

С. И. ПОПОВ, академик И. В. ПЕТРЯНОВ

## К МЕХАНИЗМУ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Несмотря на богатый экспериментальный материал, единой точки зрения на механизм процесса электростатического распыления не существует. В наиболее ранних работах основное внимание уделялось энергетической стороне постановки задачи. При этом рассматривались начальная и конечная стадии процесса и были получены выражения для стабильного ансамбля капелек, образующихся из заряженного объема (<sup>1</sup>). При таком подходе, естественно, игнорируется влияние на процесс свойств жидкости (исключая поверхностное натяжение  $\sigma$ ).

Этот подход может быть применен при исследовании низкоэнергетических, медленных процессов, а также процессов, идущих с жидкостями с очень высокой электропроводностью  $\gamma$ . Неслучайно поэтому, что основные закономерности этого подхода выполняются при распылении жидкостей при низких значениях потенциала, накладываемого на дюзу, из которой происходит истечение жидкости.

Замечено, однако, что для подавляющего числа жидкостей и растворов при значительных величинах напряженности электрического поля наблюдается резкий скачок: распыл идет через промежуточную стадию образования жидкой нити. При этом отмечено также, что размеры капелек существенно зависят не только от внешних параметров процесса, таких как напряжение  $U$ , объемная скорость истечения  $G$ , но также и от свойств жидкости: диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , вязкости  $\eta$ , дипольного момента  $\mu$  и ряда других. Картина распыления, таким образом, резко усложняется.

В неидеально проводящей жидкости со временем релаксации зарядов  $\tau$  могут существовать значительные объемные электрические силы в том случае, когда время деформации элемента жидкости соизмеримо с  $\tau$ .

Для стадии образования жидкой нити эти силы существуют, когда выполняется условие:  $\epsilon_0 \epsilon / \gamma \sim dz / dW_z$ .

При наличии поля внутри нити существует два вида сил: объемная электрическая сила  $f_1 = \rho_e E$ , где  $\rho_e$  — объемная плотность заряда, и пондермоторная сила  $f_2 = \frac{1}{2} \nabla (\epsilon_0 E^2 \rho \partial \epsilon / \partial \rho) - \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \nabla \epsilon$ , где  $\rho$  — плотность жидкости.

Воспользовавшись наиболее упрощенной связью между  $\rho$  и  $\epsilon$ , выраженной законом Клаузиуса — Мосотти и пренебрегая вторым членом в выражении для  $f_2$ , имеем  $f_2 \simeq \frac{\epsilon_0}{3} (\epsilon - 1) (\epsilon + 2) E_z dE_z / dz$ . В то же время оценка для  $f_1$  дает  $f_1 \simeq \epsilon_0 \epsilon E_z dE_z / dz$ . Практически для всех жидкостей  $f_2 > f_1$ .

Основываясь на этих положениях и принимая, что пондермоторные силы работают против вязких сил, было получено выражение для конечного радиуса нити (<sup>2</sup>)

$$r_c = 2,16 (G / (U - U_0))^{0,5} [\eta \epsilon / \gamma (\epsilon - 1) (\epsilon + 2)]^{0,25} \quad (1)$$

и для критической напряженности поля, необходимой для формирования этой нити

$$E_{кр} = \frac{2,45}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{\gamma \eta}{\epsilon (\epsilon - 1) (\epsilon + 2)}} \quad (2)$$

Результаты исследований дисперсности частиц показали, что выражение (1) вполне корректно описывает основные черты процесса (3).

Желательно, однако, иметь более прямые экспериментальные доказательства преобладающего влияния объемных сил в процессе электростатического распыления. Иными словами, нужно ответить на вопрос, пропорционален ли заряд капелек, полученных

в процессе электростатического распыления при его фиксированных параметрах, их объему. Желательно также проследить изменение заряда капелек в зависимости от различных параметров процесса.

Полагая, что напряженность электрического поля вдоль оси нити изменяется по закону  $E_z = E_{кр} r_0^2 / z^2$ , из известного выражения  $\text{div } E = \rho_0 / \epsilon \epsilon_0$  легко оценить объемную плотность заряда  $\rho_0 = 2\epsilon_0 \epsilon E_{кр} r_0^2 / z^3$ . В последнем выражении  $r_0$  — область существования объемного заряда и, очевидно,  $r_0$  можно отождествить с  $r$ ; характерный размер области существования объемного заряда по оси  $z$  можно, таким образом, принять равным  $2r_0$ . Из выражений (1) и (2) имеем окончательный результат для определения  $\rho_0$ :

$$\rho_0 = 2,8 \cdot 10^{-1} (U - U_0) / G)^{0,5} \times [\gamma^3 \eta \epsilon / (\epsilon - 1)(\epsilon + 2)]^{0,25}. \quad (3)$$

При исследовании распределения частиц по зарядам большое внимание следует обращать на вторичные, маскирующие начальный заряд процессы. В обычных условиях главным мешающим фактором является зарядка частиц коронным током. С целью устранения короны, опыты проводились на дюзе, выполненной из тефлона и при минимальных значениях потенциала, при котором еще наблюдается образование струйного режима (20 ÷ 30 кв). Отметим, что при повышенных значениях потенциала распределение заряда частиц по их размерам подчиняется квадратичной зависимости. Так как опыты проводились при распылении жидкости,

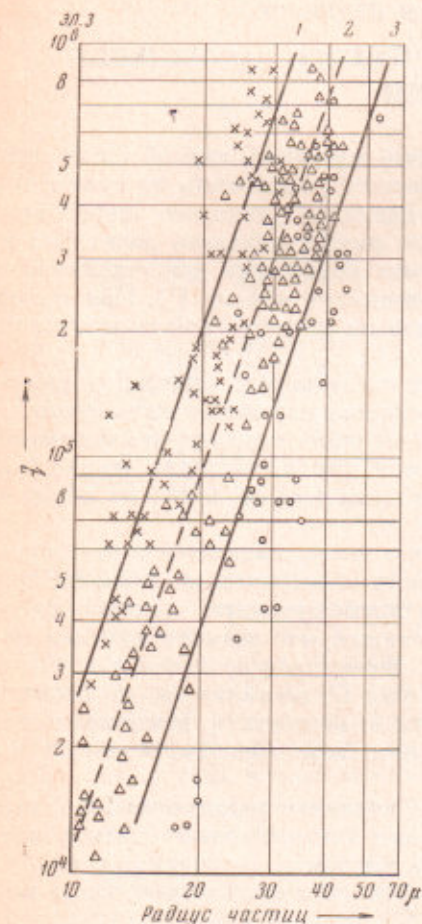


Рис. 1. Зависимость заряда частиц от их размера. Растворы смол: 1 —  $\eta = 0,049$  нсек/м<sup>2</sup>;  $\gamma = 7,7 \cdot 10^{-5}$  мо/м;  $\epsilon = 11$ ; 2 —  $\eta = 0,052$  нсек/м<sup>2</sup>;  $\gamma = 6 \cdot 10^{-5}$  мо/м;  $\epsilon = 12$ ; 3 —  $\eta = 0,055$  нсек/м<sup>2</sup>;  $\gamma = 5,5 \cdot 10^{-5}$  мо/м;  $\epsilon = 11$ .  $U = 20$  кв,  $G = 2,5 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/сек

истекающей из дюзы, помещенной в плоско-параллельный конденсатор, то указанная зависимость вполне объясняется механизмом зарядки по Потенье. При отсутствии коронного тока заряд частиц резко отклоняется от указанной выше зависимости. Многочисленные эксперименты, проведенные на различных жидкостях, показывают, что в этом случае заряд частиц пропорционален их объему. На рис. 1 представлены типичные зависимости. Обработка методом наименьших квадратов дает для показателей степени в зависимости  $q \sim R^n$  следующие значения:  $n = 2,6; 3,3; 3,0$ . На рис. 2 представлена зависимость заряда капелек от накладываемого напряжения. В начальных областях кривых хорошо прослеживается зависимость  $q \sim (U - U_0)^{0,5}$  ( $U_0$  — потенциал пространственного заряда).

При дальнейшем повышении  $U$  кривые проходят через точки перегиба, а затем рост заряда идет более быстрым темпом. Резкое возрастание заряда объясняется увеличением электропроводности жидкости и окружающей среды из-за ионизации их молекул в сильных полях. Экспериментальные результаты дают  $q \sim G^{-0,5}$  (см. рис. 3). Зависимость заряда от комплекса  $(\gamma^3 \eta / \epsilon)^{0,25}$  близка к линейной.

Таким образом, функциональные зависимости, даваемые выражением (3), хорошо описывают зарядку частиц. Абсолютный расчет заряда требует знания величины  $U_0$ , определение которой в ряде случаев затруднительно. Сравнительно недавно (4) опубликованы экспериментальные данные по распылению глицерина с добавками NaCl в электростатическом поле при вакууме. В этом случае  $U_0$  пренебрежимо мало,

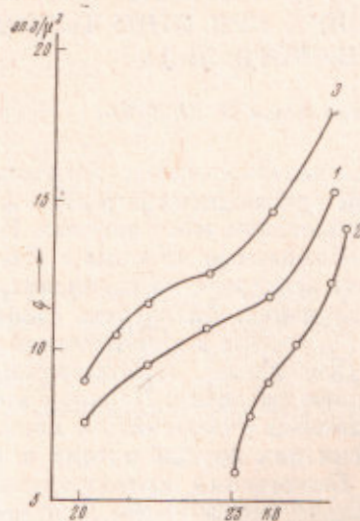
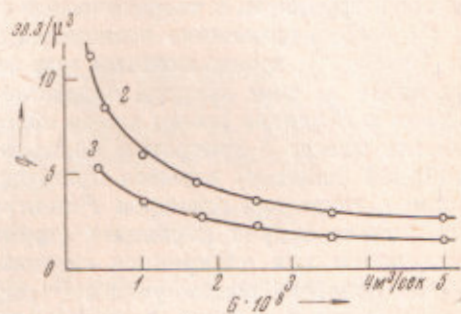


Рис. 2. Зависимость заряда частиц от потенциала, накладываемого на дозу. Характеристики растворов те же, что на рис. 1.  $G = 2,5 \cdot 10^{-8}$  м³/сек

Рис. 3. Зависимость заряда частиц от объемной скорости истечения жидкости из дозы. Растворы смол 2 и 3 (см. рис. 1).  $U = 20$  кв



особенно если учесть чрезвычайно низкие значения подачи  $G$ , с которыми имели дело в работе (4). Сравнение этих данных с рассчитанными для тех же условий по формуле (3) показывает, что зависимость (3) вполне корректно описывает процесс зарядки частиц, полученных при электростатическом распылении жидкостей. Так, для глицерина, для которого значения  $\eta$ ,  $\epsilon$  и  $\gamma$  соответственно равны 1,5 нсек/м², 42 и  $9 \cdot 10^{-4}$  мо/м и для внешних параметров процесса  $G = 2 \cdot 10^{-12}$  м³/сек,  $U = 14$  кв, рассчитанное по формуле (3) значение плотности заряда  $52,5 \cdot 10^3$  кул/м³ = 41,6 кул/кг. Экспериментально определенное в работе (4) значение  $\rho_0$  составляет 45 кул/кг.

Таким образом, для электростатического распыления жидкостей характерна соизмеримость времени релаксации зарядов на жидкости с временем деформации ее элементов.

Объемные электрические силы определяют процесс распыления.

Физико-химический институт  
им. Л. Я. Карпова  
Москва

Поступило  
17 VIII 1970

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 В. Vonnegut, R. Neubauer, J. Coll. Sci., 7, 616 (1952). 2 С. И. Попов, В. А. Губенский, Лакокрасочные материалы и их применение, № 1, 27 (1967). 3 В. А. Губенский, С. И. Попов, Лакокрасочные материалы и их применение, № 2, 26 (1967). 4 R. Pfeifer, C. Hendricks, Am. Inst. of Aeronaut. and Astron., 6, № 3, 496 (1968).