

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВ МИКРОЧАСТИЦ ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ДИСПЕРГИРОВАНИИ ЖИДКОСТИ

© 2006 Н. Д. Семкин, С. М. Шепелев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Описана конструкция генератора заряженных жидких частиц для моделирования взаимодействия высокоскоростных частиц с элементами конструкции космического аппарата (КА). В основу генератора положен метод электростатического диспергирования жидкости. Приводятся результаты исследования устойчивости заряженных жидких частиц, получаемых в разработанном генераторе, и зависимости параметров частиц от подаваемого напряжения и длины игольчатого электрода.

В межпланетном пространстве присутствуют высокоскоростные частицы различных размеров, которые называют «космической пылью». Эти частицы могут иметь как естественный характер происхождения, так и техногенный, связанный с освоением человеком космоса.

Важной задачей является исследование воздействия «космической пыли» на элементы конструкции КА.

В настоящее время для наземного моделирования воздействия высокоскоростных частиц «космической пыли» на элементы конструкции КА используются ускорители твердых частиц. В их основу положено ускорение заряженных твердых частиц в электромагнитном поле. При этом в инжекторы частиц таких ускорителей загружаются уже готовые частицы (порошок), полученные в результате размола, распыления, конденсации из газоплазменного состояния [1]. Эти эксперименты обладают рядом недостатков:

- 1) частицы имеют неправильную форму;
- 2) разброс параметров частиц (массы, формы, начальной скорости, физико-химических свойств, избыточного электрического заряда) - один-три порядка по каждому из параметров.

Для устранения этих недостатков в инжекторах ускорителей можно использовать монодиспергирование жидкого вещества.

Процесс диспергирования жидкости широко применяется от электрокаплевоструйных регистрирующих устройств до научных приборов, создаваемых для изучения веществ в экстремальных состояниях.

Был проведен предварительный анализ методов диспергирования жидкости (таблица 1). В результате проведенного анализа с учетом того, что частицы должны иметь высокие скорости, большие заряды, микронные размеры, а также необходимости получения частиц в вакууме, был выбран метод электростатического диспергирования.

Способ электростатической эмиссии достаточно прост в реализации и гибок в оперативном управлении размерами капель, их зарядами и траекториями. Кроме того, метод электростатической эмиссии позволяет создавать как малые, так и высокие потоки жидких частиц с низким коэффициентом изменчивости и высокой монобильностью. Это особенно важно при использовании жидких частиц для исследования вещества в экстремальных состояниях.

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

Этот способ (для проводящих жидкостей) реализуется следующим образом [21]. Если между капиллярным соплом, заполненным находящейся в равновесии жидкостью, и расположенным рядом электродом создать определенную напряженность электрического поля, то под действием индуцированных на поверхности жидкости зарядов нарушится устойчивость поверхности мениска. Электрические силы начнут превосходить силы сцепления в жидкости, и мениск жидкости

Таблица 1. Параметры частиц, получаемые различными методами

Метод	Принцип действия	Источ-ник	Диаметр капли, мкм	Разброс по диаметрам	Заряд, Кл
Конденсационный метод	Конденсация перенасыщенных паров	[2]	0,02-0,5	40%	нет
		[3]	15-50	5-18%	нет
	Конденсация паров в холодном газе	[4]	0,61-1,3	2-12%	нет
Плавление на несмачиваемой поверхности	На несмачиваемую поверхность наносится слой вещества, делится на одинаковые порции с последующим плавлением и остужением	[5]	0,1-0,15	$\alpha < 8\%$	нет
		[6]	ограничения связаны с возможностями точного разделения на секции нанесенного слоя		нет
Диспергирование вращающимся диском	В центр вращающегося диска (на подшипниках) подается жидкость	[7]	до 15 мкм	$\approx 2\%$ (сателлиты диаметром в 2-3 раза меньше)	нет
		[8]			
Аэродинамическое диспергирование	Обдувание капилляра узкой струей воздуха, концентрической капилляру	[9]	300-1000	3%	нет
		[10]	450-2000	0,5-1,5%	
		[11]	300-600	2-5%	10^{-12} - 10^{-11}
Барботажный генератор	Схлопывание газовых пузырьков на поверхности раздела «жидкость- газ»	[12]	>2	<10%	нет
		[13]	6-40		
		[14]			
		[15]			
Импульсный нагрев рабочей жидкости	Получение капли импульсным давлением за счет создания в рабочей жидкости газового пузырька путем ее нагревания	[16]	30-100	нет данных	нет
Использование высокого давления	Подача на сопло жидкости под высоким давлением с синхронизацией дробления струи добавочными силами	[16]	10-300	нет данных	нет
		[17]	120-2600		
		[18]	700-1100	3%	
Электростатическое распыление	Подача высокого напряжения на капилляр с жидкостью	[19]	1	нет данных	есть
		[20]	140-420	нет данных	есть
		[20]	5-15	нет данных	есть

начнет вытягиваться в конус, его вершина станет совершать колебательные движения и дробиться на заряженные капли, которые будут с нарастающей скоростью двигаться в сторону ускоряющего электрода.

Для диэлектрической жидкости отличие заключается в том, что на мениске под действием электрического поля индуцирование заряда недостаточное. Поэтому для реализации конуса с заряженным острием в капилляр вставляется микронная игла под вы-

соким потенциалом, которая покрывается тонким слоем жидкости.

Иглу используют также при электродиспергировании проводящей жидкости [22], [23]. В [24] впервые было предложено вставить внутрь капилляра, по которому подается жидкость, весьма тонкую иглу-электрод. Это позволило зафиксировать положение эмитирующего выступа на мениске, добиться резкого уменьшения радиуса кривизны жидкой поверхности, с которой идет эмис-

сия, и соответственно увеличения напряженности электрического поля, вызывающего эмиссию.

Выбор рабочего вещества осуществляется из условий наибольшего коэффициента поверхностного натяжения жидкости, так как от него зависит устойчивость полученных заряженных частиц в электрическом поле, и низкой упругости паров вещества.

В качестве рабочей жидкости были использованы глицерин и вакуумное масло ВМ1. Параметры жидкостей, приведенные в [25], [26], представлены в таблице 2.

На рис. 1 представлена схема разработанного инжектора жидких заряженных частиц.

Работа инжектора происходит следующим образом: жидкость через игольчатый напускатель 1 малыми дозами подается в камеру подготовки жидкости 2 в резервуар 3 с крышкой 4. При этом жидкость начинает бурно газить, давление вакуума резко увеличивается, но так как объем поступившей жидкости мал, она быстро обезгаживается и давление вакуума восстанавливается. Затем жидкость поступает в капилляр 5, в котором на-

ходится игольчатый электрод 6, на который подается высокий потенциал через междукамерную 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 пондеромоторных сил мениск начинает вытягиваться и принимает форму, близкую к конусу (так называемый «конус Тейлора»). При достижении электрическими силами, действующими на поверхность жидкости, критического значения (когда электрические силы скомпенсируют Лапласовские) произойдет отрыв частицы жидкости. Оторвавшись от мениска жидкости, частица, ускоряясь в электростатическом поле, образованном игольчатым электродом 6, фокусирующим электродом 9 и вытягивающим заземленным электродом 10, пролетает через отверстие в вытягивающем электроде и с полученной скоростью продолжает движение на выход из инжектора через экранирующую трубку 11.

Измерения параметров частиц проводились с помощью трех емкостных датчиков-колец Фарадея, которые располагались на

Таблица 2. Параметры жидкостей

Вещество	Плотность, кг/м ³	Поверхностное натяжение, мН/м	Проводимость (Ом·см) ⁻¹	Относительная диэлектрическая проницаемость
ВМ1	850	47	$0.8 \cdot 10^{-15}$	2,2
Глицерин	1200	64,7	$1.5 \cdot 10^{-9}$	42,4

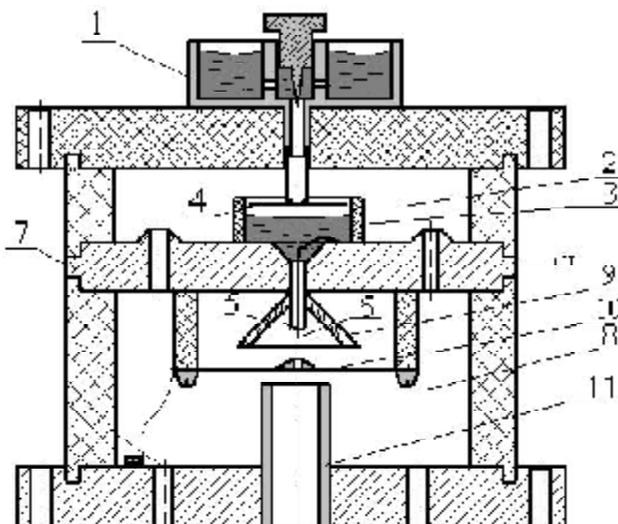


Рис. 1. Схема инжектора жидких заряженных частиц

расстоянии 12 см, 30 см и 1 м от выхода инжектора. Третий удаленный датчик использовался для подтверждения устойчивости частиц. Первый и второй датчики использовались для определения параметров частиц: заряда q и скорости V , которые можно определить, зная амплитуду сигнала на датчиках U_q , время запаздывания сигнала со второго датчика относительно первого t , емкость датчиков C , расстояние между датчиками L :

$$q = CU_q, V = L/t.$$

По полученным параметрам, зная разность потенциалов U на электродах, можно определить массу частицы m :

$$m = \frac{2qU}{V^2}.$$

Осциллограммы сигналов с первого и второго колец Фарадея показаны на рисунках 2, 3.

Наблюдаемый процесс диспергирования имеет низкую изменчивость на уровне повторяющихся периодически групп импульсов (частиц). Тем не менее монодиспергирования достичь не удалось из-за того, что в группах присутствует несколько частиц с различными параметрами, причем количество частиц в группе и их параметры для каждого порядкового номера высоко стабильны.

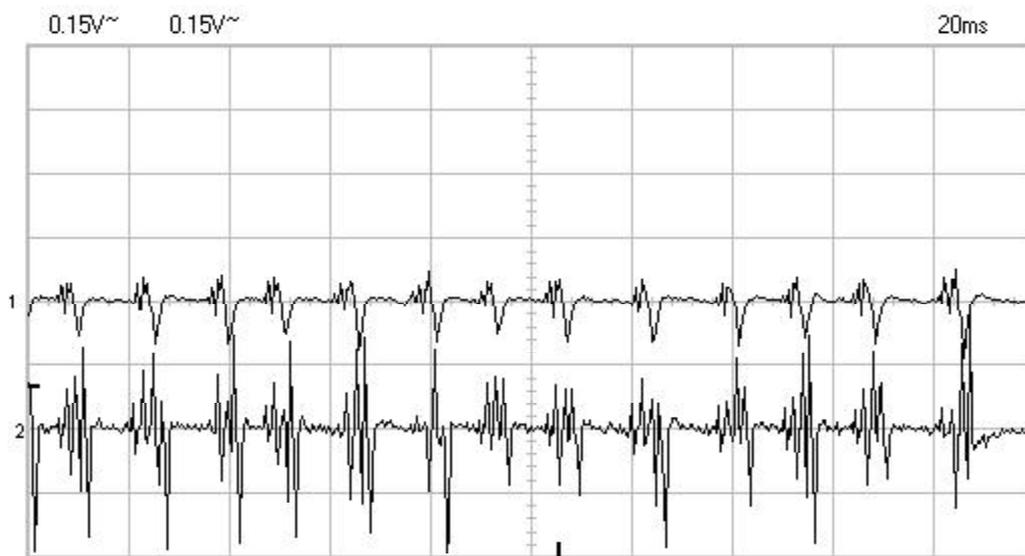


Рис. 2. Осциллограммы сигналов при большом времени развертки

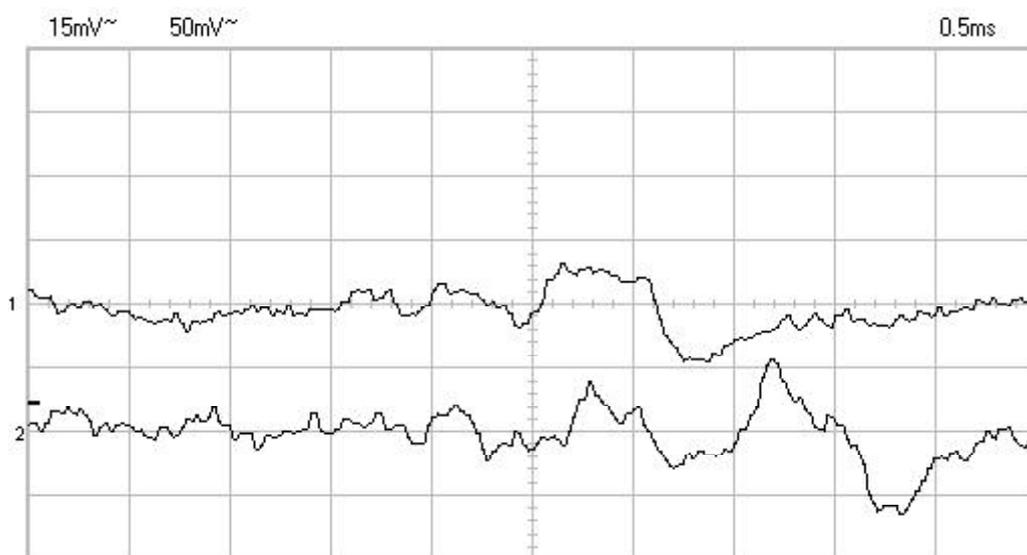


Рис. 3. Осциллограммы сигналов при малом времени развертки

Наблюдаемый эффект объясняется либо вырыванием с поверхности мениска короткой струйки, которая при движении дробится, либо быстрым разрушением диспергированной частицы. Это в принципе одно и то же, если учесть, что при разрушении частица примет форму сильно вытянутого по полю эллипсоида.

Оценка критического по Релею заряда частицы проведена в [27] из соображений минимума энергии заряженной частицы. Приводя полученные в [27] выражения к

удобному отношению заряда к массе (q/m), получим

$$\frac{q}{m} = \sqrt{\frac{576ae\epsilon_0}{d^3r^2}},$$

где a , e , r - коэффициент поверхностного натяжения, относительная диэлектрическая проницаемость и плотность жидкости, соответственно; d - диаметр капли.

На рис. 4 показаны зависимости от диаметра частиц:

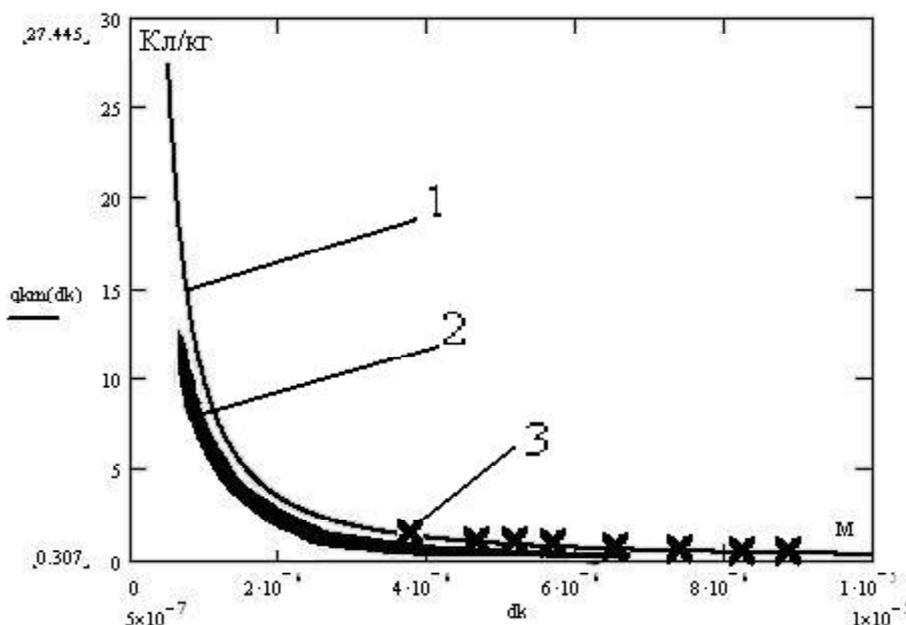


Рис. 4. Зависимости отношения заряда к массе от диаметра частиц

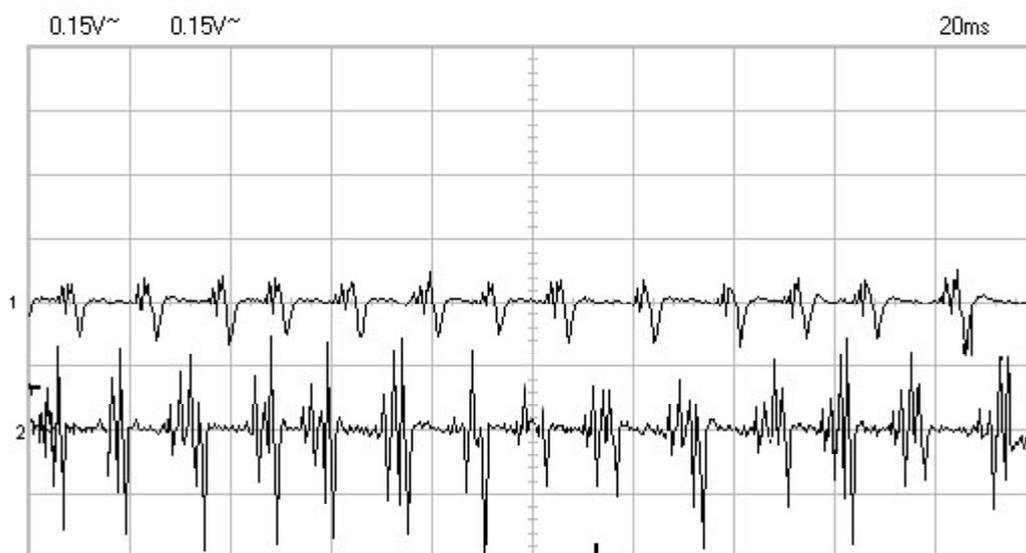


Рис. 5. Осциллограммы сигналов с первого и третьего датчиков

- 1) расчетного критического q/m ;
- 2) q/m полученных в инжекторе частиц при различных режимах генерации;
- 3) q/m частицы «родителя», параметры которой вычислялись как $q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$, $m = m_1 + m_2 + \dots + m_n$, где n - количество частиц в группе.

Из рис. 4 видно, что частицы, наблюдаемые в эксперименте, устойчивы по отношению к собственному заряду, а «родительские» частицы находятся на границе рассчитанной устойчивости или превышают ее.

На основании проведенного анализа энергетического состояния неустойчивой заряженной капли в [27] было отмечено, что заряд каждой последующей частицы, имитированной «родительской» каплей, будет больше предыдущего. Разрушение «родитель-

ской» капли будет происходить до тех пор, пока ее заряд не станет меньше критического. Эти утверждения хорошо согласуются с результатами экспериментов, полученными нами.

Эксперименты, проведенные с использованием третьего датчика, отнесенного на 1 м, подтверждают устойчивость частиц (рис. 5).

При проведении экспериментов было выявлено два режима генерации в зависимости от длины иглы, выступающей над поверхностью капилляра.

В первом режиме короткая игла длиной 0,5...1 мм выступает в роли только зарядного электрода. При увеличении напряжения на игле мениск вытягивается (рис. 6) и эмиссионный выступ становится острее; частицы уменьшаются (рис. 7); q/m увеличивается

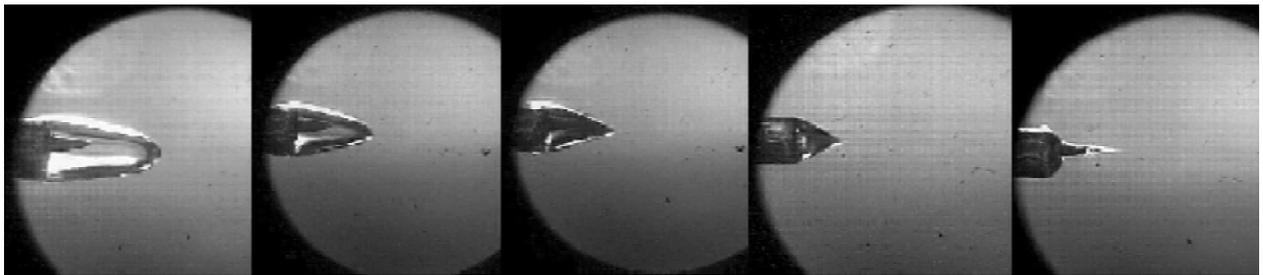


Рис. 6. Зависимость формы мениска от напряжения на игольчатом электроде соответственно при 7 кВ, 9 кВ, 10 кВ, 12 кВ и 20 кВ

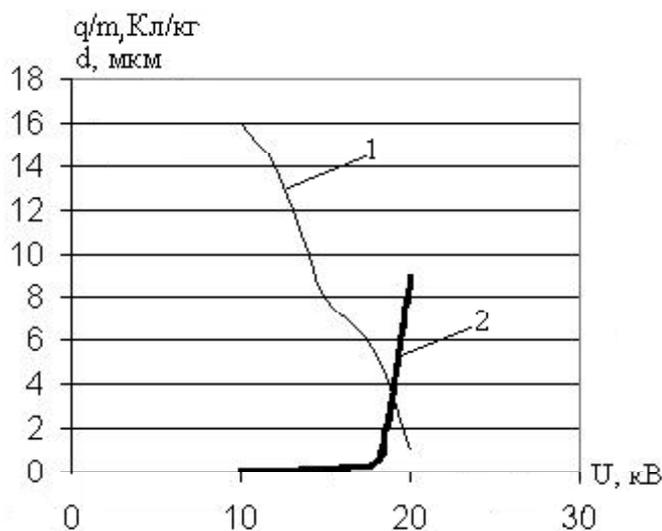


Рис. 7. Зависимость диаметра d (1) и отношения заряда к массе частицы q/m (2) от напряжения на игольчатом электроде длиной 0,7 мм

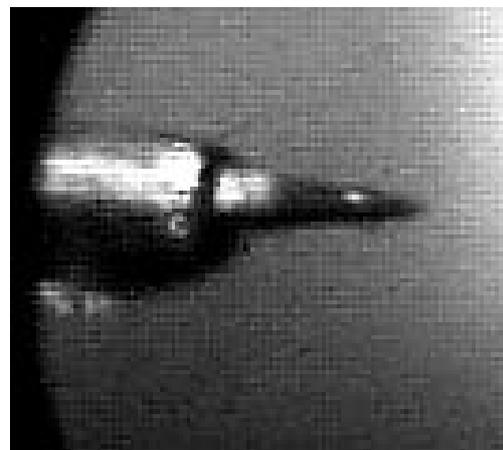


Рис. 8. Форма мениска жидкости при длине иглы 3 мм

(чем острее мениск, тем больше плотность зарядов на нем); частота увеличивается (изменяя форму, капля своей поверхностью приближается к поверхности иглы (рис. 6)) и быстрее заряжается.

Следует отметить, что моностабильность образованных частиц слабая, поскольку коэффициент повторяемости около 20...25%. Частота диспергирования мала: от одной частицы в минуту при 7 кВ до одной частицы в секунду при 12 кВ. При повышении напряжения до 20 кВ наблюдается переход ко второму режиму.

Второй режим наблюдается, когда игла имеет длину более 2 мм и является не только зарядным электродом, но и формозадающим элементом (рис. 8).

При повышении напряжения размер частиц увеличивается, а отношение заряда к массе уменьшается (рис. 9). Это связано с тем, что при увеличении напряжения на игольчатом электроде увеличивается пондеромоторная сила, действующая на поверхность жидкости, и толщина слоя жидкости увеличивается.

Моностабильность частиц очень высокая, а частота каплеобразования меняется мало и колеблется около значения 100 Гц.

Таким образом, при электрогидродинамическом диспергировании диэлектрической жидкости с кончика капилляра с игольчатым электродом образуются неустойчивые по отношению к собственному заряду частицы, которые, разрушаясь, образуют устойчивые частицы.

Существуют два режима генерации:

1. При короткой игле (менее 1 мм) моностабильность параметров частиц низкая, частота диспергирования низкая, и с увеличением напряжения уменьшается диаметр частиц, а отношение заряда к массе увеличивается.

2. При длинной игле (более 2 мм) моностабильность высокая, частота сравнительно высокая и зависит от гидравлических параметров жидкости. Для ВМ1 она составляет около 100 Гц. При увеличении напряжения диаметр частиц увеличивается, а отношение заряда к массе уменьшается.

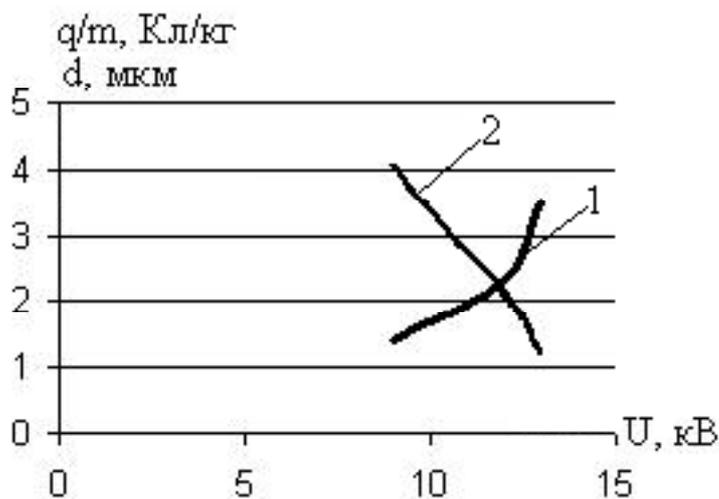


Рис. 9. Зависимость диаметра d (1) и отношения заряда к массе частицы q/m (2) от напряжения на игольчатом электроде длиной 2 мм

Список литературы

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. - М.: Наука, 1966.
 2. Sinclair D., La Mer V. K. Light Scattering as a Measure of Particle Size in Aerosols.

The Production of Monodisperse Aerosols // Chem. Revs., 1949, v. 44, № 2, p. 245-267.

3. Burgoyne J. H., Cohen L. The Production of Monodisperse Aerosols of Large Drop Size. - J. Colloid Sci., 1953, v.8, №3, p. 364-366.

4. Коган Я. И., Бурнашева З. А. Укрупнение и измерение ядер конденсации в непрерывном потоке // Журнал физической химии. - 1966, т. 34, № 12. – С. 2630-2639.
5. Ситугин А. Г. Простой прибор для получения монодисперсных аэрозолей // Физика аэродисперсных систем. - 1971, вып. 4. - С. 33-37.
6. Тимохин А. Д. Получение потоков монодисперсных нейтральных и заряженных макрочастиц // Труды МЭИ, вып. 545. – 1981. - С. 3-24.
7. Walton W. H., Prewett W. C. The Production of Sprays and Mists of Uniform Drop Size by Means of Spinning Disc Type Sprayers. – Proc. Phys. Soc. Sec. B, 1949, v. 62, part 6, № 354B, p. 341-350.
8. May K. An Improved Spinning Top Homogeneous Spray Apparatus // J. Appl. Phys., 1949, v. 20, № 3121, p. 672-673.
9. Lane W. R. A Microburette for Producing Small Liquid Drops of Known Size. – J. Sci. Instrum., 1947, v. 24, № 4, p. 98-101.
10. Reil R., Hallet J. An apparatus for the production of uniform sized water drops at desired time intervals // Rev. Sci. Instrum., 1969, Vol. 40, № 4, p. 533-534.
11. Cheng L., Cross W. G. Production of Single Liquid Drops of controlled Size and Velocity. – Rev. Sci. Instrum., 1975, v. 46, № 3, p. 263-265.
12. Blanchard D. C. A Simple Method for the Production of Homogeneous Water Drops Down to 1 micron radius // J. Coll. Sci. 1976, v. 9. p. 321-329.
13. Габрусенок П. С. Генератор монодисперсных капель // Сб. научн. тр. VII Всесоюзной межвузовской конференции по вопросам испарения горения и газодинамики дисперсных систем. - Одесса, 1967. - С. 43.
14. Контуш С. М., Романов К. В., Неизвестный А. И. Исследование работы генератора струи монодисперсных капель // Сб. научн. тр. VIII межвузовской конференции по вопросам испарения горения и газодинамики дисперсных систем. - Одесса, 1968. - С. 35.
15. Контуш С. М. Романов К. В. Образование струи монодисперсных капель при продувании газа через слой жидкости // Физика аэродисперсных систем. - 1971, вып. 4. - С. 38-43.
16. Нагорный В. С. Управляемая капля // Соросовский образовательный журнал. - 2004, том 8, № 1. - С. 115-121.
17. Raghuparty B., Sample S. B. A New Apparatus for the Production of Uniform Liquid Drops // Rev. Sci. Instrum., 1970, v. 41, № 5, p. 645-647.
18. Sample S. B., Raghuparty B. Electrical Generation of Collimated Beams of Uniform Charged Particles // Proc. Mat. Electron. Conference, 1969, v. 25, p. 260-263.
19. Vonnegut B., Neubauer R. L. Production of Monodisperse Liquid Particles by Electrical Atomization // J. Colloid. Sci., 1952, v. 7, № 7, p. 616-622.
20. Кожевников В. И., Фукс Н. А. Электрогидродинамическое распыление жидкости // Успехи химии. - 1976, т. XLV, вып. 12. - С. 2275-2284.
21. Безруков В. И., Костылев А. А. Экспериментальное исследование электростатической эмиссии монодисперсных капель // Труды МЭИ. – 1988. № 185. - С. 43-53.
22. Дудников В. Г., Шабалин А. Л. Электродинамические эмиттеры ионов // ПМТФ. – 1990. № 2. - С. 3-10.
23. Григорьев А. И., Ширяева С. О. Электрогидродинамические аспекты функционирования жидкометаллических источников ионов // ЖТФ. - 1992, том 62, вып. 12. - С. 9-20.
24. Kim K., Turnbull R. J. Generation of charged drops of insulating liquids by electrostatic spraying // J. Appl. Phys., 1976, Vol. 47, № 5, p. 1964-1969.
25. Аметистов Е. В., Мотин А. И. Экспериментальное исследование процессов вынужденного распада вязких жидкостей // Труды МЭИ, 1986. - № 119. - С.13-17.
26. Варгафтиг Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Физматгиз, 1963.
27. Григорьев А. И., Ширяева С. О. Закономерности Рэлеевского распада заряженной капли // ЖТФ. - 1991, т. 61, вып. 3. – С. 19-27.

**ANALYSIS OF MICROPARTICLE FLOWS IN CASE OF ELECTROSTATIC
FLUID DISPERSION**

© 2006 N. D. Syomkin, S. M. Shepelev

Samara State Aerospace University

The paper describes a generator of charged fluid particles for simulating the interaction of high-velocity. The generator is based on the method of electrostatic fluid dispersion. The results of analyzing the stability of charged fluid particles produced of particle parameters on the voltage and the length of a needle electrode are presented.