

01; 03; 12

© 1993

## О КЛАССИФИКАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

С.О. Ш и р я е в а, А.И. Г р и г о р ь е в,  
Л.С. П о д в а л ь н ы й

В связи с широким использованием явления электростатического диспергирования жидкостей в современных технологиях, технических устройствах и научных приборах (см., например, [1-3]) в последние годы заметно увеличился интерес к исследованию физической природы этого явления. В ряде экспериментальных исследований было показано, что в зависимости от физико-химических свойств жидкости, геометрических и физических параметров устройства для диспергирования, можно выделить на феноменологическом уровне более десятка возможных режимов реализации этого явления [3-8]. Собственно говоря, уже исходные экспериментальные исследования, выполненные еще в начале века [9], указали на нетривиальность и большое разнообразие каналов проявления электрической неустойчивости заряженной поверхности жидкости, лежащей в основе ее электростатического диспергирования. Попытки выделения и простейшей классификации возможных режимов предпринимались неоднократно. В основу такой процедуры чаще всего закладывались чисто визуальные различия [4, 6, 8-9], в более глубоких исследованиях деление производилось на основе сравнения визуальной картины с какой-либо физической характеристикой жидкости [5, 7], а в последних публикациях визуальная картина сравнивается с особенностями вольт-амперной характеристики явления [3]. В этом ряду выделяется работа [10], в которой разделение по режимам проведено на основе анализа физико-химических характеристик диспергируемой жидкости путем сравнения трех характерных времен:  $\tau_{\mathcal{E}} \equiv \varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \sigma$  - времени релаксации электрического заряда;  $\tau_{\nu R} \equiv R^2 / \nu$  - времени вязкой релаксации жидкого мениска, с которого происходит эмиссия капелек;  $\tau_{\nu r} \equiv r^2 / \nu$  - времени вязкой релаксации эмиттированной капельки. Кроме того, учитывалось и характерное время натекания жидкости в объем эмиттированной капельки:  $\tau_m \equiv m/M$ , характеризующее устройство диспергирования. В приведенных формулах:  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  и  $\nu$  - диэлектрическая проницаемость, удельная электропроводность и кинематическая вязкость жидкости;  $r$  и  $m$  - радиус и масса эмиттируемой капельки;  $R$  - радиус жидкого мениска на вершине капилляра, по которому жидкость подается в разрядную систему;  $M$  - массовая скорость течения жидкости через капилляр;  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная. На основе этих четырех времен в [10] описаны три режима электродиспергирования.

Работы [11, 12] указали на возможность выделения режимов диспергирования на основе сравнения сил, действующих на капельку, отрывающуюся от мениска. Поскольку в общем случае эмиттируемую капельку отрывают три силы: сила тяжести  $F_g$ , сила электрического отталкивания заряда капельки от капилляра  $F_v$  и сила гидродинамического давления  $F_p$ , то представляется целесообразным грубое разбиение на режимы проводить в соответствии с тем, какая из сил преобладает в имеющейся их комбинации. Каждый из режимов, полученных таким образом, следует делить на подрежимы в соответствии с физико-химическими свойствами диспергируемой жидкости на основе сравнения характерных времен:  $\tau_E$  - времени релаксации электрического заряда;  $\tau_v \equiv R^2/c$  - времени вязкой релаксации в жидком мениске;  $\tau_c = R/c$  - времени гидродинамической релаксации мениска или характерного времени выравнивания давлений в мениске (здесь  $c$  - скорость звука в жидкости). Помимо времен, характеризующих релаксационные процессы в жидкостях, при выделении режимов следует также учитывать технологические времена:

$$\tau_v \equiv \frac{2}{3} \frac{\hat{\pi} \cdot R^3}{\dot{V}}$$

- характерное время натекания жидкости в полусферический мениск ( $\dot{V}$  - объемный расход жидкости);

$$\tau_\alpha \equiv \left( \frac{\rho \cdot R^3}{\alpha \cdot (1-W)} \right)^{1/2}$$

- характерный период капиллярных колебаний мениска при  $W \equiv \frac{\epsilon_0 \epsilon_{cp} U^2}{16 \alpha R} < 1$ , где  $U$  - потенциал капилляра,  $\alpha$  - коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $\epsilon_{cp}$  - диэлектрическая проницаемость среды;

$$\tau_\alpha^v \equiv \left( \left[ \frac{\alpha}{\rho R^3} (W-1) \right]^{1/2} - \frac{v}{R^2} \right)^{-1}$$

- характерное время развития капиллярной неустойчивости в мениске при  $W > W_* \equiv 1 + \frac{\rho v^2}{\alpha R}$ ;

$$\tau_v^\alpha \equiv \left( \frac{v}{R^2} - \left[ \frac{\alpha}{\rho R^3} (W-1) \right]^{1/2} \right)^{-1}$$

Капельный режим (Dripping mode)

$$F_v < F_u \ll F_g$$

$$W \sim 0 : \tau_\varepsilon < \tau_\alpha < \tau_v < \tau_\nu$$

$$0 < W < 1 : \tau_\varepsilon < \tau_v \leq \tau_\alpha < \tau_\nu$$

$$1 < W < W_* : \tau_\varepsilon < \tau_v < \tau_\alpha^\nu$$

7

Струйно-капельный режим (Jet-dripping mode)

$$F_v < F_u \leq F_g$$

$$W > W_* : \tau_\varepsilon \approx \tau_\alpha^\nu < \tau_v < \tau_\nu$$

7

Веретенообразный режим (Spindle mode)

$$F_v < F_g \ll F_u$$

$$\tau_\alpha^\nu < \tau_\varepsilon < \tau_v < \tau_\nu$$

7

Микрокапельный режим (Microdripping mode)

$$F_v \leq F_g \ll F_u$$

$$\tau_\alpha^\nu < \tau_\varepsilon < \tau_v \approx \tau_\nu$$

7

Конусно-короткоструйный режим (Cone-short jet mode)

$$F_v \sim F_g \ll F_u$$

$$\tau_\alpha^\nu \ll \tau_\varepsilon < \tau_v \approx \tau_\nu$$

Рис. 1. Диаграмма смены режимов, реализующихся при электро-диспергировании маловязких жидкостей:  $\tau_c \leq \tau_\varepsilon \ll \tau_\nu$ .

Капельный режим с длинной перетяжкой (Dripping mode — long neck)

$$F_v \ll F_u \ll F_g$$

$$W < 1 : \tau_v^\alpha < \tau_\varepsilon \ll \tau_v$$

↓  
7

Прерывистый конусо-струйный режим (Intermittent cone-jet mode)

$$F_v \sim F_g < F_u$$

$$\tau_v^\alpha \approx \tau_\varepsilon \ll \tau_v$$

↓  
7

Конусо-длинноструйный режим (Cone-long jet mode)

$$F_v \sim F_g \ll F_u$$

$$\tau_\varepsilon < \tau_v^\alpha < \tau_v$$

Рис. 2. Диаграмма смены режимов, реализующихся при электро-диспергировании вязких жидкостей:  $\tau_c < \tau_v \leq \tau_\varepsilon$ .

— характерное время затухания капиллярных волн в мениске при  $1 < W < W_*$ . Заметим, что условие  $W < W_*$  аналогично требованию, накладываемому на величину вязкости жидкости  $\nu > \left[ \frac{\alpha R}{\rho} (W-1) \right]^{1/2}$ .

В качестве иллюстрации применения предлагаемого набора характерных времен приведем на рис. 1 и рис. 2 диаграммы, описывающие последовательные смены режимов, реализующихся при постепенном увеличении электрического потенциала, приложенного к капилляру, по данным экспериментальных работ [4, 13–16] с маловязкими и вязкими жидкостями. Стрелки на диаграммах указывают направление смены режимов при увеличении потенциала, приложенного к капилляру. Отметим, что переход от веретенообразного режима (Spindle mode) к микрокапельному (microdripping mode) на рис. 1 может быть осуществлен без увеличения потенциала, путем уменьшения объемного расхода жидкости.

Следует отметить, что последовательности смены режимов, представленные на рис. 1, 2, не были прослежены в указанном порядке на одной установке при постепенном увеличении потенциала, но составлены по данным различных экспериментальных исследований, выполненных на несхожих установках с различными жидкостями. Авторы данной заметки с сожалением отмечают, что, несмотря на обилие экспериментальных исследований по электродиспергированию различных жидкостей, все имеющиеся экспериментальные данные невозможно увязать в единую систему из-за неполного описания экспериментальных установок и из-за частого отсутствия контроля физико-химических свойств распыливаемых жидкостей: многие авторы работали со смесями различных жидкостей, не измеряя их физико-химических характеристик. И, тем не менее, предложенный набор характерных времен и имеющиеся экспериментальные данные позволяют прогнозировать на качественном уровне результаты электродиспергирования жидкости с заданными физико-химическими свойствами при заданных технологических условиях.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Д у д н и к о в В.Г., Ш а б а л и н А.Л. Электродинамические источники ионных пучков. Обзор. // Препринт 87-63 ИЯФ СОАН СССР. Новосибирск. 1987. 66 с.
- [2] G r i g o r' e v A.I., S h i r y a e v a S.O., V e r b i t s k i S.S. // J. Coll. Int. Sci. 1991. V. 146, N 1. P. 139-151.
- [3] К р а с н о в Н.В., М у р а д ы м о в М.З., Ш е в ч е н к о С.И. // Научное приборостроение. 1991. Т. 1, В 1. С. 42-51.
- [4] С l o u p e a u M., P r u n e t - F o s c h B. // J. of Electrostatics. 1990. V. 25. P. 165-184.
- [5] Б у р а е в Т.К., В е р е ш а г и н И.П., П а ш и н М.М. Сб.: Сильные электрические поля в технологических процессах. М.: Энергия, 1979. № 3. С. 87-105.
- [6] Г р и г о р ь е в А.И., С и н к е в и ч О.А. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11, № 3. С. 182-187.
- [7] D r o z i n V.G. // J. Coll. Sci. 1955. V. 10, N 2. P. 158-164.
- [8] E n g l i s h W.N. // Phys. Rev. 1948. V. 74, N 2. P. 179-189.
- [9] Z e l e n y J. // Phys. Rev. 1914. V. 3, N 2. P. 69-91.
- [10] P f e i f e r R.J. // Phys. of Fluids. 1973. V. 16, N 3. P. 454-455.
- [11] W o o s l e y J.F., T u r n b u l l R.J., K i m K. // J. Appl. Phys. 1988. V. 21 P. 4278-4284.
- [12] S a m p l e S.B., R a g h u p a t h y B. // J. Coll. Int. Sci. 1971. V. 41, N 2. P. 185-193.

- [13] C a r s o n R.S., H e n d r i c s C.D. // AIAA Journal. 1965. V. 6. P. 1072-1075.
- [14] H e n d r i c s C.D. et al // Ракетная техника и космонавтика 1964. № 4. С. 189-194.
- [15] К о ж е н к о в В.И., К и р ш А.А., Ф у к с Н.А. // Коллоидный журнал. 1974. Т. 36. № 4. С. 1168-1171.
- [16] H a u a t i L, B a i l y A.I. // J. Coll. Int. Sci. 1987. V. 117. N 1. P. 222-230.

Поступило в Редакцию  
25 января 1993 г.