

**Турецкий А.Е., Чернова Е.А., Копыт Н.Х.**

*Одесский национальный университет им. И.И.Мечникова*

### **Исследование электродинамического распыления жидкостей**

*Получены экспериментальные зависимости вольтамперных характеристик нескольких жидкостей для процесса электрогидродинамического распыления. Определены режимы стабильного монодисперсного распыления.*

Анализ экспериментальных исследований процесса электродиспергирования жидкостей показывает, что насчитывается около 16 факторов, оказывающих влияние на процесс диспергирования, основными из которых являются коэффициент поверхностного натяжения, электропроводность, приложенное напряжение, давление жидкости в капилляре. Из-за большого числа параметров и сложных связей между ними, задача по нахождению оптимальных условий электродинамического распыления при которых реализуется стабильный режим генерирования монодисперсных капель, представляется достаточно трудной и не может носить универсальный характер, а может быть получена для конкретной распыляемой жидкости.

Механизм электродиспергирования выглядит следующим образом. В отсутствии электрического поля на торце капилляра формируется выпуклый мениск жидкости, размер и форма которого зависят от величины гидростатического и лапласовского давления. Если к жидкости приложить высокое постоянное напряжение, то электрические силы нарушают равновесное состояние мениска и он превращается в конус, на конце которого увеличивается напряженность электрического поля. Удлинения конуса продолжаются до тех пор, пока не возникнут условия для нарушения устойчивости его формы, т.е. не начнется процесс диспергирования жидкости.

В процессе электродиспергирования фактически осуществляется перенос жидким аэрозолем электрического заряда через межэлектродный промежуток капилляр-противоэлектрод. Таким образом, в цепи будет протекать электрический ток. Величина тока зависит как от величины распыляемого потенциала на капилляре, гидростатического давления в системе, так и от свойств распыляемой жидкости. Анализируя особенности токопереноса при электродиспергировании различных жидкостей либо растворов солей на их основе, можно определять степень пригодности их для использования в разных практических областях, например, в сельском хозяйстве, медицине, полупроводниковой промышленности, при получении нановолокон [1,2] и т.п. Характер токопереноса изучался путем измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) процесса распыления таких жидкостей, как дистиллированная вода, этиловый спирт, глицерин, а также водно-глицериновых и спиртоглицериновых растворов.

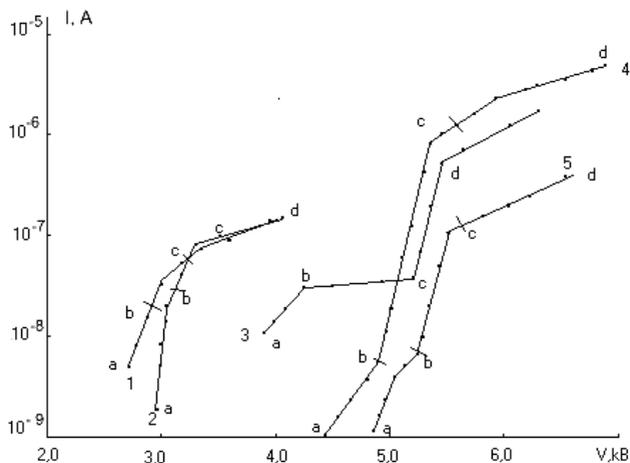


Рис.1. Вольтамперная характеристика процесса распыления  
 1 – этиловый спирт; 2 – 90% этилового спирта + 10% глицерина; 3 – глицерин;  
 4 – 70% воды + 30% глицерина; 5 – вода

Результаты измерения ВАХ некоторых жидкостей представлены на рисунке 1. Точка «а» соответствует начальному потенциалу распыления. Участок bc кривой 1 соответствует интервалу напряжений, в котором наблюдается стабильный процесс электродиспергирования этилового спирта практически в монодисперсном режиме. Аэрозольный факел хорошо развит, устойчив, дисперсность частиц порядка 5-10 мкм. С ростом электрического поля наблюдается нарушение стабильности работы генератора аэрозоля и переход к крупнодисперсному режиму образования капель разного размера.

Диспергирование воды (участок bc на кривой 5) происходит в резко выраженном полидисперсном нестабильном режиме с образованием крупных капель и отдельных струй. При этом следует обратить внимание на тот факт, что распыление воды становится возможным только при достижении больших, чем в случае диспергирования спирта, электрических полей. Однако при таких полях в области вершины жидкого мениска возникает интенсивный коронный разряд, который препятствует возрастанию напряженности поля на жидкостном острие. Это и является причиной нарушения стабильности процесса распыления. Существование коронного разряда при распылении воды обнаруживалось нами по характерному звуковому фону и по наблюдаемому в микроскоп свечению в области жидкого острия. Неодинаковый характер образования аэрозоля из воды и этилового спирта, а также различные начальные электрические потенциалы распыления этих жидкостей непосредственно обусловлены различием величин их электропроводностей и особенно коэффициентов поверхностного натяжения.

Известно, что глицерин ( $C_3H_8O_3$ ) относится к группе тяжелых спиртов и может в бесконечных пропорциях растворяться в воде и спирте. Так как при

введении глицерина в распыляемую жидкость меняются ее физико-химические свойства, то это в свою очередь должно привести и к изменению характера процесса диспергирования. ВАХ процесса распыления глицерина представлена на кривой 3, рисунка 1. Видно, что диспергирование происходит в области электрических полей больших, чем при распылении спирта, но меньших, чем в случае использования воды. При напряжениях, соответствующих участку  $bc$  на кривой 3 наблюдается хорошо сформированный однородный факел аэрозоля радужной окраски, что свидетельствует о монодисперсном характере распыления глицерина. Особо следует отметить очень высокую, по сравнению со спиртом, стабильность процесса диспергирования глицерина. Это явление наблюдается в случае монодисперсного распада весьма вязких жидкостей с низкой упругостью паров и определяется стабилизирующей ролью вязкости, увеличивающей длину жидкого острия на торце распылительного капилляра. При постоянных значениях гидростатического давления и электрического потенциала распыления режим генерирования аэрозоля и форма факела остаются неизменными на протяжении многих часов эксперимента. В области высоких напряжений (за пределами участка  $bc$ ) периодически наблюдается затухание процесса монодиспергирования вплоть до исчезновения факела. Это обусловлено тем, что при увеличении потенциала распыления из-за очень большой вязкости глицерина нарушается непрерывность поступления жидкости к торцу капилляра. Кроме того, при  $V > 5.5$  кВ уже становится возможным возникновение коронного разряда в области жидкостного острия. В условиях существования разряда напряженность электрического поля, стимулирующего процесс распыления, резко падает и образование аэрозоля прекращается.

Проведены исследования электрораспыления спиртоглицериновых (кривая 2) и водно-глицериновых смесей (кривая 4). Установлено, что добавление к спирту глицерина существенно стабилизирует процесс генерирования аэрозоля, повышает дисперсность частиц в факеле. При этом образование монодисперсного аэрозоля происходит в более широком интервале напряжений, чем это имело место при распылении чистого этилового спирта. Аналогично ведет себя смесь воды и глицерина.

Условие нарушения устойчивости поверхности жидкости на вершине мениска может быть записано в виде неравенства

$$P_Q + P_h > P_\sigma \quad (1)$$

где  $P_Q = \epsilon_0 E^2 / 2\chi^2$  – давление на острие мениска, обусловленное силами электрического поля,  $P_h = hdg$  – гидростатическое давление столба жидкости на конце конуса,  $P_\sigma = 2\sigma a / b^2$  – давление на жидком острие, обусловленное силами поверхностного натяжения,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $E$  – напряженность электрического поля, при которой происходит стабильная генерация аэрозоля,  $h$  – высота столба жидкости,  $d$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $a, b, c$  – параметры, которые могут быть определены из геометрических соображений

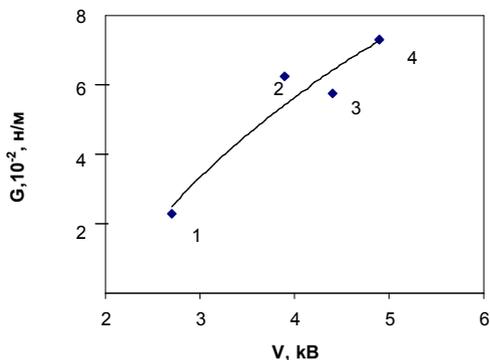


Рис.2. Зависимость потенциала распыления от поверхностного натяжения:  
 1 - этиловый спирт, 2- глицерин, 3- вода 70% + глицерин 30%, 4 – вода.

в случае аппроксимации формы жидкого мениска полуэллипсоидом вращения:  $a$  и  $b$  – большая и малая полуоси эллипсоида, соответственно,

$$\chi = \frac{1-L^2}{2L^3} \left( \ln \frac{1+L}{1-L} - 2L \right) \quad (2)$$

коэффициент деполяризации эллипсоида относительно оси, совпадающей с направлением распыления,  $L = \sqrt{1 - (b/a)^2}$  – эксцентриситет эллипсоида. Условие (1) примет вид [3]:

$$\frac{\epsilon_0 E_0^2}{2\chi^2} + \rho gh \geq \frac{2\sigma a}{b^2} \quad (3)$$

Из неравенства (3) следует, что чем выше коэффициент поверхностного натяжения жидкости, тем при больших электрических полях может быть достигнут режим стабильной генерации аэрозоля с высокой степенью дисперсности частиц.

На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость потенциала монодисперсного распыления от поверхностного натяжения, полученная на основе данных рис.1.

Данная зависимость подтверждает тот факт, что для распыления жидкостей с большим поверхностным натяжением необходимо приложить большее напряжение.

В работе [4] показано, что характер изменения формы капли на конце капилляра сильно зависит от проводимости жидкости. Такие свойства жидкости, как вязкость компенсируются повышением гидростатического давления в системе.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует о существовании корреляции между начальными потенциалами распыления и величинами коэффициентов поверхностного натяжения и электропроводности данных жидкостей.

## Литература

1. Bronski S., Blasinska A. Electrospinning of liquid jets// 21<sup>st</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Warsaw, Aug.15-21, 2004. – p.67.
2. Yarin A.L., Koombhorgse S., Reneker D.M. Taylor cone and jetting from liquid droplets I electrospinning of nanofibers// J. Appl. Phys. 2001. – V.90, № 9. – P.4836-4846.
3. Бураев Т.К., Верещагин И.П. Физические процессы при распылении жидкости в электрическом поле// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1971. – №5. – С. 70-79.
4. Бураев Т.К., Верещагин И.П., Пашин Н.М. Исследование процесса распыления жидкостей в электрическом поле // Сб. Сильные электрические поля в технологических процессах. М.: Энергия. – 1979. – № 3. – С. 87 – 105.

**Турецкий О.Є., Чернова О.О., Копит М.Х.**

### Дослідження електродинамічного розпилення рідин

#### АНОТАЦІЯ

Отримані експериментальні залежності вольт-амперних характеристик декілька рідин для процесу електродинамічного розпилювання. Визначені режими стабільного монодисперсного розпилювання.

**Turetsky A.E., Chernova E.A., Kopyt N. Kh.**

### Investigation of electrodynamic spraying of liquids

#### SUMMARY

Experimental volt-ampere characteristics of some liquids are obtained in the electrodynamic spraying process. The stable monodisperse spraying modes are determined.