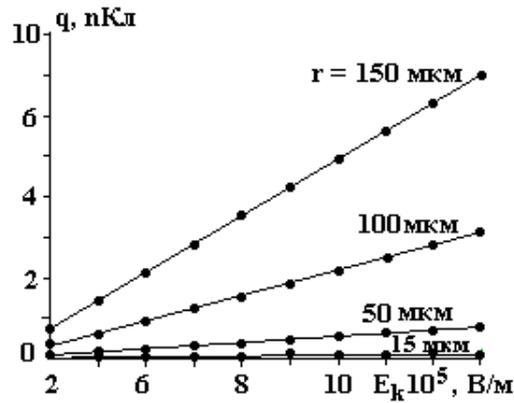


Рис. 2. Влияние напряженности поля отрицательного коронного разряда на заряд капель при $t = 0,1$ с и $\epsilon_1 = 2,2$

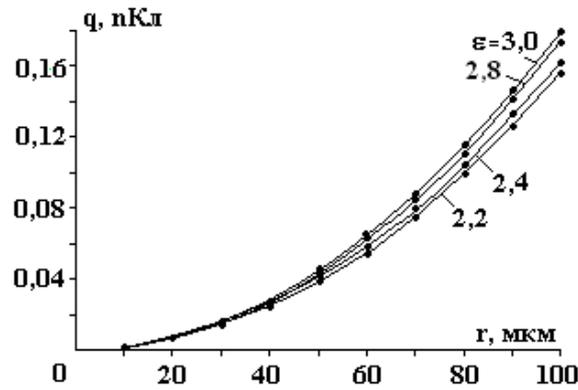


Рис. 3. Влияние радиуса капель и диэлектрической проницаемости на их заряд в поле отрицательного коронного разряда при $t = 0,1$ с, $E_k = 10^5$ В/м

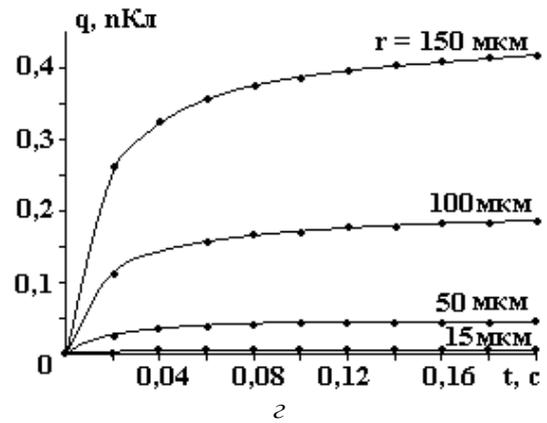
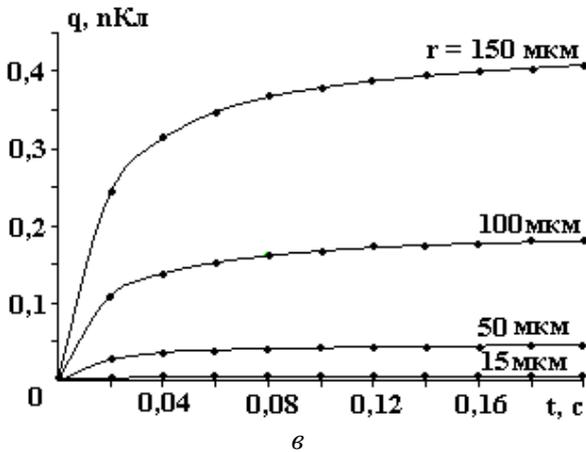
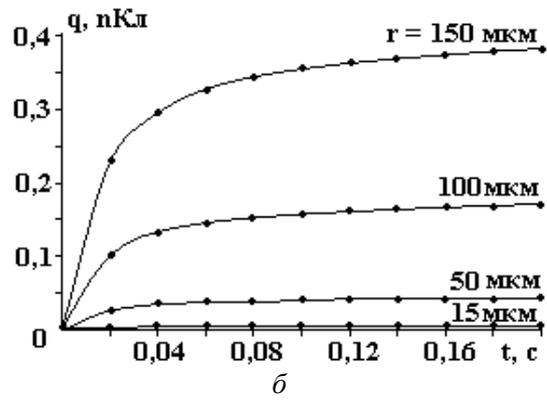
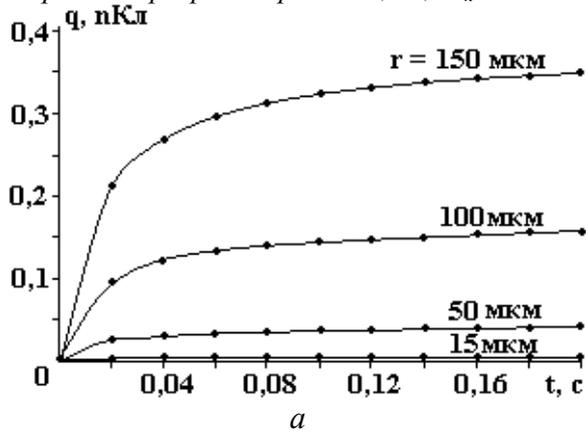


Рис. 4. Динамика электризации капель различных размеров в поле положительного коронного разряда при относительной диэлектрической проницаемости диэлектрических жидкостей $\epsilon_1 = \epsilon$: а - 2; б - 2,4; в - 2,8; з - 3,0, $E_k = 10^5$ В/м

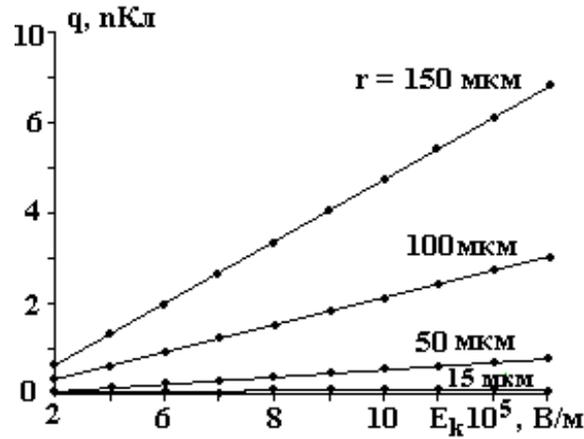


Рис. 5. Влияние напряженности поля положительного коронного разряда на заряд капель при $t = 0,1$ с и $\varepsilon_1 = 2,2$

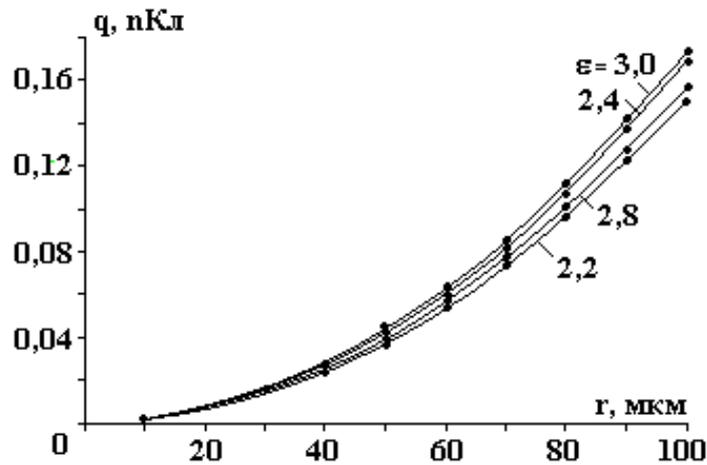


Рис. 6. Влияние радиуса капли и диэлектрической проницаемости жидкостей на заряд капель в поле положительного коронного разряда при $t = 0,1$ с, $E_k = 10^5$ В/м

Для сообщения положительного электрического заряда каплям на игольчатый электрод подают положительный потенциал. Подвижность положительных ионов в воздухе [2] $b^+ = 1,40 \cdot 10^{-4}$ м²/В·с. Тогда выражение (10) переписывается в виде

$$q(t) = \frac{747,35 \cdot 10^{-21} \cdot \varepsilon_1 \cdot r^2 \cdot E_k \cdot t}{(35,40 \cdot 10^{-12} + 2,24 \cdot 10^{-9} \cdot t)(\varepsilon_1 + 2)}. \quad (12)$$

На рис. 4–6 в соответствии с (12) представлены результаты исследований сообщения каплям положительного электрического заряда.

На основании проведенных исследований (рис. 1–6) и с учетом [1–3] можно сделать следующие выводы:

- вне зависимости от полярности создаваемого во внешней области коронного разряда униполярного потока ионов (полярности острия) капли различных диаметров приобретают электрический заряд, равный 90% своего предельного значения за время 0,1–0,12 с нахождения в поле коронного разряда. Следовательно, при реализации электрокаплеструйных технологий необходимо (с учетом скорости движения в них капель рабочей жидкости) соответствующим образом выбрать длину межэлектродного промежутка;

- имеется возможность легко регулировать знак и величину сообщаемого каплям электрического заряда изменениям полярности коронирующего острого электрода и значения напря-

жения на электродах, причем чем больше диаметр капли, тем больше сообщаемый ей электрический заряд;

– при отрицательной короне для выбранного типа диэлектрической жидкости капля одного и того диаметра при одной и той же напряженности электрического поля приобретает электрический заряд больший по величине, чем при положительной короне. При этом одновременно расширяется (при выбранных расстояниях между коронирующими электродами) диапазон изменения напряжения на электродах до искрового пробоя межэлектродного промежутка;

– чем больше относительная диэлектрическая проницаемость рабочей диэлектрической жидкости, тем больший по величине сообщаемый капле электрический заряд при одних и тех же напряжении и полярности на электродах и выбранном межэлектродном промежутке;

– с уменьшением радиуса закругления r_0 коронирующего игольчатого электрода коронный разряд, используемый для сообщения электрического заряда каплям диэлектрических жидкостей, возникает при меньшем напряжении на электродах;

– чем меньше r_0 , тем больший по величине электрический заряд можно сообщить капле при одном и том же напряжении на коронирующих электродах;

– с уменьшением расстояния между коронирующими электродами уменьшается рабочий диапазон изменения напряжения на электродах при сообщении электрического заряда каплям диэлектрических жидкостей в электрическом поле коронного разряда.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в соответствии с проектом № 05-01-08073 офи-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Нагорный В.С., Левченко Ю.А.* Электрокаплеструйная автоматика в производстве химических нитей. Спб.: Политехника, 2001. 231 с.
2. *Нагорный В.С.* Электрофлюидные преобразователи. Л.: Судостроение, 1987. 251 с.
3. *Нагорный В.С.* Электрокаплеструйные регистрирующие устройства. Л.: Машиностроение, 1988. 269 с.
4. *Нагорный В.С.* Начальная напряженность электрического поля возникновения коронного разряда при малых межэлектродных промежутках. *Электричество*. 2004. № 12. С. 8–11.
5. *Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М.* Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.: Энергия, 1974. 480 с.

Поступила 14.12.05

Summary

For the realization of the electric dispersed-jet technology, the dynamic behaviors of imparting a value-control charge to dielectric liquids' drops in the field of corona discharge, originated under condition of short interelectrode gap, are investigated.
