

03;12

©1994 г.

## ОПЫТ ПОЛУФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ НАБЛЮДАЕМЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ

*С.О.Ширяева, А.И.Григорьев*

Предлагается система временных масштабов, характеризующих физические свойства жидкости и установку для электродиспергирования, на основе которых проводится классификация экспериментально наблюдаемых режимов диспергирования.

1.Повышенный интерес со стороны исследователей к явлению электростатического распыления жидкости (электродиспергированию жидкости), неугасающий уже в течение нескольких десятилетий (см., например, обзоры [1-3] и указанную там литературу), обусловлен прежде всего его многочисленными академическими и практическими приложениями в геофизике, технической физике, научном приборостроении и химической технологии, а также возможностью более точного регулирования параметров получаемого аэрозоля и компактностью необходимого оборудования в сравнении с имеющимися механическими и пневматическими способами распыления.

Большая часть исследований явления электродиспергирования жидкостей посвящена экспериментальному изучению его закономерностей [4-17]. Основные трудности, с которыми сталкиваются авторы таких работ, обусловлены высокой чувствительностью данного явления к физическим свойствам рабочей жидкости, особенностям экспериментальной установки и таким характеристикам процесса, как давление жидкости в капилляре и разность потенциалов, приложенная к разрядной системе. В зависимости от величины и соотношений этих параметров авторы различных экспериментальных исследований выделяют около десятка режимов явления распыления, сильно различающихся как феноменологией, так и характеристиками формирующегося капельного аэрозоля (спектрами размеров, зарядов и удельных зарядов капель). В результате практически каждый из авторов заново "открывает" наблюдающиеся в конкретном эксперименте режимы распыления, приводя описательные их характеристики и пользуясь собственной терминологией для их обозначения. Сопоставить же результаты

различных работ в большинстве случаев невозможно из-за недостатка сообщаемой в публикациях информации об условиях проведения эксперимента.

В этой связи представляется целесообразным сформулировать наиболее общие критерии для создания единой классификации реализуемых режимов электростатического распыления жидкости. Наиболее удачная попытка теоретического подхода к этой проблеме приведена в [17]. В этой работе в качестве основного принципа для классификации предложено использовать сравнение характерных времен процесса распыления. Однако изложенная в [17] классификация имеет два существенных недостатка: 1) никак не учитывается одна из определяющих физических характеристик процесса распыления — разность потенциалов, прикладываемых к капилляру и противоэлектроду; 2) в классификации используются характерные времена, зависящие от размера образующихся капель. Это неудобно, так как величину капель можно определить, лишь осуществив конкретный режим распыления. Основной же целью создания единой классификации режимов является возможность предсказания формы реализации феномена распыления жидкости в той или иной конкретной ситуации а priori на основе данных о физико-химических характеристиках жидкости и намечаемых к использованию перепадов давлений и разностей потенциалов.

2. За основу дальнейших построений возьмем главную идею работы [17] и попытаемся усовершенствовать приведенную там классификацию, расширив ее и устранив отмеченные выше недостатки. При выработке единых критериев для классификации зафиксированных режимов распыления будем основываться только на тех физических параметрах процесса, которые являются причиной конкретного режима, а не его следствием. С этой целью примем во внимание такие физико-химические свойства рабочей жидкости, как электропроводность  $\sigma$ , диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ , кинематическая вязкость  $\nu$ , плотность  $\rho$ , коэффициент поверхностного натяжения  $\alpha$  и скорость распространения звука в жидкости (т.е. модуль ее объемной упругости), а также технологические характеристики процесса распыления: массовый расход рабочей жидкости  $M$ , радиус капилляра  $R$  и величину разности потенциалов, подаваемых на капилляр и противоэлектрод  $U$ .

3. Характерные времена, на основе которых будет проводиться классификация режимов распыления, целесообразно разделить на две группы.

К первой группе (группе релаксационных времен) отнесем характерные времена, определяющиеся главным образом физико-химическими свойствами рабочей жидкости:  $\tau_\epsilon \equiv (\epsilon \cdot \epsilon_0 / \sigma)$  — время электрической релаксации, т.е. характерное время перераспределения электрического заряда;  $\tau_\nu \equiv R^2 / \nu$  — время вязкой релаксации, т.е. характерное время выравнивания импульса в объеме жидкости;  $\tau_c \equiv R / c$  — время гидродинамической релаксации, т.е. характерное время выравнивания давления в объеме жидкости. Эти времена зависят от радиуса капилляра  $R$ . Но поскольку обычно эксперименты проводятся с одним капилляром, то при распылении конкретной рабочей жидкости эти времена остаются неизменными при смене одного режима распыления на другой.

Ко второй группе (группе технологических времен) отнесем характерные времена, зависящие от внешних параметров, определяющих режимы распыления конкретной жидкости, а именно от объемного расхода жидкости  $\dot{V}$  и разности потенциалов  $U$ , подаваемых на капилляр и противоэлектрод. Величину разности потенциалов, приложенных к разрядной системе, будем описывать с помощью безразмерного параметра

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{ср}} U^2}{16\alpha R},$$

имеющего смысл параметра Тейлора, характеризующего устойчивость поверхности жидкости по отношению к электрическому заряду. Во вторую группу времен войдут

$$\tau_V \equiv \frac{2\pi R^3}{3\dot{V}}$$

— характерное время натекания полусферического мениска с радиусом  $R$ , равным радиусу капилляра;

$$\tau_\alpha \equiv \sqrt{\frac{\rho R^3}{\alpha(1-W)}}$$

— характерный временной масштаб капиллярных колебаний мениска жидкости на срезе капилляра;

$$\tau_\alpha^\nu \equiv \frac{1}{\sqrt{\frac{\alpha}{\rho R^3}(W-1) - \frac{\nu}{R^2}}}$$

— характерное время развития капиллярной неустойчивости поверхности жидкого мениска;

$$\tau_\nu^\alpha \equiv \frac{1}{\frac{\nu}{R^2} - \sqrt{\frac{\alpha}{\rho R^3}(W-1)}}$$

— характерное время затухания мелкомасштабного возмущения поверхности жидкого мениска.

Отметим, что времена  $\tau_\alpha$ ,  $\tau_\alpha^\nu$  и  $\tau_\nu^\alpha$  являются характерными временами различных режимов процесса распыления в зависимости от величины разности потенциалов  $U$ . Так, характерное время  $\tau_\alpha$  имеет смысл лишь при малых значениях потенциала  $U < \sqrt{(16\alpha R)/(\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{ср}})}$  (это эквивалентно неравенству  $W < 1$ ); время  $\tau_\alpha^\nu$  характеризует процесс распыления маловязких жидкостей при больших разностях потенциалов

$$U > \sqrt{\frac{16\alpha R}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{ср}} \left(1 + \frac{\rho \nu^2}{\alpha R}\right)}}$$

(или  $W > 1 + \rho \nu^2 / \alpha R$ ) и для вязких жидкостей

$$\nu > \sqrt{\frac{\alpha R}{\rho}(W-1)}$$

при больших разностях потенциалов  $U > \sqrt{(16\alpha R)/(\epsilon_0\epsilon_{cp})}$  (или  $X1 < W < 1 + \rho\nu^2/\alpha R$ ). Основной особенностью характерных времен, отнесенных ко второй группе является то, что их величины изменяются при изменении параметров  $\dot{V}$  и  $U$ , определяющих смену режимов распыления любой конкретной жидкости.

Из сказанного ясно, что релаксационные времена определяют тип жидкости. Для жидкостей различных типов можно выделить различные наборы функциональных режимов, т.е. тех форм, в которых реализуется явление электростатического распыления жидкостей данного типа. Закономерности же смены режимов диспергирования для жидкостей любого типа в основном определяются величиной и соотношением технологических характерных времен (времен второй группы).

Элементы подобного подхода к классификации режимов электродиспергирования заложены еще в работе [17]. В качестве критерия разделения режимов в [17] выбрано соотношение времен диэлектрической и вязкой релаксации ( $\tau_\epsilon$  и  $\tau_\nu$ ). В пределах же каждого из режимов форма распыления, согласно [17], зависит от величины массового (или объемного) расхода, т.е. от времени  $\tau_V$ .

Следует отметить, что терминология, использованная в [17], не совсем удачна. Так, жидкости при  $\tau_\epsilon \ll \tau_\nu$  называются хорошо проводящими, а при  $\tau_\epsilon \gg \tau_\nu$  — плохо проводящими. На наш взгляд, при сравнении времен  $\tau_\epsilon$  и  $\tau_\nu$  определяющим фактором является величина вязкости жидкости: если вязкость  $\nu$  мала (т.е. время вязкой релаксации велико  $\tau_\nu \gg \tau_\epsilon$ ), то жидкость распыляется легко, если же вязкость  $\nu$  очень велика (маленькое время вязкой релаксации  $\tau_\nu \ll \tau_\epsilon$ ), то жидкость практически невозможно диспергировать электростатическим путем. Подтверждением такой точки зрения может служить и мнение авторов некоторых экспериментальных работ (см., например, [6,8]), которые отмечают качественные различия в формах распыления маловязких и сильновязких жидкостей.

Очевидно, что электропроводность жидкости тоже крайне важна для процесса распыления и во многом определяет форму его реализации. Однако понятия плохой и хорошей электропроводности жидкостей несколько условны, поскольку время диэлектрической релаксации  $\tau_\epsilon$ , характеризующее скорость установления равновесного распределения зарядов на поверхности жидкости, логичнее сравнивать с временами, характеризующими скорость деформации этой поверхности,  $\tau_\alpha$ ,  $\tau_\alpha^\nu$  и  $\tau_\nu^\alpha$ , которые зависят от значения разности потенциалов  $U$ , прикладываемых к разрядной системе. Для проверки этого утверждения рассмотрим конкретную ситуацию.

Пусть, к примеру, при малых разностях потенциалов выполнялось неравенство  $\tau_\epsilon < \tau_\alpha^\nu$  и равновесное распределение зарядов устанавливалось значительно быстрее, чем деформировалась поверхность жидкости. Это характерно для хорошо проводящих жидкостей, так как в любой момент времени электрическое поле внутри объема жидкости близко к нулю. При увеличении разности потенциалов  $U$  характерное время  $\tau_\alpha^\nu$  уменьшается, и при достаточно больших значениях  $U$  может выполниться противоположное неравенство  $\tau_\alpha^\nu < \tau_\epsilon$ , т.е. при деформации поверхности жидкости равновесное распределение зарядов уже не будет успевать устанавливаться за характерное время деформации. В

результате внутри объема жидкости всегда будет существовать отличное от нуля электрическое поле, а это уже характерно для не слишком хорошо проводящих жидкостей. Таким образом, с увеличением разности потенциалов  $U$  проводимость жидкости как бы "ухудшилась".

Диаграмма 1 смены режимов, реализующихся впри электрогисперировании жидкостей  $\tau_c \leq \tau_\epsilon \ll \tau_\nu$

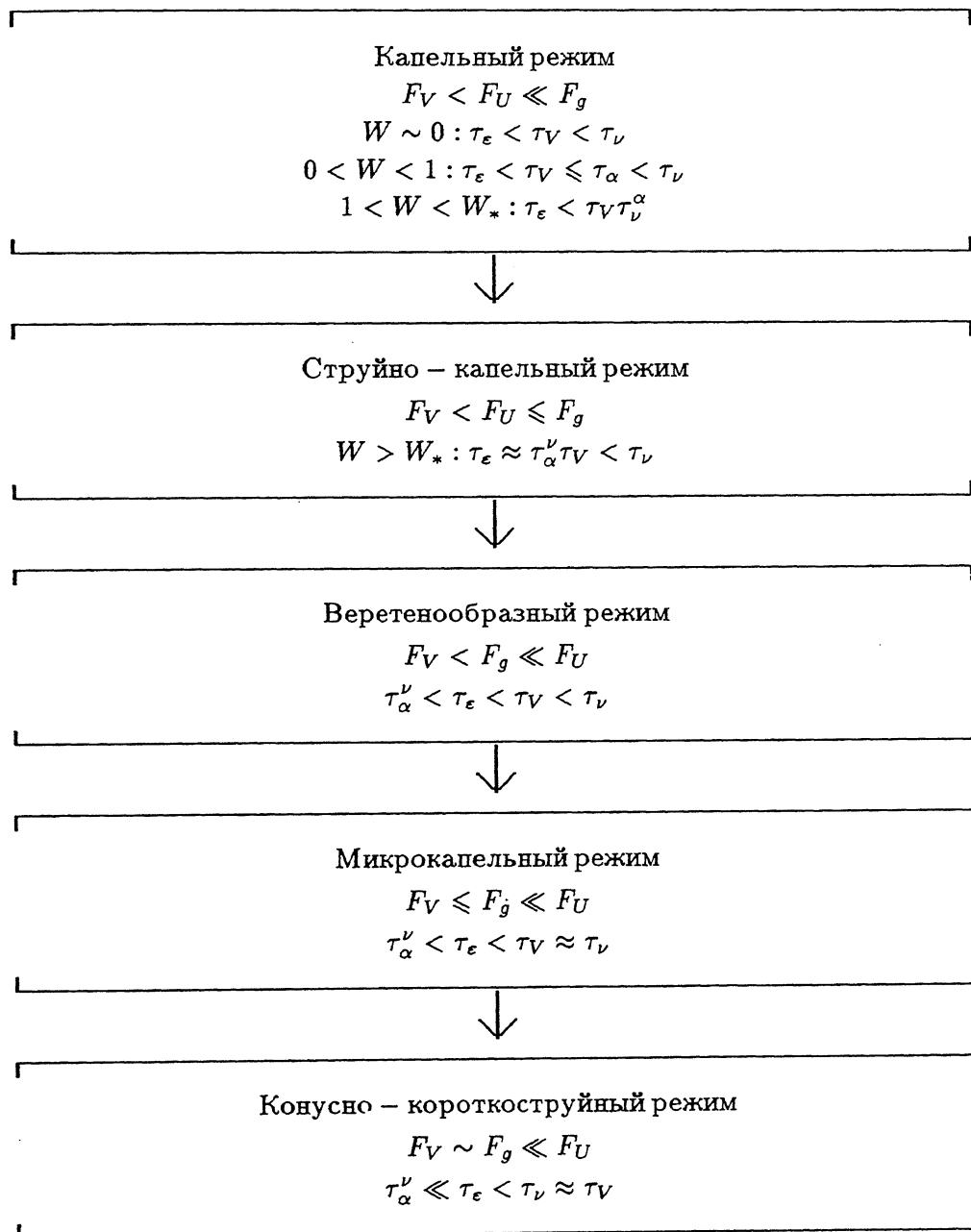


Диаграмма 2 смены режимов, реализующихся при электродиспергировании вязких жидкостей  $\tau_c < \tau_\nu \leq \tau_\epsilon$

Капельный режим с длинной перетяжкой

$$F_V < F_U \ll F_g$$

$$W < 1 : \tau_\nu^\alpha < \tau_\epsilon \ll \tau_\nu$$



Прерывистый конусно – струйный режим

$$F_V \sim F_g < F_U$$

$$\tau_\nu^\alpha \approx \tau_\epsilon \ll \tau_\nu$$



Конусно – длинноструйный режим

$$F_V \sim F_g \ll F_U$$

$$\tau_\epsilon < \tau_\nu^\alpha < \tau_\nu$$

Принимая во внимание все перечисленные аргументы, выделим три основных типа жидкостей на основе сравнения времен  $\tau_\epsilon$  и  $\tau_\nu$  следующим образом:  $\tau_\epsilon \ll \tau_\nu$  — маловязкие жидкости;  $\tau_\epsilon \sim \tau_\nu$  — вязкие жидкости;  $\tau_\epsilon \gg \tau_\nu$  — сильновязкие жидкости. Сильновязкие жидкости в данном исследовании рассматривать не будем, так как они практически не поддаются электростатическому распылению. Качественная классификация экспериментально наблюдаемых режимов электродиспергирования для маловязких и вязких жидкостей, выполненная на основе вышесказанного, приведена в виде диаграмм 1 и 2 [18]. На приведенных диаграммах  $F_g$ ,  $F_U$ ,  $F_V$  обозначают гравитационную, электрическую и гидродинамическую силы, действующие в одном направлении и отрывающие каплю от мениска на торце капилляра. Учет этих сил при классификации режимов электродиспергирования дает дополнительную информацию об особенностях режима (см., например, [19]). Отметим, что переход от одного режима к другому (диаграммы 1,2) осуществляется с увеличением прикладываемой разности потенциалов при неизменных прочих параметрах. Дадим, однако, краткое описание приведенных режимов, опираясь в основном на весьма подробное описание экспериментов работы [9].

4. Маловязкие жидкости. Капельный режим. Размер эмиттируемых капель сравним с размером капилляра. Отрыв капель

происходит вблизи кромки капилляра в основном за счет действия силы тяжести. После отрыва капли на срезе капилляра остается весьма незначительное количество жидкости. Частота эмиссии 1–10 Гц.

а) **Струйно-капельный режим.** Этот режим представляет собой разновидность капельного режима и реализуется при повышении используемой разности потенциалов. Вследствие значительной величины электрического поля у вершины мениска, она становится неустойчивой и выбрасывает тонкую струйку жидкости, распадающуюся на очень мелкие капельки с радиусом, много меньшим радиуса капилляра. Эмиссия мелких капелек происходит в результате действия электрических сил, и частота их образования на порядок превышает частоту отрыва крупных капель, отрывающихся от торца капилляра в основном под влиянием силы тяжести.

б) **Веретенообразный режим.** Как и в струйно-капельном режиме с вершины мениска бьет струйка жидкости, распадающаяся на очень мелкие капельки. Но сам мениск имеет более вытянутую и заостренную форму. С усилением поля удлинение мениска увеличивается и у основания заостренной части мениска возникает перетяжка, разрыв которой приводит к отрыву значительного объема жидкости веретенообразной формы. Струйка же жидкости на его вершине все еще существует и продолжает распадаться на мелкие капельки. Основной веретенообразный объем жидкости может распасться на несколько крупных капель сравнимых размеров, а может образовывать и всего одну каплю. Размер и количество капель изменяются от цикла к циклу.

В формировании и отрыве как основных, так и мелких капелек основную роль играют электрические силы. Размер основных капель может быть много меньшим радиуса капилляра, а размер мелких капелек много меньше размера основных. После отрыва веретенообразного объема жидкости на торце капилляра остается мениск значительного объема, имеющий форму типа вытянутого полусфероида. Частота эмиссии основных капель может достигать 10 кГц.

в) **Микрокапельный режим.** На вершине мениска образуется длинная струйка, на конце которой скапливается жидкость, что и приводит к образованию капельки с размером, много меньшим размера капилляра. После отделения такой капельки струйка втягивается в мениск, а затем все повторяется снова. Высота и форма мениска сильно зависят от условий проведения эксперимента. Мениск может быть совсем плоским, с одной или несколькими зарождающимися струйками, расположенными по периферии торца капилляра. Образование капелек происходит исключительно за счет электрических сил. Частота эмиссии достигает десятков килогерц.

г) **Конусо-струйный режим.** Мениск имеет форму, напоминающую конус, из вершины которого бьет струйка жидкости, распадающаяся на капельки. Для хорошо проводящих жидкостей диаметр струйки много меньше диаметра капилляра. В зависимости от величины гидростатического давления в капилляре и используемой разности потенциалов могут существовать стабильные конические формы мениска с различными значениями угла при вершине и различными видами образующей: вогнутой либо выпуклой.

д) **Вязкие жидкости**

Режимы распыления вязких жидкостей являются разновидностями аналогичных режимов распыления маловязких жидкостей.

е) Капельный режим с длинной перетяжкой. Как и в случае маловязких жидкостей, капельный режим характеризуется определяющим влиянием силы тяжести и образованием крупных капель, размер которых превышает радиус капилляра, частота эмиссии порядка 10 Гц. Однако большая величина вязкости приводит к тому, что при отрыве крупных капель перетяжка, связывающая каплю с мениском, сильно вытягивается. При разрыве такой длинной перетяжки образуется несколько сателлитных капелек с размерами, много меньшими размера основной капли. Таким образом, капельный режим диспергирования вязких жидкостей характеризуется более широким спектром размеров образующихся капель, чем в случае маловязких жидкостей.

ж) Прерывистый конусно-струйный режим. На вершине мениска нерегулярно во времени образуется струя жидкости, распадающаяся на капельки. Периодически вся струя отрывается от мениска и распадается на отдельные капли, а на вершине мениска начинает формироваться новая струя. Диаметр струи во время фазы эмиссии может существенно меняться, поэтому распределение образующихся капель по размерам довольно широкое. Этот режим, по-видимому, является аналогом веретенообразного режима. Основное их различие в том, что они приводят к существенно различающимся распределениям капель по размерам: в веретенообразном режиме существенная часть жидкости расходуется на формирование основных капель, имеющих большие размеры, а в прерывистом конусно-струйном режиме вся жидкость эмиттируется в виде множества капелек сравнимых размеров.

з) Конусно-длинноструйный режим. Этот режим отличается от конусно-струйного режима для маловязких жидкостей лишь существенно более длинной струей, формирующейся на вершине конического мениска. С увеличением вязкости размер образующихся капель возрастает. Однако в момент разрыва струи с большей вероятностью образуются сателлитные капельки. В результате получающийся аэрозоль оказывается весьма полидисперсным.

5. Для сравнения приведенной классификации с данными экспериментов используем работы [9,12], содержащие достаточное для классификации количество информации о физико-химических свойствах рабочих жидкостей и условиях проведения экспериментов. Именно в этих работах описаны режимы, наиболее подходящие для поставленной цели, а представляющие интерес эксперименты, относящиеся к трем различным режимам распыления, выполнялись с одной и той же рабочей жидкостью — этиловым спиртом.

1) [9,рис. 6] — струйно-капельный режим, соотношение времен:  $\tau_\epsilon < \tau_\alpha^\nu < \tau_V < \tau_\nu$ ; 2) [9,рис. 17] — веретенообразный режим, соотношение времен:  $\tau_\epsilon \approx \tau_\alpha^\nu < \tau_V < \tau_\nu$ ; 3) [12,рис. 4,6] — микрокапельный режим, соотношение времен:  $\tau_\alpha^\nu < \tau_\epsilon < \tau_V \approx \tau_\nu$ .

Совпадение экспериментальных и классификационных соотношений времен для этих трех работ можно считать почти идеальным, если учесть грубость принятых оценок для соответствующих характеристик времен, а также разброс в значениях некоторых физических свойств жидкостей, приводимых в различных справочниках, который достигает порой целого порядка (например, вязкость и диэлектрическая про-



нищаемость глицерина, с которым проводились эксперименты в [10,13], или поверхностное натяжение циклогексанола в работе [9]). Вследствие именно этих причин, а также из-за весьма частого отсутствия в описаниях экспериментов информации о какой-либо из характеристик процесса ( $R$ ,  $\dot{V}$ ,  $U$ ) трудно корректно определить точное место в предлагаемой классификации остальных анализированных экспериментов из работ [9-14]. В качестве рекомендации авторам будущих экспериментальных исследований обсуждаемого явления можно посоветовать в ходе экспериментов проводить и контрольные измерения всех определяющих процесс физико-химических свойств рабочих жидкостей, а не полагаться на справочники.

6. Принимая во внимание вышесказанное о недостаточности информации об условиях проведения экспериментов в значительной части экспериментальных работ, составим качественную справку о том, каким образом можно классифицировать эксперименты, описанные в [9-14], опираясь лишь на соответствующие фотографии и описания авторов экспериментальных исследований, не обращая внимания на имеющееся несовпадение экспериментальных и классификационных соотношений времен.

1. В [9,рис. 5] рабочая жидкость циклогексанол, капельный режим с длинной перетяжкой. Значение потенциала неизвестно, поэтому достаточно корректно оценить соотношение времен невозможно.

2. В [9,рис. 6] рабочая жидкость — этиловый спирт, струйно-капельный режим.

3. В [9,рис. 14] рабочая жидкость — чистая вода, веретенообразный режим. Значение потенциала неизвестно, поэтому достаточно корректно оценить соотношение времен невозможно.

4. В [9,рис. 15] рабочая жидкость — чистая вода, веретенообразный режим. Форма распыления, видимо, близка к описанной в [9,рис. 14], хотя в этом эксперименте проводимость воды в 1.47 раз ниже, а капилляр в 4.17 раза тоньше.

5. В [9,рис. 17] рабочая жидкость — этиловый спирт, веретенообразный режим. Форма распыления, видимо, близка к приведенной на рис. 13 в работе [9], хотя в обсуждаемом эксперименте проводимость спирта в 10 раз меньше, чем для рис. 13 из той же работы, а капилляр в 4.17 раза тоньше.

6. В [10,рис. 4] рабочая жидкость — глицерин. Недостатком этой работы является низкое качество и малочисленность фотографий, а также очень нечеткое словесное описание наблюдавшихся режимов распыления. Все изложение ведется в терминах ширины, амплитуды и периодичности импульсов тока. Тем не менее, по-видимому, следует согласиться с авторами работы [9], которые полагают, что в [10], несомненно, наблюдался прерывистый конусно-струйный режим распыления [9,с. 179]. По крайней мере для второй области значений разности потенциалов ( $U = 3.5-4.5$  кВ) это, видимо, так. Косвенным подтверждением справедливости этого заключения может служить исследование спектра удельных зарядов, соответствующих определенным интервалам импульса тока при распылении глицерина [10,рис. 6]. В самой работе [10,с. 114] об этом говорится следующее: "... В начале и в конце

распыляющего импульса испускаются заряженные капли, обладающие более высокими и более однородными удельными зарядами, чем капли, испущенные в другие моменты в течение импульса распыления." Именно такая ситуация и должна быть характерна для прерывистого конусно-струйного режима распыления, так как в этом режиме отдельные капли формируются при распаде сильновытянутой длинной жидкой нити, периодически выбрасываемой из вершины мениска. Таким образом, в начале и в конце группы капель, образовавшейся во время одной пульсации, летят капли, формирующиеся из начала и конца оторвавшейся вытянутой нити, т.е. из тех областей, где поляризационные заряды максимальны. В середине же группы находятся капли, образовавшиеся из средней части нити, где поляризационный поверхностный заряд мал.

7. В [11,рис. 4] рабочая жидкость — дистиллированная вода. Режим гармонического распыления по терминологии авторов [11] в предлагаемой выше классификации, видимо, относится к веретенообразному режиму. Об этом говорят и авторы [9] на с. 177. Они полагают, что авторы работы [11] не имели возможности наблюдать тонкую струйку капелек на вершине основной капли, так как для воды эта струйка очень тонка, а у экспериментаторов не было необходимой спецаппаратуры. В подтверждение этого заключения можно провести сравнение экспериментов работы [11], относящихся к гармоническому режиму [11,рис. 3и4], и эксперимента из работы [11,рис. 15], в котором, как и в [11], распылялась вода в веретенообразном режиме. Будем сравнивать только характеристики процесса, соответствующие первым областям (при более низких значениях потенциала) из обнаруженных в [11] двух, так как диспергирование во вторых областях сопровождается коронным разрядом [9,с. 178].

В [11,рис. 3(кривая 3)] рабочая жидкость — дистиллированная вода. Потенциал  $U = 5-6$  кВ, внешний радиус капилляра  $R_0 = 2 \cdot 10^{-4}$  м, внутренний радиус капилляра  $R_i = 10^{-4}$  м. Первая область. Частота эмиссии  $f = 400-500$  Гц, массовый расход  $\dot{M} = 4.62 \cdot 10^{-6}$  кг/с, плотность воды  $\rho = 998.23$  кг/м<sup>3</sup>. Из этих данных получаем следующее: объемный расход  $\dot{V} = 4.6 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/с, средний объем капли  $\bar{V} = \dot{V}/f \approx 8.9 \cdot 10^{-12} - 1.2 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>, средний радиус отрывающихся капель  $\bar{r} = [3\bar{V}/4\pi]^{1/3} \approx (1.3 \cdot 10^{-4} - 1.4 \cdot 10^{-4})$  м.

В [9,рис. 15] потенциал  $U = 3-4$  кВ, внешний радиус капилляра  $R_0 = 6 \cdot 10^{-5}$  м. Первая область. Частота эмиссии  $f = 200-600$  Гц, объемный расход  $\dot{V} = 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/с, плотность воды  $\rho = 998.23$  кг/м<sup>3</sup>. Из этих данных получаем средний объем основных капель  $\bar{V} = \dot{V}/f \approx 1.7 \cdot 10^{-12} - 5.0 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>, средний радиус основных капель  $\bar{r} = [3\bar{V}/4\pi]^{1/3} \approx 7.4 \cdot 10^{-5} - 1.1 \cdot 10^{-4}$  м.

Таким образом, несложно заметить, что характеристики капелек, получающихся при гармоническом распылении в работе [11], практически совпадают с характеристиками основных капель веретенообразного режима работы [9,рис. 15], хотя в [9] используется меньшая разность потенциалов, видимо, из-за того, что капилляр тоньше.

8,9. В [12,рис. 4,а,б] рабочая жидкость — дибутилфталат и этиловый спирт соответственно, микрокапельный режим. Несмотря на не очень хорошее качество фотографий, в работе есть достаточно ясное описание: “образование монодисперсного аэрозоля при чисто электростатическом распылении происходит в результате эмиссии капелек с жидкого острия, а не вследствие распада жидкой нити.”

10. В [13,рис. 7] рабочая жидкость — глицерин. Эта работа малоинформативна, так как фотографии очень мелкие и определить по ним, что за режим распыления наблюдался, невозможно. Судя же по приведенным описаниям, происходил отрыв отдельных капель и, следовательно, этот режим должен быть близок к капельному режиму с длинной перетяжкой. Кроме того, для глицерина “чистого” эксперимента в этой работе не проводилось, так как рис. 7 иллюстрирует “... вынужденное растяжение и релаксацию заряженного глицеринового столбика, когда приложенное напряжение в 5 кВ периодически снималось на 6 с.”

11. В [14,рис. 2] рабочая жидкость — isopar M an isoparaffinic oil + *n*-butanol, конусно-струйный режим. Соотношение времен, однако, соответствует микрокапельному режиму. Видимо, сказались неточность оценок: так, величина плотности  $\rho$  взята приблизительно, а следовательно, оценки для  $\tau_\nu$  и  $\tau_\alpha^\nu$  весьма условны ( $\nu = \mu/\rho$ , где  $\mu$  — динамическая вязкость). Вызывают сомнения и значения других физических свойств рабочей смеси, приведенные в [14], так как, например, для поверхностного натяжения точно такое же значение, какое используется в [14] для смеси, в 1-ой части работы [15,с. 207] приводится для чистой жидкости isopar M an isoparaffinic oil без добавок, в то время как значения проводимостей чистой жидкости и ее смеси с *n*-butanol отличаются на четыре порядка. Создается впечатление, что изменение других физико-химических свойств смеси, кроме электропроводности, просто не контролировалось.

Проводя итог всему сказанному выше, заметим, что наиболее уязвимым и молопоподтвержденным экспериментально местом предложенной классификации режимов электростатического распыления жидкостей является та ее часть, что относится к диспергированию вязких жидкостей. Это и неудивительно, так как очевидно, что процесс распыления вязких жидкостей с физической точки зрения гораздо более сложен. Основным же недостатком предложенной классификации, видимо, является то, что характерные времена оцениваются слишком грубо для того, чтобы можно было провести достаточно тонкое разделение режимов, т.е. грубость используемых оценок для времен не соответствует тонкости приведенного в классификации разбиения процесса распыления на режимы.

7. Остановимся чуть подробнее на характерном времени выравнивания давления в объеме жидкости  $\tau_c$ . Все численные оценки, выполненные для анализируемых экспериментальных работ, привели к единственному выводу, что время  $\tau_c$ , как правило, много меньше всех остальных характерных времен процесса. Учитывая же грубость и схематичность проводимых оценок, говорить об их соотношениях более точно не приходится.

Однако сравнение характерных времен процесса наверняка не единственный принцип, пригодный для классификации. Кроме него для определения характера режима распыления, видимо, можно руковод-

стваться сравнением сил, действующих на отрывающуюся каплю, или давлений, действующих на поверхность мениска [19]. Возможно, что подкаску, в каком из этих двух способов следует пользоваться в конкретных случаях, может дать оценка величины  $\tau_c$ . Как известно, сила — это произведение давления на площадь поверхности, т.е. некоторая интегральная (по площади поверхности) характеристика. Таким образом, выбор силы, действующей на каплю, в качестве характеристики процесса распыления предполагает, что в системе уже установилось некоторое квазиравновесное распределение давления. Скорость же выравнивания давления в жидкости характеризуется временем  $\tau_c$ . Следовательно, чтобы можно было обоснованно пользоваться для определения режима распыления сравнением сил, действующих на каплю, необходимо, чтобы время  $\tau_c$  было много меньше времен, характеризующих скорость деформации поверхности ( $\tau_\alpha$ ,  $\tau_\nu^\nu$ ,  $\tau_\nu^\alpha$ ). В противном случае, когда скорость выравнивания давлений сравнима со скоростью деформации поверхности жидкости, для определения характера режима распыления логичнее использовать сравнение локальных значений давлений, действующих на поверхность.

8. В заключение отметим, что приведенная выше классификация режимов электростатического диспергирования жидкости пока является лишь качественной. Ее следует воспринимать как руководство для постановки серии осмысленных экспериментов с контролем всех важных физико-химических свойств рабочих жидкостей и получаемого жидкокапельного аэрозоля с целью разработки корректной, количественно строго аргументированной классификации. В случае успеха в дальнейшем было удобно пользоваться для предсказания наиболее вероятной формы распыления конкретных жидкостей в конкретных условиях, а также для выбора направления изменения величин, определяющих процесс распыления, с целью получения необходимого режима. В качестве модельной рабочей жидкости, наиболее подходящей для проведения экспериментов, представляется раствор глицерина в воде (или в спирте) с добавлением NaCl. Для такого раствора определяющие физико-химические характеристики, изменяющиеся на несколько порядков (вязкость и электропроводность), могут варьироваться в весьма широких пределах (на порядки величины) простым изменением концентраций глицерина и NaCl, плотность же и коэффициент поверхностного натяжения раствора при этом изменятся лишь на десятки процентов.

### Список литературы

- [1] Bailey A.G. // Atomisation and Spray Technology. 1986. Vol. 2. P. 95–134.
- [2] Лудников В.Г., Шаболин А.Л. Препринт ИЯФ СО АН СССР. № 87-63. Новосибирск, 1987. 66 с.
- [3] Шевченко С.И., Григорьев А.И., Ширяева С.О. // Научное приборостроение. 1991. Т. 1. № 4. С. 3–21.
- [4] Краснов Н.В., Мурадымов М.З., Шевченко С.И. // Научное приборостроение. 1991. Т. 1. № 1. С. 42–51.
- [5] Drozin V.G. // J. Coll. Sci. 1955. Vol. 10. N 2. P. 158–164.
- [6] Zeleny J. // Phys. Rev. 1917. Vol. 10. N 1. P. 1–6.
- [7] Бураев Т.К., Пашин Н.М. // Электричество. 1971. № 4. С. 78–79.
- [8] Бураев Т.К., Верещагин И.П., Пашин Н.М. // Сильные электрические поля в технических процессах. М.: Энергия, 1979. № 3. С. 87–105.
- [9] Cloupeau M., Prunet-Foch B. // J. Electrostatics. 1990. Vol. 25. P. 165–184.
- [10] Carson R.S., Hendricks C.D. // AIAA J. 1965. Vol. 3. N 6. P. 1072–1075.

- [11] *Sample S.B., Bollini R.* // J. Coll. Int. Sci. 1972. Vol. 41. N 2. P. 185-193.
- [12] *Коженков В.И., Курш А.А., Фукс Н.А.* // Коллоидный журн. 1974. Т. 36. № 6. С. 1168-1171.
- [13] *Hendricks C.D., Carson R.S., Hogan J.J., Schneider J.W.* // AIAA J. 1964. Vol. 2. N 4. P. 733-737.
- [14] *Hayati I., Bailey A.I., Tadros Th.F.* // J. Coll. Int. Sci. 1987. Vol. 117. N 1. P. 222-230.
- [15] *Hayati I., Bailey A.I., Tadros Th.F.* // J. Coll. Int. Sci. 1987. Vol. 117. N 1. P. 205-221.
- [16] *Попов С.И., Петрянов И.В.* // ДАН СССР. 1970. Т. 195. № 4. С. 893-895.
- [17] *Pfeifer R.J.* // Phys. Fluids. 1973. Vol. 16. N 3. P. 454-455.
- [18] *Ширяева С.О., Григорьев А.И., Подвальный Л.С.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 4. С. 36-41.
- [19] *Ширяева С.О., Григорьев А.И.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 3. С. 35.

Ярославский университет

Поступило в Редакцию  
29 июня 1992 г.