

УДК 532.517.013.4 : 537.2

Вердиев М.Г., Гусейнов М.К., Набиев Ш.Ш.

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ЖИДКОСТЕЙ, РАСПЫЛЁННЫХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Verdiyev M.G., Guseynov M.K., Nabiyev Sh.Sh.

ASSESSMENT OF THE SIZES OF NANOLARGE-SCALE PARTICLES OF THE LIQUIDS SPRAYED IN ELECTRIC FIELD

В работе предложена модель распыления жидкостей в электрическом поле с учетом влияния среды, физических свойств жидкости и технологических параметров распыления. На основе предложенной модели получена формула для расчёта размеров частиц жидкостей по параметрам процесса распыления, свойств жидкости и воздуха. Показано, что влиянием воздуха на размер частиц при электрических потенциалах до 11 кВ можно пренебречь.

Ключевые слова: *распыление жидкости, электростатическое диспергирование жидкости, частицы жидкости, размер распыленных частиц жидкости.*

A model of liquid sputtering in the electric field with a glance of environmental influence, physical qualities of liquids and technological parameters is offered in the work. On the base of the offered model has been got a formula for counting the dimensions of liquids particles in the parameters of sputtering process, qualities of liquid and air. It is shown in the work that air influence on particles dimensions in the presence of electric potentials till 11 kw can be neglected.

Key words: *liquid dispersion, electrostatic dispersgating of liquid, of a particle of liquid, the size of the sprayed liquid particles.*

Введение

Проблема расчета параметров электродиспергирования жидкости во внешних электрических полях представляется весьма актуальной в связи с многочисленными физическими, техническими и технологическими задачами [1,2].

Для эффективной реализации современных технологий необходимо создание аэрозолей с повышенными требованиями по размерам формируемых частиц, монодисперсности и плотности частиц по сечению потока. При этом наиболее распространенные способы распыления (электростатический, гидравлический, пневматический) не позволяют создавать мелкодисперсные

аэрозоли с необходимыми размерами частиц и требуемой производительностью [3].

Целью данной работы является определение размера частиц электродиспергированной жидкости и оптимизация условий электродинамического распыления, при которых реализуются аэрозоли с необходимыми размерами частиц.

Теоретическая часть

Начнем рассмотрение с наиболее простого случая - движения дисперсного потока жидкости в вакууме, а затем перейдем к более сложной задаче - движению дисперсного потока жидкости в воздухе.

Уравнение движения для капли жидкости в векторной форме имеет вид:

$$m\vec{a} = \vec{F}_t + \vec{F}_э \quad (1)$$

Проецируя уравнение (1) на ось OX получим:

$$ma_x = F_э = qE = q \frac{U}{X} \quad (2)$$

где q - заряд капли, U , x – разность потенциалов и расстояние между электродами.

Считая, однородным электрическое поле между электродами запишем уравнение координаты X :

$$X = \frac{a_x t^2}{2} \quad (3)$$

для координаты Y справедливо уравнение

$$Y = \frac{gt^2}{2} \quad (4)$$

Так как время полета по оси X -ов и время падения по оси Y -ов одинаковы запишем:

$$\frac{2x}{a_x} = \frac{2y}{g} \quad (5)$$

Откуда

$$a_x = \frac{xg}{y} \quad (6)$$

подставив (6) в (2) получим выражение для массы капли

$$m = \frac{qUy}{x^2 g} \quad (7)$$

выразив $m = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi r^3$, найдем радиус капли:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3qUy}{4\pi\rho x^2 g}} \quad (8)$$

С учетом критерия неустойчивости Релея [4], заряд q капли в момент отрыва равен:

$$q = \sqrt{\frac{16\pi\sigma\epsilon R^3}{k}}, \quad (9)$$

где σ , ϵ , k , R - соответственно сила поверхностного натяжения, диэлектрическая проницаемость среды, коэффициент пропорциональности, радиус капилляра.

Подставив (9) в (8) получим:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3Uy}{4\pi\rho x^2 g} \sqrt{\frac{16\pi\sigma\epsilon R^3}{k}}} \quad (10)$$

Из-за кулоновских сил отталкивания заряженная капля начинает распадаться на мелкие частицы [5]. Для приближенной оценки количества дочерних частиц воспользуемся выражением для силы тока

$$I = NqvS, \quad (11)$$

где N – количество частиц в единице объема дисперсного потока, q , v – заряд и скорость частиц, S – площадь поперечного сечения капилляра - первого электрода (рис.1). Так как сила тока по ходу дисперсного потока одинакова, то можем записать следующее уравнение:

$$I = Nqv_1S_1 = \frac{N}{n}qv_2S_2 \quad (12)$$

где n – количество мелких частиц, на которое распадается исходная частица, v_2 – скорость дочерних частиц, S_2 – площадь сечения дисперсного потока на втором электроде (рис.1).

В предположении, что частицы плотно упакованы на площади сечения у второго электрода, для числа частиц n из (12) получаем:

$$n = \frac{S_2 v_2}{S_1 v_1} \quad (13)$$

Далее произведем сравнительную оценку величин v_1 и v_2

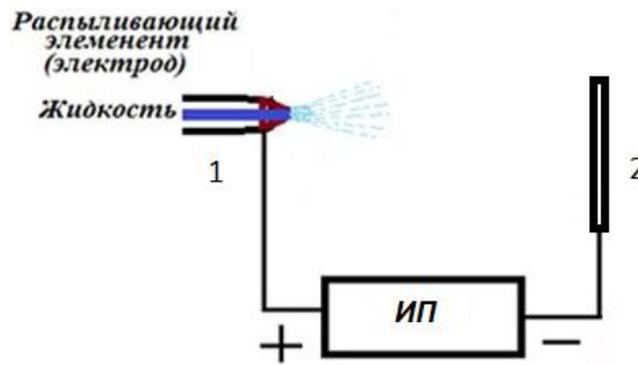


Рисунок 1 - Схема распыления жидкостей в электрическом поле

Для этого запишем следующие уравнения:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = q_1 U; \quad \frac{m_2 v_2^2}{2} = q_2 U \quad (14)$$

$$\begin{cases} m_1 = \rho V_1; & m_2 = \rho V_2 \\ q_1 = \rho_{q_1} V_1; & q_2 = \rho_{q_2} V_2 \end{cases} \quad (15)$$

где $\rho_{q_1}, m_1, v_1, \rho, V_1$ – соответственно объемная плотность заряда, масса, скорость, плотность и объем исходной частицы; $\rho_{q_2}, m_2, v_2, V_2$ – объемная плотность заряда, масса, скорость, плотность и объем дочерней частицы.

Перепишем уравнение (14) с учетом (15)

$$\begin{aligned} \frac{\rho V_1 v_1^2}{2} &= \rho_{q_1} V_1 U; & \frac{\rho V_2 v_2^2}{2} &= \rho_{q_2} V_2 U \\ v_1 &= \sqrt{\frac{2\rho_{q_1} U}{\rho}} & v_2 &= \sqrt{\frac{2\rho_{q_2} U}{\rho}} \end{aligned} \quad (16)$$

Так как при распаде капли на мелкие частицы заряд распределяется одинаково, то $\rho_{q_1} = \rho_{q_2}$, следовательно, $v_2 = v_1$ (17).

С учетом (17) и (13) перепишем выражение (10) в виде:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3Uy}{4\pi\rho x^2 g} \sqrt{\frac{16\pi\sigma\epsilon R^3}{k} \frac{S_1}{S_2}}} = \sqrt[3]{\frac{3Uy}{4\pi\rho x^2 g} \sqrt{\frac{16\pi\sigma\epsilon R^3}{k} \frac{R^2}{R_{II}^2}}} \quad (17)$$

Где R_{II} – радиус пятна на втором электроде, R – радиус капилляра-первого электрода.

Далее рассмотрим процесс электрораспыления жидкости в воздухе.

Запишем уравнение движения для капли жидкости в электрическом по-

ле с учетом силы сопротивления воздуха. Силой Архимеда пренебрегаем, так как она на много меньше, чем сила тяжести (примерно в тысячу раз меньше, чем сила тяжести).

$$m\vec{a} = \vec{F}_g + \vec{F}_{\text{ТЯЖ}} + \vec{F}_{\text{СТ}} \quad (18)$$

Проецируя уравнение (18) на ось ОХ получим:

$$m\vec{a} = \vec{F}_g - 6\pi\mu vr = q\frac{U}{x} - 6\pi\mu vr \quad (19)$$

Используя среднее значение ускорения a_x (6), которое может меняться от максимального значения $a_x = \frac{xg}{y}$ до минимального $a_x = 0$, запишем (19) в виде:

$$m = \frac{qU2y}{x^2g} - \frac{6\pi\mu vr2y}{xg} \quad (20)$$

или

$$\rho \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{qU2y}{x^2g} - \frac{6\pi\mu vr2y}{xg} \quad (21)$$

откуда

$$r^3 = \frac{3qU2y}{4x^2g\rho} - \frac{18\pi\mu vr2y}{4\pi\rho xg} \quad (22)$$

или

$$r^3 + \frac{9\pi\mu vry}{\pi\rho xg} - \frac{3qUy}{2x^2g\rho} = 0 \quad (23)$$

обозначив

$$\frac{9\mu vry}{\rho xg} = p, \quad \frac{3qUy}{2\pi x^2g\rho} = \gamma \quad (24)$$

приведем уравнение (23) к неполному кубическому уравнению

$$r^3 + pr - \gamma = 0 \quad (25)$$

Данное кубическое уравнение имеет три корня: два комплексных и один вещественный корень. Согласно формуле Кардана вещественный корень равен:

$$r = A + B,$$

где

$$A = \sqrt[3]{-\frac{(-\gamma)}{2} + \sqrt{Q}}$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{(-\gamma)}{2} - \sqrt{Q}}$$

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{-\gamma}{3}\right)^2 \quad (26)$$

С учетом обозначений (24) имеем:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3qUy}{4\pi\rho x^2 g} + \sqrt{\left(\frac{3\mu v y}{\rho x g}\right)^3 + \left(\frac{3qUy}{4\pi\rho x^2 g}\right)^2}} + \sqrt[3]{\frac{3qUy}{4\pi\rho x^2 g} - \sqrt{\left(\frac{3\mu v y}{\rho x g}\right)^3 + \left(\frac{3qUy}{4\pi\rho x^2 g}\right)^2}}, \quad (27)$$

где $q = \sqrt{\frac{16\pi\sigma\epsilon R^3}{k}}$ - заряд исходной капли, μ - коэффициент вязкости воздуха, v - скорость движения капли, y - координата по оси - oy , ρ - плотность жидкости, x - координата по оси - ox , g - ускорение свободного падения.

Учитывая распад капли на n (13) дочерних капель, окончательно получим:

$$r = \left(\sqrt[3]{\frac{3qUy}{4\pi\rho x^2 g} + \sqrt{\left(\frac{3\mu v y}{\rho x g}\right)^3 + \left(\frac{3qUy}{4\pi\rho x^2 g}\right)^2}} + \sqrt[3]{\frac{3qUy}{4\pi\rho x^2 g} - \sqrt{\left(\frac{3\mu v y}{\rho x g}\right)^3 + \left(\frac{3qUy}{4\pi\rho x^2 g}\right)^2}} \right) \frac{R^2}{R_n^2} \quad (28)$$

Результаты и обсуждения

Расчеты проводились для воды, жидкого парафина, трансформаторного масла и др. жидкостей при следующих значениях параметров распыления: $U=11000В$; $R = 4 * 10^{-4}м$; $\mu = 1,78 * 10^{-5} kg/m s$; $x=0,001 \div 0,02 м$.

На рисунке 2 показаны размеры частиц воды, рассчитанные в соответствии с предложенной моделью для вакуума и воздуха.

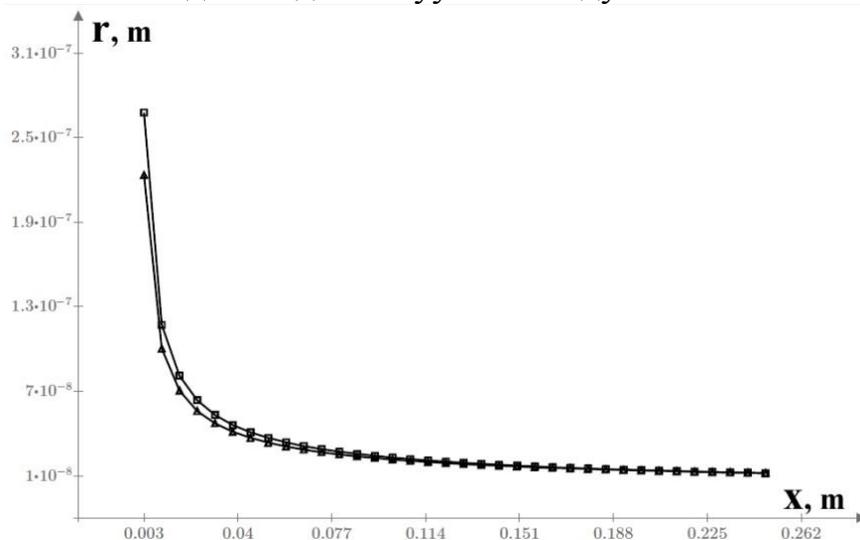


Рисунок 2 - Динамика изменения радиуса капель в вакууме и воздухе в зависимости от расстояния между электродами. \square - вакуум, \triangle - среда

Видно, что графики, иллюстрирующие динамику уменьшения радиуса частиц дисперсного потока вследствие их распада почти сливаются, что свидетельствует о незначительном влиянии воздуха на размер частиц.

Также видно, что частицы лишь немного уменьшаются в размерах в полете. Это соответствует картине наблюдаемой в эксперименте.

Расчетное значение радиуса частиц парафина составляет примерно 10^{-8} м, что соответствует результатам измерений с помощью зондового микроскопа.

Вывод.

Количественные оценки, сделанные в рамках рассмотренной модели, позволяют утверждать, что влияние воздуха на размер распыляемых частиц жидкости можно пренебречь, а решающее влияние на процесс распыления оказывает размер электрода – капилляра и разность потенциалов между электродами.

Применение предложенной модели позволяет определить оптимальные условия электродинамического распыления жидкостей, при которых реализуется стабильный режим генерирования монодисперсных частиц жидкостей.

Рассчитанные размеры частиц, распыленных в электрическом поле жидкостей, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Таким образом, можно говорить о физической адекватности предложенной модели (28).

Библиографический список:

1. Дубников В.Г., Шабалин А.Л. Препринт ИЯФ СО ФН СССР №87-63. Новосибирск, 1987. 66 с.
2. Григорьев А.И., Ширяева С.О. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1994. № 3. С. 3-22.
3. Коженков В.И., Фукс Н.А. Электродинамическое распыление жидкости// Успехи химии. - 1976.- Т. 45, N 12. - С. 2274-2284.
4. Rayleigh. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity// Phil. Mag. - 1882. - V. 14. - P. 184-186.
5. Нагорный В.С. Электрокаплеструйные регистрирующие устройства.- Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1988.