

На правах рукописи

Шепелев Станислав Михайлович

ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖИДКИХ ЧАСТИЦ

Специальность 01.04.01- Приборы и методы
экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара-2007

Работа выполнена на кафедре радиотехники и медицинских диагностических систем Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ)

Научный руководитель-
доктор технических наук, профессор Семкин Николай Данилович

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор Крутов Александр Федорович,
- кандидат технических наук, доцент Малыгин Николай Александрович.

Ведущая организация:

НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобелевца ГОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится 28 июня 2007 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 215.212.01 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34, корпус 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 25 мая 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат технических наук, профессор

В.Г. Шахов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке генератора высокоскоростных жидких частиц, который может быть использован для проведения экспериментов по взаимодействию высокоскоростных микрочастиц с материалами элементов конструкций космических аппаратов (КА) в лабораторных условиях в составе электростатического или электродинамического ускорителя заряженных микрочастиц и тарировки датчиков космических микрочастиц для натуральных экспериментов на околоземной орбите.

Актуальность работы. Актуальной проблемой современной авиакосмической промышленности является создание (КА) с большими сроками эксплуатации и большей надёжностью. Одним из основных факторов, влияющих на надёжность и долговечность КА, является коррозия и старение материалов элементов конструкций КА. Коррозия материалов КА является следствием их взаимодействия с атмосферой КА, а также с микрометеоритами естественного происхождения и техногенными частицами- космическим мусором.

Работа различных систем и устройств КА, таких, как двигатели ориентации и системы дозаправки, сопровождается периодическим выбросом в космос жидких компонентов топлива. Как показали эксперименты на орбитальной станции “Мир”, при работе двигателей ориентации выброс сгоревших и несгоревших, в том числе капельных, фракций топлива происходит практически в полную сферу – от 0 до 180° относительно оси струи, что связано, в первую очередь, с особенностями истечения газов и жидкостей в вакуум. Попадающие в поле течения выхлопного факела элементы конструкции КА подвергаются механическому и физико-химическому воздействию, что, безусловно, является отрицательным фактором. В связи с этим особый интерес конструкторов КА вызывает воздействие жидких высокоскоростных частиц диаметром от 0,1 до 10 мкм со скоростями 0,5-5 км/с, большие потоки которых на элементы конструкции КА возникают при включении двигателей.

Возникает проблема испытания материалов элементов конструкций КА на воздействие высокоскоростных частиц в лабораторных условиях, так как проведение натуральных экспериментов на околоземной орбите связано с большими затратами.

Для моделирования космических высокоскоростных жидких частиц необходимо разработать генератор жидких частиц, который в сопряжении с современной ускорительной техникой позволил бы проводить исследования воздействия высокоскоростных жидких частиц на элементы конструкции КА и тарировку датчиков космических микрочастиц для натуральных экспериментов на околоземной орбите.

Целью диссертационной работы является разработка генератора высокоскоростных заряженных жидких частиц с диаметрами от 0,1 мкм до 10 мкм и скоростями от 100 м/с до 2000 м/с, который может быть использован в составе электростатических или электродинамических ускорителей для моделирования высокоскоростных космических микрочастиц. Поставленная цель достигается путем решения следующих **задач**:

1. Разработка математической модели зарядки мениска диэлектрической жидкости на конце высоковольтного электрода.
2. Разработка математической модели натекания вязкой жидкости в область диспергирования и образования жидких частиц при разрушении заряженного

мениска диэлектрической жидкости на конце высоковольтного игольчатого электрода во взаимосвязи с параметрами разрабатываемого устройства и физическими свойствами жидкости, при соблюдении условия равновесности формы заряженного мениска.

3. Разработка математической модели ускорения заряженной частицы в электростатическом поле системы электродов разрабатываемого генератора при ее движении от высоковольтного игольчатого электрода до заземленного вытягивающего электрода.
4. Разработка генератора высокоскоростных жидких частиц в соответствии с результатами математического моделирования.
5. Экспериментальное определение зависимостей параметров частиц от параметров генератора и физических свойств жидкости.

Методы исследований базируются на использовании теории монодиспергирования вещества, гидродинамики, электрогидродинамики, электростатики. При решении поставленных задач использовались методы дифференциального и интегрального исчислений. При проведении моделирования на ЭВМ использовался математический пакет Mathcad.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана физико-математическая модель зарядки мениска диэлектрической жидкости на конце высоковольтного игольчатого электрода. Установлено, что заряд мениска носит преимущественно поверхностный характер и удельный заряд частиц растет с увеличением проводимости жидкости.
2. Разработана физико-математическая модель образования жидких частиц при разрушении заряженного мениска диэлектрической жидкости на конце высоковольтного игольчатого электрода. Установлено существование двух режимов диспергирования мениска жидкости в зависимости от длины иглы (критическая длина иглы $l_{кр}=2\div 3$ мм), и получены зависимости параметров частиц от параметров генератора и от физических свойств рабочей жидкости.
3. Разработан генератор высокоскоростных жидких частиц, в основу которого положен метод образования жидких частиц при разрушении заряженного мениска жидкости на конце капилляра под действием электрических сил. Разработанное устройство включает в себя систему подготовки жидкости и систему диспергирования жидкости. Для уменьшения диаметра, повышения скорости и стабильности параметров частиц в капилляр вставлен игольчатый электрод, и в области диспергирования жидкости установлен фокусирующий электрод.
4. Экспериментально показано, что при электростатическом диспергировании жидкости в пульсирующем режиме в разработанном генераторе получают потоки групп частиц с моностабильностью не хуже 3%. В отличие от струйного и капельного, пульсирующий режим считается неустойчивым и до сих пор не изучен. Размеры частиц в пульсирующем режиме меньше, чем в струйном и капельном, от 0,05 мкм до 16 мкм, частота образования частиц в пульсирующем режиме меньше, чем в струйном, но больше, чем в капельном (50-500 Гц), скорости частиц составляют от 100 до 2000 м/с.

Практическая ценность диссертационной работы.

1. Создан действующий образец генератора высокоскоростных жидких частиц. Разработанный генератор позволяет повысить точность и качество результатов ударных экспериментов.
2. Исследованы конструкторские и технологические возможности уменьшения диаметра, увеличения удельного заряда, повышения стабильности параметров частиц на выходе разрабатываемого генератора высокоскоростных жидких частиц.
3. Разработана методика проведения экспериментов с генератором жидких частиц в составе электростатического или электродинамического ускорителя.
4. Результаты диссертационной работы нашли применение в учебном процессе, при создании лабораторных работ, а также в экспериментах на ускорителях микрочастиц электростатического и электродинамического типа по изучению деградации поверхности элементов конструкции КА при воздействии на них высокоскоростных космических частиц и при тарировки датчиков космических микрочастиц для натуральных экспериментов на околоземной орбите.

На защиту выносятся:

1. Физико-математическая модель зарядки мениска диэлектрической жидкости на конце высоковольтного игольчатого электрода.
2. Физико-математическая модель образования и ускорения жидких заряженных высокоскоростных частиц при электростатическом диспергировании заряженного мениска диэлектрической жидкости на конце высоковольтного игольчатого электрода.
3. Способ получения высокоскоростных (100-2000 м/с) жидких заряженных микрочастиц (0,05- 10мкм).
4. Результаты экспериментального исследования режимов работы разработанного генератора высокоскоростных жидких заряженных частиц и зависимостей параметров частиц от параметров генератора и физических свойств рабочей жидкости.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: II Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара 2003), на V Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара 2006), на конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники» (Самара 2006).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 6 статей в научных журналах, 2 тезиса докладов и 2 патента РФ.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 178 страницах текста, в 108 рисунках, 4 таблицах. Список литературы включает в себя 110 наименований, приложения размещены на 6 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, изложены цель и задачи исследований, дана характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы по методам и устройствам ускорения пылевых частиц и диспергированию веществ.

Показано, что наиболее перспективным методом получения высокоскоростных заряженных частиц является метод электродиспергирования жидкости на конце капилляра.

В общем случае электродиспергирование представляет собой процесс распыления из конусного мениска жидкости на конце капилляра или иглы множества мелких капель под действием достаточно сильного электрического поля.

В диэлектрической жидкости, в отличие от проводящей, индуцирование заряда слабо. Для реализации конуса с заряженным острием в капилляр вставляется микронная игла под высоким потенциалом, которая покрывается слоем жидкости. Также использование иглы позволяет зафиксировать положение эмитирующего выступа на мениске, добиться резкого уменьшения радиуса кривизны жидкой поверхности, с которой идет эмиссия, и соответственно увеличения напряженности электрического поля.

Конструкция такого генератора достаточно проста и экономична. То есть данный метод наиболее применим в генераторе жидких заряженных частиц.

Генерация потоков капель методом электромонодиспергирования осуществляется в двух режимах: капельном и струйном.

В капельном режиме диаметр частиц зависит от диаметра капилляра. Это сильно усложняет конструкции приборов.

Образование капель при дроблении тонкой струйки жидкости, вырывающейся из кончика мениска, имеет место для жидкостей с низкой удельной проводимостью в относительно узком диапазоне изменения напряжения на электродах.

При эмиссии капель электростатическим полем избыточное давление в сопле с рабочей жидкостью выбирается таким, чтобы на выходе сопла образовался только мениск, но жидкость при этом не вытекала из сопла. Следовательно, необходимое давление невелико и, как правило, составляет сотни паскаль. Экспериментально снятые характеристики показали, что уменьшение гидростатического давления приводит к уменьшению диаметра капель. При гидростатическом давлении меньшим давления, необходимого для поддержания постоянного объема жидкости на конце капилляра, при условии ухода вещества в виде частиц, возникает пульсирующий режим. В пульсирующем режиме жидкость подтекает в область диспергирования, формируя мениск, из которого образуется струя, которая разрушается на капли, уносящие значительную часть вещества мениска. Так как гидростатическое давление мало, жидкость приходит в область диспергирования медленнее, чем уходит, и после образования нескольких частиц струя перестает существовать. Таким образом, пульсирующий режим характеризуется периодическим возникновением струи на конце мениска.

Если при электростатической окраске стремятся сообщить такой заряд капле, чтобы она, потеряв устойчивость, распалась на более мелкие, то при изучении воздействия жидких частиц на элементы конструкции КА распад частиц является недопустимым, хотя для более

эффективного ускорения частиц в электростатических ускорителях желательнее сообщить частице максимальный заряд.

Результаты изучения критического электрического заряда, при котором капля разрушается, говорят о том, что наряду с механизмом разрушения заряженной частицы на несколько дочерних заряженных частиц существует (преимущественно для проводников) механизм потери частицей заряда. Потеря заряда происходит в результате выделения частицей дочерней частицы, уносящей около 5% массы и 25% заряда, имеющей в свою очередь заряд больше критического и быстро разрушающейся.

В вакууме жидкость бурно кипит и испаряется. Это не приемлемо при получении жидких заряженных частиц, это накладывает очень жесткие рамки на выбор рабочей жидкости. В связи с этим в качестве рабочей жидкости используются вязкие диэлектрические жидкости с низкой упругостью паров: глицерин и вакуумное масло VM1.

На основании выполненного анализа методов и устройств диспергирования вещества сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе проведено детальное рассмотрение процессов зарядки и формирования мениска жидкости, его разрушения и ускорения образованных частиц в электростатическом поле системы электродов генератора. В результате комплексного решения этих задач получены зависимости параметров частиц от параметров генератора и от физических свойств рабочей жидкости, зависимости диаметра частиц и их удельного заряда от напряжения на игольчатом электроде показаны на рисунках 7, 8.

Известно, что в слабопроводящих средах под влиянием сильных неоднородных электрических полей возникает объемный заряд, определяемый градиентом проводимости среды. В области высокой напряженности электрического поля, в соответствии с моделью Френкеля, проводимость жидкого диэлектрика задается соотношением:

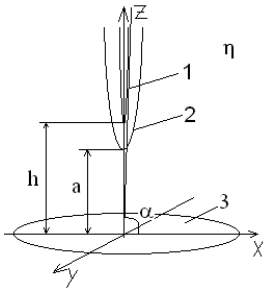
$$\sigma = \sigma_0 \exp \frac{e^{3/2} E^{1/2}}{(\pi \varepsilon)^{1/2} k T},$$

где σ_0 - проводимость при низкой напряженности поля, e - заряд электрона, E - напряженность электрического поля, ε - относительная диэлектрическая проницаемость жидкости, ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, k - постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{23}$ Дж/К), T - температура.

Градиент проводимости в межэлектродном пространстве обусловлен:

1. неоднородностью электрического поля (возникающий из-за скачкообразного изменения проводимости среды на границе «жидкий диэлектрик-вакуум») и плоский вытягивающий электрод (рис. 1);
2. неоднородностью среды (на границе раздела «жидкий диэлектрик- вакуум» (возникающий вследствие поляризации проводимость скачкообразно изменяется).

Заряд диэлектрической жидкости на игольчатом электроде рассматривается как объемный заряд жидкости (связанный с неоднородностью электрического поля), поверхностный свободный заряд на границе раздела двух сред «жидкость-вакуум»



(1- игольчатый электрод, 2- мениск жидкости, 3- вытягивающий электрод, h- расстояние между электродами, a- расстояние между плоским электродом и мениском жидкости, α - угол между плоским электродом и касательной к поверхности гиперboloида)

Рисунок 1- Расчетная модель системы электродов.

При аналитическом определении распределения заряда и электрического поля системы электродов используется конформное преобразование системы электродов гиперboloид-плоскость в плоскость-плоскость:

$$\dot{w} = \frac{h}{\alpha} \ln \left(\frac{z \sin \alpha}{h} + \sqrt{\frac{z^2 \sin^2 \alpha}{h^2} + 1} \right).$$

Количественные оценки, проведенные в рамках рассмотренной модели, позволяют утверждать, что при выполнении очевидного требования влияния поверхностного заряда мениска жидкости на игольчатом электроде на электрическое поле системы электродов игла – плоскость объемным зарядом мениска диэлектрической жидкости можно пренебречь, а решающее влияние на процесс диспергирования оказывает поверхностный заряд мениска жидкости. При диэлектрической проницаемости больше 2 плотность связанного поверхностного заряда в момент времени $t=0$ близка к максимально возможной плотности свободного заряда, то есть за время образования свободного заряда практически не происходит изменения плотности полного поверхностного заряда, а происходит уменьшение связанного и увеличение свободного поверхностного заряда (рис. 2).

Параметры частиц зависят от формы мениска. Определение формы мениска проводится путем подбора параметров (a- расстояние между поверхностью мениска и вытягивающим электродом и α - угол между вытягивающим плоским электродом и касательной к поверхности мениска, проведенной из точки (0;0)), при которых потенциальная энергия W мениска будет минимальной при условии сохранения объема мениска. Потенциальная энергия жидкого мениска W складывается из энергии сил поверхностного натяжения W_α и энергии взаимодействия электрического заряда с электростатическим полем W_ψ (рис. 3): $W = W_\alpha + W_\psi$.

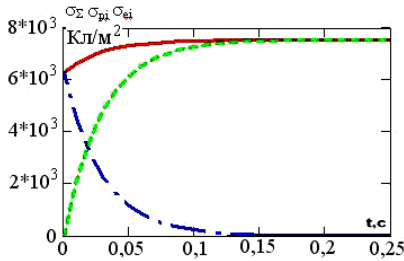


Рисунок 2- Зависимости плотности поверхностного заряда мениска жидкости связанного (штрих пунктирная), свободного (пунктирная), полного (сплошная) от времени. (в вакуумном масле при $h=0,03\text{м}$, толщине диэлектрика 10^{-5}м , угле $\alpha=99^\circ$ и $U_0=10000\text{В}$)

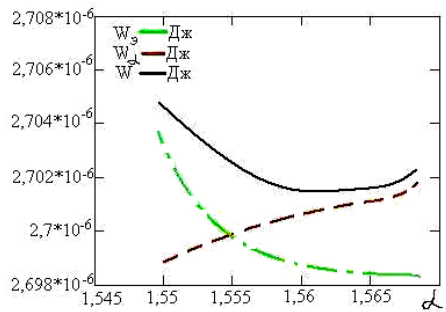


Рисунок 3- Зависимости энергий W_Σ (штрих пунктирная), W_α (пунктирная), W (сплошная) от угла α . (в вакуумном масле при $h=0,02\text{м}$ и $U_0=10\text{кВ}$)

Выберем в качестве мениска жидкости объем жидкости на конце электрода от $z=a$ до $z=Z_0$ (Z_0 выбирается в соответствии с режимом работы генератора). Тогда энергия поверхностных сил такого мениска запишется: $W_\alpha = \int_a^{Z_0} \alpha_0 \cdot 2\pi\rho(z)dz$.

где α_0 -коэффициент поверхностного натяжения, $\rho(z)$ - описывает поверхность мениска жидкости в полярных координатах.

За электрическую энергию примем энергию взаимодействия электрического заряда на поверхности мениска с электрическим полем системы электродов, которая будет определяться интегралом по всей поверхности мениска от произведения плотности поверхностного заряда и потенциала электрического поля в этой точке:

$$W_\Sigma = \int_a^{Z_0} \sigma_{pi} \cdot \varphi_2|_{z,p} \cdot 2\pi\rho(z)dz \cdot$$

В зависимости от длины иглы различаются два режима диспергирования:

- 1) **Короткая игла (первый).** Жидкость покрывает иглу толстым слоем. Количество жидкости на конце капилляра ограничивается скоростью протекания жидкости по нему.
- 2) **Длинная игла (второй).** Жидкость покрывает иглу тонким слоем и подтекает в область диспергирования по поверхности иглы.

Для решения задачи о параметрах образующихся частиц рассматривается динамика роста возмущений поверхности тонкой струи. Так как струя имеет форму гиперboloида, то диаметр струи увеличивается от ее конца до ее основания, увеличивается длина возбужденной волны (рис. 4)

$$\lambda(z) = \sqrt{3} \cdot 2\pi \frac{1}{\text{tg } \alpha} \sqrt{z^2 - a^2} \cdot$$

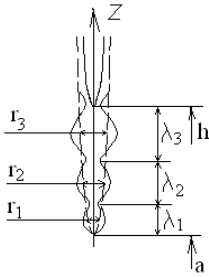


Рисунок 4- Модель разрушения струи на кончике игольчатого электрода.

В нашем случае магнитное поле создается только самой частицей, а, следовательно, вектора \vec{V} и \vec{H} сонаправлены, значит их произведение равно нулю.

Продольная и поперечная составляющие вектора напряженности электрического поля являются как функциями координат, так и функциями времени, но будем учитывать и то, что электрическое поле вне жидкости со временем изменяется мало, и будем считать его постоянным. Кроме того, составляющей E_p (проекция вектора напряженности поля в цилиндрической системе координат) при условиях достаточно малого внешнего диаметра вытягивающего электрода можно пренебречь и рассматривать движение частицы по оси симметрии системы электродов: $\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{Q}{m} E_{z2}(z)$.

В третьей главе представлено техническое описание спроектированного генератора жидких высокоскоростных частиц и стенда для экспериментального исследования генератора жидких частиц, приведены результаты экспериментальных исследований режимов работы генератора и зависимостей параметров частиц от параметров генератора и физических свойств жидкости.

Для экспериментальной проверки теоретических расчетов был разработан и построен генератор высокоскоростных частиц жидкости, изображение и схема которого приведена на рисунке 5.

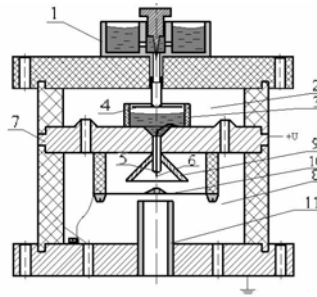


Рисунок 5- Генератор высокоскоростных жидких частиц.

Генератор работает следующим образом: жидкость через игольчатый натекатель 1 малыми дозами подается в камеру подготовки жидкости 2 в резервуар 3 с крышкой 4. При этом жидкость начинает бурно кипеть, давление резко увеличивается, но, так как объем

Скорость частицы находится из решения уравнения движения заряженной частицы в электромагнитном поле:

$$m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} = Q \cdot \vec{E} + \frac{Q}{c} \cdot [\vec{V} \times \vec{H}]$$

где c – скорость света в вакууме; \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля, Q и m – заряд и масса частицы.

поступившей жидкости мал, она быстро обезгаживается, и вакуум восстанавливается. Затем жидкость поступает в капилляр 5, в котором находится игольчатый электрод 6, на который подается высокий потенциал через междукламерную крышку 7. В камере диспергирования 8 на конце капилляра 5 мениск жидкости принимает форму сфероида и при появлении достаточного заряда на поверхности жидкости под действием электрических сил начинает вытягиваться и принимает форму тонкой струи. Тонкая струя под действием поверхностных сил дробится на маленькие частицы, диаметр которых тем меньше, чем меньше диаметр мениска.

После зарядки и ускорения в инжекторе частицы ускоряются электрическим полем в линейном электростатическом ускорителе (рисунок 6), приобретая скорость до 5-6 км/с.

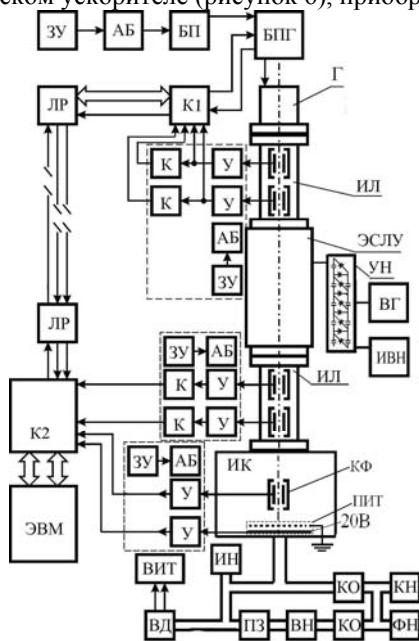


Рисунок 6 – Структурная схема стенда для экспериментального исследования генератора жидких частиц.

На рисунке 6 приняты следующие обозначения: Г – генератор жидких заряженных частиц; ИЛ - измерительная линейка; ЭСЛУ - электростатический линейный ускоритель; УН-умножитель напряжения; ИК - испытательная камера; ФН - форвакуумный насос; ВН - высоковакуумный насос; ИН - игольчатый натекатель; ПЗ - проходной затвор; КО - клапан отсекающий; КН - клапан натекатель; ВД - вакуумные датчики; ВИТ - вакуумметр ионизационно-термопарный; БПГ - блок питания генератора; БП - блок питания; АБ - аккумуляторная батарея; ЗУ - зарядное устройство; ЛР - лазерная развязка; К1 - первый контроллер; К2 - второй контроллер; У - усилитель; К - компаратор; ИВН - измеритель высокого напряжения; ВГ - высоковольтный генератор, КФ- кольцо Фарадея, ПИТ- преобразователь ионизационного типа.

Для регистрации скорости частицы используется пара датчиков индукционного типа (колец Фарадея). При движении частицы вдоль оси симметрии кольца на него наводится потенциал противоположного заряду частицы знака. Таким образом можно вычислить наводимый на кольца потенциал. В данном случае решается обратная задача: по измеренному потенциалу вычисляется заряд частицы: $Q = C \cdot U$, где C – емкость кольца Фарадея, U – наводимый на него потенциал.

Скорости частиц измеряются путем измерения временного интервала, за который частица пролетает известное расстояние между двумя индукционными датчиками. Если база (расстояние между центрами колец Фарадея) известна, то скорость частицы определится как $v = \frac{L \cdot f}{n}$, где L – база колец Фарадея; f – частота тактового генератора; n – количество импульсов, сосчитанных счётчиком.

Зная эффективное напряжение линейного ускорителя (U_0) по измеренным значениям скорости частицы перед линейным ускорителем (V_0) и после линейного ускорителя (V_1), можно определить удельный заряд частицы – важную характеристику для формирования ускоряющего напряжения: $\frac{Q}{m} = \frac{V_1^2 - V_0^2}{2U_0T_0}$, где T_0 – коэффициент времени

пролёта для линейного ускорителя (КПД).

Среди режимов работы генератора выявлено два режима генерации.

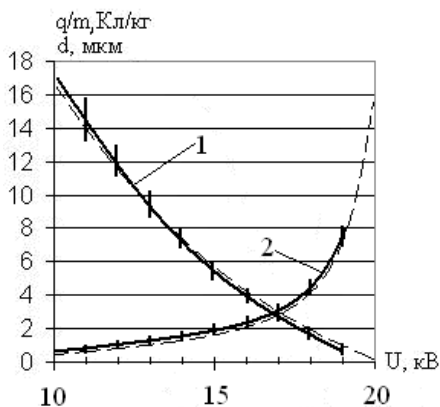


Рисунок 7- Зависимость диаметра d (1) и отношения заряда к массе q/m (2) первой в группе частицы вакуумного масла ВМ1 от напряжения на игольчатом электроде, длина электрода 1 мм, расстояние между электродами $h=16$ мм, диаметр острия $D=3$ мкм (сплошная линия- аппроксимация результатов экспериментов, пунктирная- результаты физико-математического моделирования).

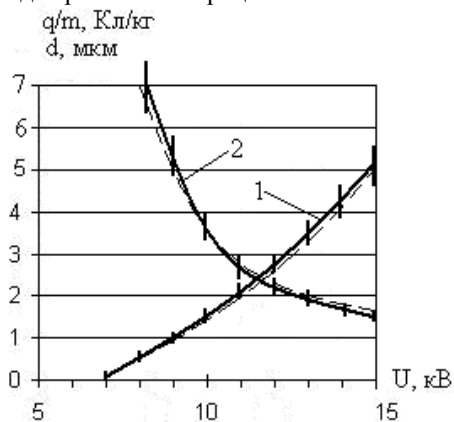


Рисунок 8- Зависимость диаметра d (1) и отношения заряда к массе q/m (2) первой в группе частицы вакуумного масла ВМ1 от напряжения на игольчатом электроде,

длина электрода 3 мм, расстояние между электродами $h=12$ мм, диаметр острия $D=3$ мкм (сплошная линия- аппроксимация результатов экспериментов, пунктирная- результаты физико-математического моделирования).

В первом режиме короткая игла длиной 0,5-1,7 мм выступает в роли только зарядного электрода. При увеличении напряжения на игле мениск становится острее и эмиссионный выступ становится острее, среднее давление электрических сил на мениск

жидкости на кончике капилляра уменьшается, так как уменьшается диаметр мениска на конце иглы, на который непосредственно действуют эти силы, частицы уменьшаются (рис. 7); q/m увеличивается (чем острее мениск, тем больше плотность заряда на нем); частота увеличивается, так как уменьшается толщина мениска, и он может быстрее разрушиться.

Второй режим наблюдается, когда игла имеет длину более 2,7 мм и является не только зарядным электродом, но и задающим форму мениска элементом.

При повышении напряжения размер частиц увеличивается, а отношение заряда к массе уменьшается (рис. 8). Это связано с тем, что при увеличении напряжения на игольчатом электроде увеличивается давление электрических сил, действующих на поверхность жидкости, и толщина слоя жидкости увеличивается за счет увеличения объема жидкости, подтекающей к острию по поверхности игольчатого электрода.

Генерация частиц осуществляется группами. Осциллограммы сигналов с первого и второго колец Фарадея измерительной секции, установленной за инжектором, показаны на рисунках 9, 10.

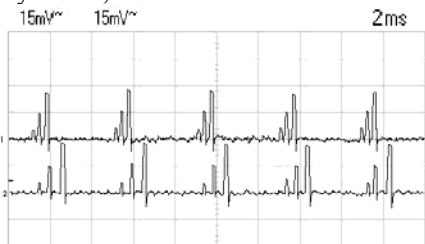


Рисунок 9- Осциллограммы сигналов с колец Фарадея после инжектора при большом времени развертки.

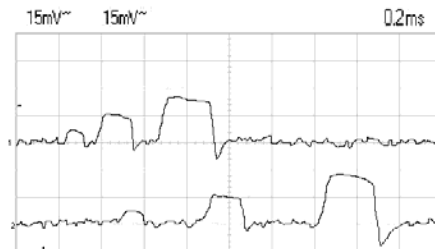


Рисунок 10- Осциллограммы сигналов с колец Фарадея после инжектора при малом времени развертки.

Наблюдаемый процесс диспергирования имеет низкую изменчивость на уровне повторяющихся периодически групп импульсов (частиц). В группах присутствует несколько частиц с различными параметрами, причем количество частиц в группе и их параметры для каждого порядкового номера от группы к группе высоко стабильны. Оценка моностабильности параметров частиц проводилась по их диаметру и составила:

- 1) Для первого режима на уровне групп: не хуже 10%;
- 2) Для второго режима на уровне групп: не хуже 3%;
- 3) Для первого режима на уровне частиц: не хуже 40%;
- 4) Для второго режима на уровне частиц: не хуже 33%.

Осциллограммы сигналов с колец Фарадея после электростатического ускорителя представлены на рисунке 11. Осциллограммы сигналов с кольца Фарадея, установленного вблизи мишени и с ионизационного датчика, представленные на рисунке 12, подтверждают устойчивость жидких частиц в процессе полета к мишени и факт удара частицы о мишень.

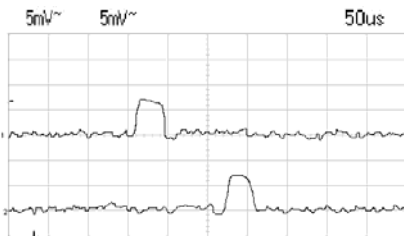


Рисунок 11- Осциллограммы сигналов с колец Фарадея после ускорителя (частица первая в группе 0,5 мкм, 1,5 км/с, q/m 10).

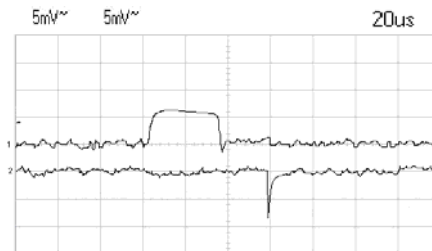


Рисунок 12- Осциллограммы сигналов с кольца Фарадея у мишени и датчика ионизационного типа.

В четвертой главе Определены погрешности экспериментального исследования зависимостей параметров частиц на выходе генератора высокоскоростных заряженных частиц от его параметров и от физических свойств рабочей жидкости и погрешности математического моделирования процесса зарядки и электродиспергирования мениска жидкости на конце игольчатого электрода.

Погрешность измерений параметров частиц составляет:

- для определения скорости частицы - 1,4%;
- для измерения заряда - 2,2%;
- для определения диаметра частицы - 3,1%;
- для определения удельного заряда - 9%.

Наиболее рациональным путем увеличения точности измерений является уменьшение погрешности измерения эффективного ускоряющего напряжения линейного электростатического ускорителя.

Погрешность вычисления параметров частиц составила:

- для диаметра частиц 1,1%;
- для заряда частиц 1,2%;
- для скорости частиц 1,6%;
- для частоты диспергирования 1 %.

Физико-математическая модель адекватно отражает исследуемое физическое явление, отклонение рассчитанных параметров частиц от экспериментальных не более 10-20%.

В пятой главе рассмотрены элементы конструкции генератора жидких частиц и методика проведения экспериментов с генератором высокоскоростных жидких частиц в составе электростатического или электродинамического ускорителя вертикального или горизонтального типа по моделированию высокоскоростных космических микрочастиц.

Основные результаты и выводы.

1. Показана актуальность для аэрокосмической техники проблемы построения устройств для моделирования высокоскоростных космических микрочастиц.
2. Показано, что главным отличием методов электростатического диспергирования является возможность получения потоков высокоскоростных заряженных частиц с высокостабильными параметрами.

3. Проведен аналитический расчет электрического поля игольчатого электрода, а также распределения электрического заряда по мениску жидкости на кончике высоковольтного электрода.
4. Определены зависимости параметров частиц от параметров генератора и физических свойств жидкости при электродиспергировании мениска жидкости, имеющего равновесную форму на игольчатом электроде.
5. На основании разработанной физико-математической модели диспергирования мениска диэлектрической жидкости на конце игольчатого высоковольтного электрода предложена методика получения высокоскоростных заряженных жидких частиц, положенная в основу разработанного генератора.
6. Разработан генератор высокоскоростных заряженных жидких частиц.
7. Проведено экспериментальное исследование режимов работы генератора и зависимостей параметров частиц от параметров генератора и физических свойств жидкости.
8. Показано, что результаты физико-математического моделирования подтверждаются экспериментальными исследованиями с точностью 10-20%.
9. Показано, что разработанный генератор высокоскоростных заряженных жидких частиц позволяет получать потоки частиц с частотой следования 5-500 Гц, при диаметре частиц от 0,05 до 10 мкм и со скоростями от 0,1 до 2 км/с. Моностабильность параметров генерируемых частиц не хуже $\alpha=10\%$.
10. Разработана методика проведения моделирования высокоскоростных космических микрочастиц с помощью генератора жидких высокоскоростных частиц, работающего в сопряжении с ускорителем электростатического или электродинамического типа.

Список научных работ.

1. Шепелев С.М., Богоявленский Н.Л., Воронов К.Е. Математическая модель преобразователя полусферической конструкции. // Вестник СГАУ, 2002, Серия: Актуальные проблемы радиоэлектроники, Выпуск 7, с. 82-92.
2. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Шепелев С.М., Богоявленский Н.Л. Инжектор заряженных пылевых частиц.// Приборы и техника эксперимента. -2006, №3, с. 154-159.
3. Шепелев С.М., Семкин Н.Д., Заряд мениска диэлектрической жидкости на высоковольтном игольчатом электроде.// Вестник СГАУ, 2006, №1, с. 200-208.
4. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Шепелев С.М. Определение оптимальной геометрии трубок дрейфа.// Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2006, Том 9, № 1, с. 64-71.
5. Шепелев С.М. Семкин Н.Д. Расчет электрического поля и заряда мениска диэлектрической жидкости на высоковольтном игольчатом электроде.// Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2007, Том10, №1, с 115-119.
6. Семкин Н.Д., Шепелев С.М., Исследование потоков микрочастиц при электростатическом диспергировании жидкости.// Вестник СГАУ, 2006, № 3(11), с. 40-48.
7. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Шепелев С.М., Источник заряженных пылевых частиц. //Патент на полезную модель RU 58839.- опубл. 27.11.2006.
8. Семкин Н.Д., Богоявленский Н.Л., Шепелев С.М. Источник заряженных жидких частиц. //Патент на полезную модель RU63160, 10 мая 2007 г.
9. Шепелев С.М., Генератор высокоскоростных жидких частиц.// Тезисы докладов и сообщений II Международной научно-технической конференции Физика и технические приложения волновых процессов. Под ред. В.А. Неганова и Г.П. Ярового, Самара, 2003, с. 341.
10. Шепелев С.М., Физико-математическая модель образования и ускорения высокоскоростных жидких диэлектрических частиц в вакууме.// Тезисы докладов 5 Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» под ред. В.А. Неганова и Г.П. Ярового, 2006, с. 326-327.

