

УДК 66.069.8

ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ

В. И. Коженков, Н. А. Фукс

Дан критический анализ литературы по основным вопросам исследования и применения процесса электрогидродинамического распыления жидкости.

Библиография — 68 ссылок.

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. Введение	2274
II. Механизм образования аэрозоля при электрогидродинамическом распылении жидкости	2276
III. О возможности количественной оценки процесса	2279
IV. Роль электрического потенциала и коронный разряд. Нейтрализация зарядов капелек	2281
V. Получение мономобильных аэрозолей	2282
VI. Применение электрогидродинамического распыления жидкости	2283

I. ВВЕДЕНИЕ

Получение высокодисперсных монодисперсных униполярно заряженных аэрозолей представляет большой интерес как с научной точки зрения, так и для ряда отраслей промышленности. Интенсивное развитие этой проблемы вызвано в первую очередь применением дисперсных заряженных материалов в электронно-ионной промышленности и в разработке коллоидных ракетных двигателей. Существует несколько способов получения таких аэрозолей, и одним из наиболее перспективных следует считать способ электрогидродинамического распыления жидкости (ЭГДРЖ), который представляет собой частный случай электростатического распыления. Термин «электрогидродинамическое распыление жидкости» появился сравнительно недавно в некоторых зарубежных работах¹⁻³. Привычный термин «электростатическое распыление жидкости» охватывает, по существу, целый ряд процессов, которые можно разделить на три основных вида распыления с характерными для них областями применения.

1. Электростатическое распыление с большими массовыми расходами жидкостей (до нескольких десятков $\text{см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$), с подачей жидкости под давлением и с очень высокими электрическими напряжениями (до 100 кВ и более). Этот процесс сопровождается образованием грубодисперсного полидисперсного аэрозоля. Наибольшее применение такой вид распыления получил в промышленной электроокраске.

2. Электростатическое распыление с весьма малыми расходами жидкости (10^{-9} — 10^{-3} $\text{см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$), относительно невысокими электрическими напряжениями (до 10 кВ) в вакууме. При таких условиях удастся распылять множество жидкостей (от чистых диэлектриков до расплавленного металла) с образованием высокодисперсных аэрозолей с очень высоким отношением заряда аэрозольных частиц к их массе (10^3 кул/кг и более). Первой работой, посвященной получению монодисперсных

аэрозолей при распылении в вакууме, является работа Сэмпла и Боллини⁴. Указанный процесс нашел применение в ракетной технике для создания коллоидных двигателей, а также в микроэлектронике в производстве печатных плат.

3. Электростатическое распыление при нормальных атмосферных условиях, с малыми расходами жидкости (10^{-8} — 10^{-4} см³·сек⁻¹), с относительно невысокими электрическими потенциалами на жидкости (3—8 кВ). При некоторых условиях этот процесс обеспечивает получение монодисперсного аэрозоля из целого ряда жидкостей в широком диапазоне размеров капелек (от десятых долей микрона до сотен микрон) и с зарядами капель, сравнимыми с предельно допустимым по релеевскому соотношению устойчивости заряженной сферической капли. Именно к этому виду распыления в основном и относится термин «ЭГДРЖ».

Характерной особенностью процесса ЭГДРЖ является то, что малые массовые расходы жидкости и относительно невысокие электрические потенциалы создают одинаковые условия образования для всех капелек — только за счет достижения каплей релеевского соотношения неустойчивости ($Q^2 = 16\pi r^3 \gamma$, где Q — поверхностный заряд капли, r — радиус капли, γ — поверхностное натяжение жидкости), что обеспечивает получение монодисперсного аэрозоля. В этом случае исключается вытягивание длинных сплошных жидких нитей (при не слишком вязких жидкостях), распадающихся в электрическом поле на отдельные капли под действием не только кулоновских, но и гидродинамических и гравитационных сил, что приводит к образованию полидисперсного аэрозоля. Образование монодисперсного аэрозоля в процессе ЭГДРЖ имеет внешнюю аналогию с механизмом образования монодисперсного аэрозоля при дисковом распылении с весьма малыми расходами жидкости.

За последнее время в отечественной и зарубежной литературе появилось значительное количество работ, посвященных исследованию и использованию процесса ЭГДРЖ. Единственной известной нам обзорной статьей служит работа Бейли⁵. Однако автор недостаточно критически анализирует литературные данные и не рассматривает значительного количества как последних, так и ранее опубликованных работ, позволяющих получить представление о состоянии и перспективах исследования рассматриваемого процесса. В настоящей статье дан обзор и краткий анализ литературных данных по этому вопросу.

Первое упоминание о влиянии электрического заряда на жидкость относится к 1745 г., когда Бозе⁶ заметил, что при подаче электрического потенциала на жидкость, находящуюся в узком капилляре, скорость выкапывания жидкости возрастает. Позднее этот феномен был объяснен действием в жидкой капле электрических сил, направленных противоположно силам поверхностного натяжения. При некотором значении заряда на капле электрические силы превосходят силы поверхностного натяжения, и капля становится неустойчивой. Критерий устойчивости сферической капли идеально проводящей жидкости был впервые установлен Релеем⁷. Исследование стабильности заряженной сферической капли в электрическом поле провел Зелени⁸⁻¹⁰. Он получил значение критической напряженности поля, когда капля сохраняет еще сферическую форму. В экспериментах по изучению коронного разряда с жидкого острья¹⁰ Зелени наблюдал вытягивание из узкого капилляра жидкой нити, которая затем распадалась на отдельные капли. Эту работу можно считать первой, где предпринимается попытка исследования механизма образования аэрозоля при электродинамическом распылении жидкости.

II. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ АЭРОЗОЛЯ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ РАСПЫЛЕНИИ ЖИДКОСТИ

В 1952—53 гг. Воннегут и Нойбауер^{11, 12} впервые опубликовали экспериментальные результаты, свидетельствующие о возможности получения высокодисперсного монодисперсного аэрозоля методом ЭГДРЖ. Авторы распыляли такие жидкости, как вода, раствор сахара, смазочное масло, спирт, суспензии тонких неорганических красителей в жидкостях низкой проводимости и другие, используя как постоянное, так и переменное напряжение от 6 до 10 кв. О степени монодисперсности и размере получаемых капелек авторы судили по наличию ярких цветов спектров Тиндаля высших порядков. Воннегут и Нойбауер экспериментально определили верхнюю границу электропроводности ряда жидкостей, при которой еще возможно образование высокодисперсного монодисперсного аэрозоля, и выдвинули утверждение, что монодисперсный аэрозоль можно получать и из жидкостей с большей электропроводностью, но в этом случае получаются значительно более крупные капли (диаметром от 25 мкм и более). Однако эти данные получены безотносительно к параметрам процесса и имеют частный характер. Авторы утверждают также, что невозможно получить монодисперсный аэрозоль при отрицательных электрических потенциалах; никакого объяснения этому факту авторы не приводят. Отказавшись и от попытки объяснить процесс формирования однородных частиц, т. е. механизм образования монодисперсного тумана, авторы^{11, 12} тем не менее сделали первый шаг в теоретическом рассмотрении процесса деления исходного объема заряженной жидкости, осуществив энергетический подход к этой проблеме. Ими была предложена гипотеза минимальной энергии системы, основанная на том, что заряженная сферическая капля (или какой-то иной конечный объем жидкости стремится занять состояние, в котором суммарная энергия системы (энергия поверхностного натяжения и энергия кулоновского взаимодействия поверхностных зарядов) минимальна. Такому энергетическому состоянию должен отвечать ансамбль капелек, образующихся в результате деления первичной капли. Исследование уравнения общей энергии системы позволяет определить равновесный удельный заряд капелек. Эта гипотеза послужила для многих авторов отправным моментом в теоретическом исследовании процесса ЭГДРЖ^{13—15}.

Несомненно, что вопрос о механизме формирования частиц аэрозоля и, в частности, образования монодисперсного аэрозоля при ЭГДРЖ является основополагающим для понимания физики этого процесса. Поэтому не удивительно, что многие исследователи обращались к этому вопросу. Так, в работе¹⁶ высказывается следующее предположение о механизме образования монодисперсного аэрозоля. При критическом для начала тонкого распыления (т. е. образование монодисперсного аэрозоля) потенциале электрические силы отталкивания превышают силы поверхностного натяжения, а основная нить, вытягиваемая из капилляра, распадается на множество симметрично расположенных тонких нитей, которые становятся нестабильными и немедленно распадаются на очень мелкие заряженные капли. Приблизительно такого же взгляда на механизм образования монодисперсного аэрозоля при ЭГДРЖ придерживаются и авторы работ^{17, 18}. В работе, посвященной получению однородных эмульсий путем электрогидродинамического распыления с использованием жидкого заземленного контрэлектрода, авторы¹⁸ приводят фотографии процесса распыления, на которых видны жидкие нити, выходящие из капилляра. Однако довольно большая длительность экспозиции при фотосъемке такого быстротекущего про-

цесса делает необидительным утверждение авторов о механизме образования аэрозоля путем разрыва нитей, вытягивающихся из капилляра. Кроме того, сравнительно большие массовые расходы жидкости в экспериментах, вывод о возможности получения высокодисперсного моносперсного аэрозоля из неполярных жидкостей (таких, как четыреххлористый углерод) и, наконец, тот факт, что авторы исследовали не сам аэрозоль, а эмульсию, образующуюся при погружении частиц в жидкость, вообще ставят под сомнение достоверность их результатов.

Следует отметить, что до сих пор в многочисленных опубликованных работах, в той или иной мере затрагивающих вопрос о механизме электродинамического распыления и, в частности, образования моносперсного аэрозоля в результате этого процесса, существует некоторая путаница. Так, в работах¹⁹⁻²⁵ теоретически и экспериментально исследуется процесс электростатического распыления при больших массовых расходах жидкости. Большой расход, как и большая вязкость, приводит к образованию устойчивой, относительно длинной (на порядок и больше превышающей размер капель) жидкой нити, дальнейшее поведение которой в электрическом поле (изгибание нити, разрыв ее на отдельные участки и распад этих участков на отдельные капли) обусловлено в сравнимой мере как электростатическими силами, так и гидродинамическими и гравитационными силами. Тем не менее результаты этих исследований сравниваются с результатами работ, посвященных ЭГДРЖ. В этой связи следует отдельно рассматривать работы по распылению с большими массовыми расходами и работы с очень малыми расходами жидкости, т. е. связанные с чисто электродинамическим распылением. Характерно, что и те авторы, которые применяли режим чисто электродинамического распыления^{11, 16, 17}, приходили к выводу о неизбежности стадии вытягивания жидкой нити из кончика капилляра для образования высокодисперсного моносперсного аэрозоля.

Единственной работой, в которой механизм образования высокодисперсного аэрозоля при электродинамическом распылении представлен как отрыв одиночных капель с жидкого острия у кончика капилляра, является работа²⁶. Однако никаких экспериментальных данных в подтверждение этому факту в работе не приводится. Микрофотографии скоростной съемки процесса срыва и движения капли вблизи капилляра представлены в работе²⁷. Но в данном случае авторы снимали крупные капли в «капельном» режиме распыления с временем экспозиции порядка *мсек*, вследствие чего судить о процессе образования и поведении высокодисперсного аэрозоля, полученного электродинамическим распылением, по данным этой статьи невозможно.

В работе²⁸ с помощью высокоскоростной микрофотосъемки с применением мощного импульсного лазера с длительностью импульса 35 *нсек* и мощностью в импульсе 20 *Мвт* было исследовано образование моносперсных капелек в диапазоне размеров $r = 5-20$ *мкм* и формирования аэрозольного факела в процессе электродинамического распыления различных жидкостей (дибутилфталат (ДФБ), этанол, 50%-ный раствор ДФБ в этаноле). Эксперименты показали, что процесс образования моносперсного тумана в результате ЭГДРЖ протекает как эмиссия одиночных капелек с жидкого острия или с кончика небольшого жидкого цилиндра, а не в результате вытягивания и разрыва жидкой нити, как это утверждалось ранее^{11, 16-18, 29}. Картина процесса аналогична процессу образования моносперсного аэрозоля при дисковом распылении с малой подачей жидкости.

Одна из основных проблем физики электродинамического распыления жидкости — экспериментальная проверка релеевского соотно-

шения неустойчивости заряженной сферической капли, а также теоретическое и экспериментальное исследование зарядов частиц аэрозоля, полученного электрогидродинамическим распылением. Смысл релеевского соотношения неустойчивости состоит в том, что заряженная проводящая сферическая капля сохраняет свой размер и форму до тех пор, пока не достигается соотношение

$$Q^2 = 16\pi r^3 \gamma.$$

Теоретически это соотношение было подтверждено в работе³⁰. Методика экспериментальной проверки соотношения неустойчивости сходна во многих работах^{31–33} и заключается в том, что сферическую заряженную каплю приводят во взвешенное состояние в вертикальном электрическом поле и в процессе испарения капли наблюдают момент нарушения ее устойчивости, фиксируемый по эмиссии некоторого количества мелких капелек с поверхности исходной капли. Это явление наблюдал в 1926 г. Маки³⁴ в экспериментах с водяными каплями, помещенными в сильное электрическое поле. Позднее Дойл, Моффет и Воннегут³¹ провели такой эксперимент с легко испаряющимися каплями. В процессе испарения капли отношение ее поверхностного заряда к массе возрастает, и по достижении релеевского соотношения капля эмиттирует со своей поверхности облачко дочерних капелек. Авторы нашли, что заряд капли в момент нарушения ее устойчивости довольно хорошо совпадает с рассчитанным из релеевского соотношения. Второй важный результат этой работы состоит в том, что заряды дочерних капелек (по очень грубым оценкам) равны половине релеевского или по крайней мере не превышают его. Впоследствии Аббас и Латам³³ развили работу³¹. Экспериментируя с каплями *n*-октанола размером 30–200 мкм, полученными электрогидродинамическим распылением, и применив оригинальный метод измерения размера и заряда капель³⁵, авторы подтвердили также, что нарушение устойчивости капли происходит в момент достижения ею релеевского соотношения и что соотношение потерянных капель массы и заряда также соответствует релеевскому. Швейцер и Хенсон³² практически с той же измерительной аппаратурой показали, что релеевское соотношение выполняется с точностью не хуже 4%, а потери массы и заряда исходной капли в результате эмиссии дочерних капелек составляют соответственно 23 и 5%.

Целая серия работ, опубликованных Райсом и сотр.^{1, 36–39}, посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процесса деления заряженной капли в электрическом поле, а изученный ими процесс авторы относят к процессу электрогидродинамического распыления. Эти работы относятся к вопросу о механизме образования монодисперсного аэрозоля в процессе распыления, поскольку в них решается задача о симметричном и асимметричном делении исходной капли в зависимости от степени достижения ею релеевского соотношения.

Теоретически задача решается на основе гипотезы минимальной энергии, предложенной в⁴¹. При этом авторы работ^{36–38} делают ряд допущений: 1) отсутствие взаимодействия результирующих капелек, 2) возможность деления исходной капли при соотношении $Q^2 < 16\pi r^3 \gamma$, 3) однородная проводимость окружающей среды, т. е. отсутствие влияния пространственного заряда на процесс деления капли. Результатом решения задачи явился вывод о том, что симметричное деление капель возможно при условии $Q^2 > 16\pi r^3 \gamma$, а несимметричное — при $Q^2 \leq 16\pi r^3 \gamma$. Экспериментальная модель деления заряженной капли, предложенная авторами, представляет собой деление крупной ($d = 2$ мм) капли воды с добавкой поверхностно-активного вещества в стеариновом масле. Поскольку по-

ведение жидкой капли в газовой среде существенно отличается от поведения ее в жидкости, то совершенно очевидно, что такая модель слишком далека от реального процесса электрогидродинамического распыления. Таким образом, упрощающие допущения в теоретическом решении задачи и очевидная несовместимость экспериментальной модели с процессом электрогидродинамического распыления жидкости снижают ценность этих работ для установления механизма реального процесса ЭГДРЖ.

Несмотря на то что многие исследователи приняли гипотезу минимальной энергии системы для теоретической оценки результатов исследований распыления, некоторые авторы полностью ее отрицают. Так, в работе Крона² при распылении сплава Вуда получены заряды капелек, превышающие половину релеевского. На основе этих экспериментальных результатов, а также анализа работ Воннегута, Райса, Хендрикса и Дойла³¹, использовавших гипотезу минимальной энергии, автор утверждает, что принцип минимальной энергии не может быть использован для количественных результатов и что значения зарядов капелек в работах Хендрикса и соавт., близкие к равновесному (т. е. к половине релеевского), обусловлены, очевидно, низкой проводимостью используемых жидкостей. Автор приводит свои экспериментальные данные, однако методика измерения параметров полученного аэрозоля в работе отсутствует, поэтому трудно судить о достоверности этих результатов.

Вопрос о величине заряда на капельках, полученных электрогидродинамическим распылением, до последнего времени оставался открытым. Наибольший интерес представляют работы Хендрикса⁴⁰, Пфайфера^{3,41}, Сэмпла и Боллини⁴². Хендрикс и сотр. в экспериментах по распылению октоля и глицерина показали, что значения индивидуальных зарядов капелек, измеренные с помощью цилиндра Фарадея и пролетного заряд-спектрометра, вполне удовлетворительно совпадают с теоретическими значениями равновесных зарядов и нигде их не превышают. В экспериментах Сэмпла и Боллини в качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, а процесс осуществлялся в так называемом «капельном» режиме с образованием монодисперсных капель размером 140—420 мкм и частотой их образования 350—950 сек⁻¹. Значения зарядов на этих каплях оказались, так же как и в⁴⁰, достаточно близкими к равновесным, но несколько превышают их. Этот результат связан, очевидно, с какими-то методическими ошибками, например с трудностью учета процесса испарения капелек и связанной с этим погрешности в измерении их параметров.

В недавно опубликованной нами работе⁴³ на примере электрогидродинамического распыления дибутилфталата — высококипящей жидкости, исключаяющей влияние процессов испарения и конденсации, — в режиме генерации монодисперсных капелек в области размеров 5—15 мкм показано, что индивидуальные заряды капелек близки к расчетному равновесному значению и по крайней мере не превышают его.

Таким образом, ввиду отсутствия точной теории процесса ЭГДРЖ гипотезу минимальной энергии можно пока считать удобным приемом, которым можно воспользоваться для рассмотрения (с достаточно хорошим приближением) качественной стороны этого явления.

III. О ВОЗМОЖНОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССА

Рассмотренные выше работы посвящены качественному исследованию физических основ процесса электрогидродинамического распыления. Однако успешное применение этого процесса в коллоидных ракетных двигателях потребовало нового направления исследований, а имен-

но, количественной оценки возможностей такого метода, связи параметров процесса с характеристиками получаемого аэрозоля и, следовательно, определения области изменения параметров процесса с целью регулирования и контроля характеристик аэрозоля. Количественному описанию, естественно, должен предшествовать выбор физической модели процесса. В связи с этим следует остановиться на нескольких моделях, предложенных различными авторами.

Как указывалось выше, модель заряженной сферической капли в электрическом поле, предложенная Райсом, слишком далека от реального процесса электрогидродинамического распыления. Дешён и Карсон⁴⁴ предложили модель процесса, связанную с периодическим изменением формы жидкого полусфероид под действием электрического поля у кончика капилляра. Принимая, что течение жидкости в капилляре пуазейлевское, эти авторы получили зависимость коэффициента формы жидкого полусфероид от времени и параметров процесса — внутреннего радиуса и длины капилляра, высоты гидростатического столба рабочей жидкости, вязкости жидкости и приложенного к жидкости электрического потенциала. Однако ни электропроводность жидкости, ни размер получаемых капелек в этой работе не рассматриваются. Кроме того, вся работа в целом относится к пульсирующему режиму генерации аэрозоля, и, таким образом, для описания процесса получения монодисперсного аэрозоля использованная модель неприменима, поскольку пульсирующий режим генерации не обеспечивает монодисперсности аэрозоля⁴³.

В работе Сэмпла и Боллини⁴² описывается метод получения коллимированного пучка монодисперсных униполярно заряженных капель воды. По экспериментальным данным найдена зависимость процесса от диаметра капилляра, гидростатического давления жидкости и приложенного напряжения. Однако в работе используется режим генерации крупных капель ($d=140-420$ мкм), когда наряду с кулоновскими силами существенную роль играет гравитация («капельный» режим), что делает невозможным распространение предложенной модели распыления на случай ЭГДРЖ.

Наибольшего внимания заслуживают работы Хогана и Хендрикса⁴⁰ и Пфайфера и Хендрикса⁴¹. В работе⁴¹, посвященной теоретическому и экспериментальному исследованию зависимости удельного заряда капелек, полученных в процессе ЭГДРЖ, от параметров процесса, авторы исходят из гипотезы минимальной энергии и предложенной ими модели механизма эмиссии капелек диэлектрической жидкости с кончика капилляра в сильном электрическом поле. Смысл модели заключается в рассмотрении временных характеристик процесса, определяемых электрическими и вязкими силами. При этом рассматриваются режимы как с учетом, так и без учета влияния пространственного заряда в области распыления. В результате авторы⁴¹ получили формулу для определения удельного заряда частиц по параметрам жидкости и процесса (вязкость, диэлектрическая проницаемость, поверхностное натяжение, электрический потенциал на жидкости, массовый расход жидкости, геометрия капилляра и расстояние от капилляра до контрэлектрода). Эксперименты по распылению глицерина позволили получить эмпирическую формулу для удельного заряда капелек, достаточно хорошо совпадающую с теоретической формулой. Однако при выводе теоретической формулы в выражений для напряженности электрического поля между жидким острием и плоскостью авторы приняли за радиус острия радиус капилляра, что возможно лишь в предельном случае идеального диэлектрика. В другом предельном случае (идеально проводящая жидкость) за ра-

диус острия следует, очевидно, принимать радиус эмиттируемой с жидкого острия капельки. Это обстоятельство должно внести поправку в предложенную авторами ⁴¹ формулу.

IV. РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И КОРОННЫЙ РАЗРЯД. НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ЗАРЯДОВ КАПЕЛЕК

Одним из основных характеристик процесса ЭГДРЖ являются начальный потенциал распыления и критический потенциал. Начальный потенциал характеризует возникновение неустойчивости поверхности жидкого мениска и начало распыления. Критический потенциал характеризует развитие процесса с ростом напряжения, приложенного к распыливающему капилляру, и переход к устойчивой эмиссии капелек с жидкого острия. В работах ^{45, 46} теоретически и экспериментально показано, что с ростом потенциала жидкий мениск вытягивается в конус с углом в вершине $\sim 100^\circ$, после чего происходит нарушение поверхности с выходом из нее жидкой нити или с отрывом капелек от острия конуса. В работе ⁴⁰ теоретически получено выражение для начального потенциала распыления. Однако проведенная нами проверка этой формулы не подтвердила ее. Очевидно, полученная формула отражает лишь частный случай распыления и не учитывает многообразия параметров процесса и свойств распыляемой жидкости.

Для характеристики ЭГДРЖ в режиме генерации монодисперсного аэрозоля, как показали исследования ^{30, 43}, наибольший интерес представляет критический потенциал, соответствующий переходу от пульсирующего режима генерации с образованием полидисперсного аэрозоля к режиму стабильной генерации монодисперсного аэрозоля. В работе ⁴¹ рассматривается вопрос об изменении электропроводности распыляемой жидкости с изменением электрического поля в жидкости. Изменением электропроводности жидкости под действием электрического поля можно объяснить природу критического потенциала, но определить теоретически его значение в настоящее время затруднительно.

Поскольку электрогидродинамическое распыление осуществляется под действием сильных электрических полей, то при определенных условиях этот процесс сопровождается развитием коронного разряда с жидкого острия или жидкой нити. Коронному разряду с жидкой капли и его влиянию на процесс ЭГДРЖ посвящено множество работ ^{2-11, 29, 35, 46-48}, в которых рассмотрено два основных вопроса, связанных с коронным разрядом: 1) влияние коронного разряда на процесс распыления в зависимости от знака подаваемого потенциала; 2) влияние коронного разряда на распыляемость жидкости. Следует отметить, что все работы, в которых обсуждалось влияние коронного разряда, проводились с потенциалами не менее 4 кВ. Как показано в работе ²⁸, режим генерации высокодисперсного монодисперсного аэрозоля при ЭГДРЖ может осуществляться при относительно низких электрических потенциалах 3—4 кВ. В этом случае и при положительном, и при отрицательном потенциалах на жидкости процесс протекает в отсутствие коронного разряда.

Образующиеся в результате ЭГДРЖ капельки жидкости несут очень большой заряд, приблизительно равный половине релеевского, и вследствие этого обладают высокой электрической подвижностью. Скорость электростатического рассеяния в этом случае настолько велика, что создать стабильное облако из такого аэрозоля невозможно, а транспортировка его и формирование потока аэрозоля трудно управляемы и связаны с большими потерями на стенках трубопроводов. Поэтому в некоторых случаях необходимо снизить заряд, а следовательно, и подвиж-

ность капелек, а иногда и совсем снять его, точнее, привести аэрозоль к равновесному распределению по зарядам. Нейтрализация униполярно заряженного аэрозоля осуществляется за счет электростатической коагуляции с противоположно заряженными частицами в электрическом поле и без поля. В работе⁴⁹ показано, что электростатическая коагуляция в присутствии электрического поля протекает более интенсивно лишь начиная с некоторого критического значения поля $E_{кр}$. При этом с ростом индивидуальных зарядов коагулирующих частиц значение $E_{кр}$ возрастает. Поскольку индивидуальные заряды капелек, полученных в результате ЭГДРЖ, весьма велики, то применение внешнего электрического поля для ускорения процесса коагуляции в этом случае нецелесообразно.

В ряде работ, в которых описывается нейтрализация капелек, использовались газовые ионы от коронного разрядника или термоионизатора. Так, в работе¹⁸ для нейтрализации облака униполярно заряженных капелек раствора полимера используется коронный разряд с системой электродов острие — плоскость. Между коронирующим острием и рабочим капилляром устанавливается заземленная сетка, которая, по замыслу авторов, должна, очевидно, исключить влияние поля короны на поле у торца капилляра. В работе⁵⁰ для нейтрализации потока заряженных частиц водно-глицериновой смеси, представляющей собой рабочее тело коллоидного двигателя, используется термоионизатор — накаливаемая вольфрамовая проволока. В этом случае происходит электростатическая коагуляция без поля.

V. ПОЛУЧЕНИЕ МОНОМОБИЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Во многих областях аэрозольных исследований, а также в некоторых специальных применениях электронно-ионной технологии возникает потребность в создании моноmobileльных аэрозолей. Моноmobileльными аэрозолями называются униполярно заряженные аэрозоли с узкой функцией распределения частиц по электрическим подвижностям. Как между моно- и полидисперсными, так и между моно- и полиmobileльными аэрозолями нет резкой границы. Какой аэрозоль считать моноmobileльным — это зависит от конкретных требований. Возможности применения моноmobileльных и монодисперсных аэрозолей аналогичны: градуировка счетчиков и спектрометров заряженных частиц, исследование физических процессов в заряженных аэрозолях, направленное осаждение частиц в электрическом поле и т. д.

Получение моноmobileльных аэрозолей осуществляется различными методами, применяемыми, как правило, в различных диапазонах подвижностей. Основные методы следующие.

1. Зарядка монодисперсных⁵¹ аэрозолей в поле коронного разряда (ударная зарядка)^{52, 53} или в ионизированной атмосфере без внешнего поля (диффузионная зарядка)^{54, 55}. Известно большое количество работ^{56–62}, где описываются зарядники, пригодные для генерирования моноmobileльных аэрозолей. Наибольшего интереса заслуживает работа⁶², в которой измерения функции распределения частиц по подвижностям проведены с помощью прибора с хорошей разрешающей способностью. Метод зарядки газовыми ионами позволяет получать моноmobileльные частицы в довольно широком диапазоне подвижностей (от несколько сотых до нескольких десятитысячных долей единицы), со сравнительно высокой концентрацией аэрозоля.

2. Метод вибрирующего капилляра с подачей потенциала на жидкость или индуцированием заряда на поверхности жидкости у выхода

из капилляра. В работе⁶³ получены мономобильные грубодисперсные частицы ($d=120$ мкм), однако количественные данные об их подвижности отсутствуют.

3. Препаративная спектрометрия заряженных аэрозолей. В работе⁶⁴ получены строго мономобильные латексные частицы, несущие один или несколько элементарных зарядов.

4. ЭГДРЖ в режиме получения монодисперсного аэрозоля. Известно, что диапазон размеров частиц, обеспечиваемый таким способом, очень широк — от десятых долей микрона до сотен микрон. Индивидуальные заряды частиц очень велики — порядка половины предельного релеевского. До настоящего времени опубликована одна работа⁴³, в которой измерялась подвижность таких частиц. На монодисперсном аэрозоле дибутилфталата с размерами частиц $r=5-20$ мкм с помощью модифицированного аспирационного счетчика ионов UT 7003 было показано, что монодисперсный аэрозоль, полученный методом ЭГДРЖ, является и весьма мономобильным, причем подвижность частиц указанного диапазона размеров составляет несколько десятых единицы электрической подвижности ($\text{см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$).

VI. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Возможность получения методом ЭГДРЖ мономобильных униполярно заряженных аэрозолей большого количества жидкостей, в том числе растворов органических и неорганических веществ, летучих и нелетучих жидкостей, суспензий и даже расплавов, обеспечивает широкую область применения этого метода. Уже в настоящее время обсуждается возможность применения ЭГДРЖ в таких областях, как коллоидные ракетные двигатели^{20, 40, 41, 50}, микрокапсюлизация⁶⁵, микродозирование очень токсичных и ядовитых веществ⁶⁶, приготовление эмульсий^{17, 67}, демонстрация электрофизических опытов⁶⁸, а в сочетании с гидравлическим²²⁻²⁴ и дисковым²⁵ распылением — и в электроокраске. Весьма перспективным этот метод может стать в следующих направлениях:

а) получение тонких очень однородных покрытий из растворов полимеров, олигомеров, а также солей и электролитов;

б) калибровка аспирационных счетчиков и спектрометров ионов, проточных заряд-спектрометров, классификаторов аэрозолей, счетчиков ядер конденсации, фотоэлектрических аэрозольных счетчиков и других аэрозольных приборов;

в) получение и исследование отдельных полимерных молекул путем высокодисперсного монодисперсного распыления весьма слабых растворов полимеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. A. Ryce, *Phys. Fluids*, **16**, 452 (1973).
2. V. E. Krohn, *Appl. Phys. Letters*, **23**, 5 (1973).
3. R. J. Pfeifer, C. D. Hendricks, *Phys. Fluids*, **10**, 2149 (1967).
4. S. B. Sample, R. Bollini, D. A. Decker, J. W. Borman, *Adv. Coll. and Interf. Sci.*, **1975**, 322.
5. A. G. Bailey, *Sci. Progr. Oxf.*, **61**, 555 (1974).
6. G. M. Bose, *Recherches sur la cause et sur la cause et sur la veritable theorie de l'electricite*, Wittenberg, 1745.
7. L. Raleigh, *Philosoph. Mag.*, **44**, 184 (1882).
8. J. Zeleny, *Phys. Rev.*, **3**, 69 (1914).
9. J. Zeleny, *Proc. Cambridge, Philosoph. Soc.*, **18**, 71 (1916).
10. J. Zeleny, *Phys. Rev.*, **16**, 102 (1920).
11. B. Vonnegut, R. Neubauer, *J. Coll. Sci.*, **7**, 616 (1952).

12. R. Neubauer, B. Vonnegut, Там же, 8, 551 (1953).
13. S. A. Ryce, Там же, 19, 490 (1964).
14. G. Ailam, I. Gallily, Phys. Fluids, 5, 1663 (1962).
15. J. Cahn, Там же, 5, 1663 (1962).
16. V. G. Drozin, J. Coll. Sci., 10, 158 (1955).
17. N. A. Nawab, S. G. Mason, Там же, 13, 179 (1958).
18. E. P. Yurkstas, C. J. Meisenzehl, Solid Homogeneous Aerosol Production by electrical Atomisation. UR-652, AEC Research and Development Rep., the University of Rochester, 1964.
19. W. Kleber, Plaste und Kautschuk, 7, 441 (1963).
20. W. Kleber, Там же, 8, 502 (1963).
21. R. N. Magarvey, L. E. Outhouse, J. Fluid Mech., 13, 151 (1962).
22. С. И. Попов, И. В. Петрянов, ДАН СССР, 195, 893 (1970).
23. В. А. Губенский, Лакокрасочные материалы и их применение, 1966, № 1, 28.
24. С. И. Попов, В. А. Губенский, Там же, 1967, № 1, 27.
25. W. Simm, Chemie-Ing.-Techn., 41, 503 (1969).
26. R. J. Pfeiffer, Phys. Fluids, 16, 454 (1973).
27. С. Д. Хендрикс, Р. С. Карсон, И. И. Хоган, Д. М. Шнайдер. Ракетн. техн. и космонавтика, 4, 189 (1964).
28. В. И. Коженков, А. П. Симонов, А. А. Кириш, Н. А. Фукс, ДАН СССР, 213, 879 (1973).
29. Т. К. Бураев, И. П. Верещагин, Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, 1971, № 5, 70.
30. C. D. Hendricks, J. M. Schneider, Amer. J. Phys., 31, 450 (1963).
31. A. Doyle, D. R. Moffet, B. Vonnegut, J. Coll. Sci., 19, 136 (1964).
32. J. W. Schweizer, D. N. Hanson, Там же, 35, 417 (1971).
33. M. A. Abbas, J. Latham, J. Fluid Mech., 30, 663 (1967).
34. W. A. Macky, Proc. Roy. Soc. London, A133, 565 (1931).
35. S. Ataman, D. N. Hanson, Ind. Ing. Chem. Fund., 8, 833 (1967).
36. S. A. Ryce, D. A. Patriarche, Canad. J. Phys., 43, 2192 (1965).
37. S. A. Ryce, R. R. Wyman, Там же, 42, 2185 (1964).
38. S. A. Ryce, R. R. Wyman, Там же, 43, 2571 (1965).
39. S. A. Ryce, Nature, 209, 1343 (1966).
40. И. И. Хоган, С. Д. Хендрикс, Ракетн. техн. и космонавтика, 3, 140 (1965).
41. Р. Д. Пфаффер, С. Д. Хендрикс, Там же, 6, 141 (1968).
42. S. B. Sample, R. Bollini, J. Coll. Sci., 41, 185 (1972).
43. В. И. Коженков, А. А. Кириш, Н. А. Фукс, Колл. ж., 36, 1169 (1974).
44. W. E. de Schon, R. S. Carson, J. Coll. Sci., 28, 161 (1968).
45. G. Taylor, Proc. Roy. Soc. (London), A280, 383 (1964).
46. E. Barreto, J. Aerosol Sci., 2, 2 (1970).
47. W. N. English, Phys. Rev., 74, 170 (1948).
48. K. Schultze, Z. angew. Phys., 13, 11 (1961).
49. И. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабекян, М. М. Пашин, Основы электрогазодинамики дисперсных систем, М., «Энергия», 1974, стр. 381.
50. В. Зафран, Вопросы ракетной техники, 1974, № 8, 65.
51. N. A. Fuchs, A. G. Sutugin, Aerosol Scienc. Acad. Press., N.-Y. 1969.
52. B. J. H. Liu, Schu-chi-Yeh, J. Appl. Phys., 39, 3 (1968).
53. P. Z. Swith, C. W. Penney, AIEE Trans., 55, 340 (1961).
54. B. J. H. Liu, K. T. Whitby, H. C. Yu, J. Coll. Sci., 23, 367 (1967).
55. N. A. Fuchs, Там же, 29, 173 (1969).
56. N. A. Fuchs, Trans. Faraday Soc., 32, 1131 (1936).
57. G. W. Hewitt, AIEE Trans., 31, 300 (1957).
58. V. G. Drozin, V. K. La Mer, J. Coll. Sci., 14, 74 (1959).
59. Л. М. Макальский, Г. З. Мирзабекян, В сб. Сильные электрические поля в технологических процессах, М., «Энергия», 1971, стр. 95.
60. G. Langer, J. L. Radnik, J. Appl. phys., 32, 955 (1961).
61. D. Hochreiner, J. Coll. Sci., 30, 553 (1969).
62. Э. И. Тамм, В сб. Труды по аэроионизации и электроаэрозолям, вып. 4, Тартуский Гос. ун-т, Тарту, 1973, стр. 139.
63. T. Erin, C. D. Hendricks, Rev. Sci. Instr., 39, 1269 (1968).
64. W. J. Megaw, A. S. Wells, J. Sci. Instr., E2, 12, 1013 (1969).
65. G. Langer, G. Yamate, J. Coll. Sci., 29, 450 (1969).
66. H. Straubel, Z. Aerosolforschung, 4, 385 (1955).
67. R. E. Wachtel, V. K. La Mer, J. Coll. Sci., 17, 531 (1962).
68. H. Straubel, Z. angew. Phys., 6, 264 (1954).