

А. И. Григорьев, Ю.Б. Кузьмичев

**ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ
РЕАЛИЗАЦИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТОНКСА – ФРЕНКЕЛЯ**

*Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова,
ул. Советская, 14, г. Ярославль, 150000, Россия*

Исследование закономерностей электродиспергирования жидкостей при реализации неустойчивости ее заряженной свободной поверхности представляет значительный интерес в связи с многочисленными приложениями в технике и технологии (см., например, [1 – 4] и указанную там литературу). Закономерности электродиспергирования сильно заряженных капель и капель во внешних электростатических полях исследованы достаточно подробно [5–8], но диспергирование жидкости при реализации неустойчивости Тонкса – Френкеля до сих пор не изучалось, хотя само явление лежит в основе многочисленных академических и технических приложений.

Будем рассматривать задачу о расчете параметров капельки, эмитируемой на нелинейной стадии развития неустойчивости Тонкса – Френкеля, когда поверхность имеет вид плоскости с выпуклостью в виде полусферы с радиусом, равным капиллярной постоянной. Примем, что $Q = \text{const}$, $V = \text{const}$, $T = \text{const}$, где Q – количество теплоты, V и T – объем и температура.

Запишем выражение для изменения свободной энергии систем при эмиссии одной капельки по аналогии с тем, как это делалось в [5–8]:

$$\Delta F(r, q) = 4 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot r^2 \cdot A(e) + \frac{q^2}{2r} \cdot B(e) - \frac{q^2}{2} \cdot \left[\frac{1}{2h} + \frac{2 \cdot h \cdot R^2}{h^4 - R^4} \right] - q \cdot E_0 \cdot h \cdot \left[1 - \frac{R^3}{h^3} \right]; \quad (1)$$

$$A(e) = \frac{1}{2} \cdot \left[(1 - e^2)^{1/3} + \frac{1}{e} \cdot (1 - e^2)^{-1/6} \cdot \arcsin(e) \right];$$

$$B(e) = \frac{1}{2} \cdot (1 - e^2)^{1/3} \cdot \text{arcth}(e),$$

где h – расстояние от центра полусферы до центра капли; r – радиус капли; q – заряд капли; \vec{E}_0 – напряженность внешнего поля; e – эксцентриситет эмитированной капли; R – радиус полусферы; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

В выражении (1) первое слагаемое определяет изменение свободной энергии сил поверхностного натяжения, второе – изменение собственной электростатической энергии заряженной капли, третье определяет электростатическую энергию поляризационного взаимодействия капли с поверхностью жидкости, четвертое – энергию капли во внешнем поле.

Перепишем (1) в безразмерном виде:

$$\Delta F = X^2 \cdot A(e) + \frac{Y^2 \cdot W}{2 \cdot X} \cdot B(e) - \frac{Y^2 \cdot W}{2} \cdot C(h_*) - Y \cdot W \cdot D(h_*), \quad (2)$$

$$X = \frac{r}{R}; \quad Y = \frac{q}{E_0 \cdot R^2}; \quad W \equiv \frac{E_0^2 \cdot R}{4\pi\sigma}; \quad h_* = h / R; \quad D(h_*) = h_* - \frac{1}{h_*^2};$$

$$C(h_*) = \frac{1}{2h_*} + \frac{2h_*}{h_*^4 - 1}.$$

Потребуем, чтобы ΔF было минимальным по радиусу и заряду эмитированной капельки, то есть, чтобы выполнялось условие:

$$\frac{\partial(\Delta F)}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial(\Delta F)}{\partial Y} = 0.$$

Или

$$X \cdot A(E) - \frac{Y^2 \cdot W}{4 \cdot X^2} \cdot B(e) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{Y}{X} \cdot B(e) - Y \cdot C(h_*) - D(h_*) = 0 \quad (4)$$

Отрыв капли произойдет, когда сила взаимодействия заряда капли с индуцированным зарядом и внешним электрическим полем превысит силу поверхностного натяжения $2 \cdot \pi \cdot r_* \cdot \sigma$, удерживающую каплю (r_* – радиус перетяжки, связывающий вершину выступа и каплю).

Введем параметр $\alpha = r_* / b$, где b – меньшая полуось капли. Приравнивая силу электрического отталкивания, действующую на каплю, лапласовской силе, связывающей каплю с выступом, получим уравнение для определения h_* :

$$2 \cdot \pi \cdot r_* \cdot \sigma = qE_0 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R^3}{h_*^3}\right) - q^2 \cdot \left(\frac{1}{4h_*^2} + \frac{4R^3 h_*^3}{(h_*^4 - R^4)^2}\right).$$

В безразмерной форме это уравнение имеет вид:

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{W}{(1 - e^2)^{1/6}} \cdot \left[\frac{Y}{X} \cdot \left(1 + \frac{2}{h_*^3}\right) - \frac{Y^2}{X} \cdot \left(\frac{1}{2h_*} + \frac{2 + 6h_*}{(h_*^4 - 1)^2}\right) \right]. \quad (5)$$

Равновесный эксцентриситет e заряженной капельки во внешнем электрическом поле определяется выражением [9]:

$$e^2 = 9 \cdot w_m \cdot (1 + W_m), \quad (6)$$

где w_m и W_m – параметры Тейлора и Рэля для эмитированной капельки:

$$w_m = \frac{E_0^2 \cdot \left[1 + 2 \cdot \frac{R^3}{h_3}\right] \cdot r}{16 \cdot \pi \cdot \sigma}, \quad W_m = \frac{q^2}{16 \times \pi \times \sigma \cdot r^3}$$

в безразмерном виде выражение (6) примет вид:

$$e^2 = 9 \cdot W \cdot X \cdot \left[1 + \frac{2}{h_*^3}\right]^2 \cdot \left[1 + \frac{Y}{X^3} \cdot W\right]. \quad (7)$$

Система (2)–(5), (7) при $W = 0,052$ решалась методом последовательных приближений, и были получены следующие результаты: $h_* = 1,29$

$$X = 0,031, \quad Y = 0,021, \quad W_m = 0,797.$$

Видно, что $W_m < 1$, то есть имеет докритическое значение и, следовательно, капля является устойчивой по отношению к собственному заряду. Однако, поскольку капля находится во внешнем поле, критерием неустойчивости для нее будет являться выражение [9]:

$$W \cdot (1 + 2,07e^2) + 0,092 \cdot (1 + 6,62 \cdot e^2) \cdot W_m^2 \geq 1.$$

Подставляя полученные данные в это выражение, найдем

$$W \cdot (1 + 2,07e^2) + 0,092 \cdot (1 + 6,62 \cdot e^2) \cdot W_m = 1,206.$$

Таким образом, эмиттированная капелька также будет неустойчивой и распадется в соответствии с закономерностями, описанными в [6].

Таким образом, капельки, эмиттированные при неустойчивости заряженной плоской поверхности жидкости, оказываются неустойчивыми по отношению к суперпозиции собственного и инду-

цированного заряда и распадаются, выбрасывая около двухсот дочерних сильно заряженных капелек, линейные размеры которых на два порядка меньше размеров распадающейся капли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев А.И. Неустойчивости заряженных капель в электрических полях (обзор) // Электронная обработка материалов. 1990. № 6. С. 23–32.
2. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Капиллярные неустойчивости заряженной поверхности капель и электродиспергирование жидкостей (обзор) // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 3. С. 3–22.
3. Белоножко Д. Ф., Григорьев А.И. Деление заряженных капель во внешнем электрическом поле на части сравнимых размеров (обзор) // Электронная обработка материалов. 2000. № 4. С. 17–28.
4. Григорьев А.И. Электродиспергирование жидкости при реализации колебательной неустойчивости ее свободной поверхности (обзор) // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 5. С. 22–27.
5. Grigor'ev A.I., Shiryayeva S.O. Mechanism of elektrostatiik poiydispersion of liquid // J. Phys. D: Appl. Phys. 1990. V. 23. № 11. P. 1361–1370.
6. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Закономерности рэлеевского распада заряженной капли // ЖТФ. 1991. Т.61. № 3. С. 19–27.
7. Жаров А.Н., Ширяева С.О., Григорьев А.И. Диспергирование заряженной капли в электростатическом поле // ЖТФ. 1999. Т.69. №12. С. 26–30.
8. Ширяева С.О. О некоторых закономерностях поляризации и диспергирования капли в электростатическом поле // ЖТФ. 2000. Т.70. № 6. С. 20–26.
9. Григорьев А.И., Ширяева С.О., Белавина Е.И. Равновесная форма заряженной капли в электрическом и гравитационном полях // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 6. С. 27–34.

Поступила 28.12.01

Summary

The sizes and charges of a droplets emitting on nonlinear stage of realization of Tonks – Frenkel instability are calculated. It is shown that emitting droplets are unstable up to the surface charge.

Л.З. Богуславский, Н.И. Кускова, В.Н. Петриченко, С.А. Хайнацкий

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ГРАФИТЕ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Введение

В связи с открытием сфероидальных кластеров углерода – фуллеренов [1] и не утратившим актуальность поиском современных технологий получения алмазов [2] особое внимание привлекает характер протекания электрического разряда в такой форме углерода, как графит. Графит обладает высокой электропроводностью, сравнимой с металлической, и имеет характерные отличия, обусловленные его структурой. В то же время есть достаточно много видов графитовых материалов, обладающих низкими значениями электропроводностей.

Известно, что под воздействием сильного электрического поля в веществе может формироваться разряд, реализующийся в виде электрического пробоя (ЭП) или электрического взрыва (ЭВ) в зависимости от того, является данное вещество диэлектриком или проводником. Однако веществ,

© Богуславский Л.З., Кускова Н.И., Петриченко В.Н., Хайнацкий С.А., Электронная обработка материалов, 2002, № 3, С. 32–38.