

УДК 621.384.362

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАРЯДКИ МИКРОЧАСТИЦ В КАМЕРЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА

© 2015 Н. Д. Сёмкин, А. С. Видманов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Проведён анализ механизмов зарядки микрочастиц в области зарядной иглы электростатического инжектора. Основное внимание уделено рассмотрению процесса зарядки проводящей частицы за счёт эмиссии электронов с её поверхности под действием сильного электростатического поля. Описана математическая модель контактной и бесконтактной зарядки частицы. Приведены результаты решения системы уравнений, описывающих динамику зарядки и движения микрочастицы в области зарядной иглы инжектора. Рассчитаны значения отношения заряда микрочастицы к её массе на выходе электростатического инжектора при различных диаметрах зарядной иглы и размерах микрочастиц. Проведён сравнительный анализ результатов расчёта значений отношения заряда микрочастицы к её массе в зависимости от механизмов зарядки и параметров микрочастицы и зарядной иглы. Приведены результаты расчёта максимально возможных значений отношения заряда, полученного частицей в инжекторе, к её массе в зависимости от механизма зарядки. Представлена зависимость значения отношения заряда микрочастицы к её массе от расстояния до иглы в момент начала автоэлектронной эмиссии с поверхности частицы. Рассчитаны значения отношения заряда микрочастицы к её массе на выходе электростатического инжектора при реальных начальных значениях скоростей движения и зарядах частицы в зарядной камере.

Зарядка микрочастицы, ускоритель твёрдых частиц, электростатический инжектор, автоэлектронная эмиссия.

doi: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-168-176

Введение

Для проведения экспериментов по изучению высокоскоростного удара широко применяются электростатические и электродинамические ускорители [1]. В качестве ускоряемого элемента в таких ускорителях используют частицы с диаметрами 0,1-100 мкм. Микрочастицы, перед тем как попасть в тракт ускорителя, заряжаются в инжекторе. Известны различные виды инжекторов данного типа [1]. Принцип их работы заключается в следующем: микрочастицы находятся в бункерной камере и получают предварительный заряд от бункерного электрода, а затем через специальные отверстия они попадают в зарядную камеру, где заряжаются от иглы или «метёлки» зарядного электрода.

Существуют различные конструкции инжекторов частиц, однако процессы зарядки их во взаимосвязи с параметрами инжектора не описаны.

Важным параметром частиц на выходе инжектора является отношение заряда, полученного в инжекторе, к их массе. Данный параметр сильно влияет на эффективность работы всего ускорительного тракта. Поэтому необходимо изучать процессы зарядки микрочастиц для выбора параметров элементов конструкции инжектора.

1. Модель зарядки микрочастиц

Возможны два механизма зарядки микрочастиц в инжекторе: контактная и бесконтактная.

При контактном механизме зарядки частица приобретает заряд, соприкасаясь с зарядным электродом. В этом случае величина заряда, полученного частицей, определяется множеством случайных факторов (формой частицы и электрода, рельефом поверхности, наличием оксидных плёнок или/и слоя остаточного газа на поверхности контакта и др.). Поэтому

для оценки полученного частицей заряда можно воспользоваться приближёнными формулами. В общем случае заряд проводящей частицы вычисляется по формуле:

$$q_p = \oint_S \sigma dS, \quad (1)$$

где σ – поверхностная плотность заряда, S – площадь поверхности частицы.

Величина поверхностной плотности заряда проводника определяется напряжённостью поля вблизи зарядного электрода. Для проводящего шара в однородном электрическом поле поверхностная плотность заряда, индуцированного на поверхности, определяется выражением [2]:

$$\sigma_i = -3E_{out} \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos\theta, \quad (2)$$

где θ – угол между нормалью к поверхности и вектором напряжённости внешнего поля; E_{out} – модуль напряжённости внешнего поля; ε_0 – диэлектрическая постоянная.

Для упрощения расчёта рассчитывают заряд полусферы, лежащей на поверхности плоского электрода. Подставив выражение (2) в интеграл (1) и проинтегрировав по поверхности полусферы, получим выражение для оценки заряда микрочастицы, соприкасающейся с зарядным электродом:

$$q = -3\pi \cdot E_{out} \cdot \varepsilon_0 \cdot r_p^2, \quad (3)$$

где r_p – радиус микрочастицы.

Для определения заряда, полученного частицей от иглы зарядного электрода, по формуле (3) напряжённость поля будем определять как отношение потенциала на игле к её радиусу:

$$q = \frac{-3\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_p^2 \cdot f}{R}, \quad (4)$$

где r_p – радиус микрочастицы; f – потенциал на зарядном электроде; R – радиус иглы.

Бесконтактная зарядка частицы вблизи иглы зарядного электрода инжек-

тора может происходить в результате возникновения разряда. Разряд в промежутке «частица-электрод» происходит из-за автоэлектронной эмиссии с поверхности электрода или частицы, которая возникает вследствие резкого увеличения напряжённости поля при сближении частицы и электрода. Интенсивная автоэлектронная эмиссия с поверхности способна вызвать разогрев и испарение части материала частицы или электрода. Образовавшийся пар, состоящий из атомов испарённого вещества, может ионизироваться под действием электронов. Ионы плазмы, образующиеся в промежутке «частица-электрод», вносят свой вклад в заряд частицы.

Заряд частицы можно записать в следующем виде:

$$q_p = \int (j_e \cdot S_e + j_i \cdot S_i) dt,$$

где j_e – плотность тока эмиссии автоэлектронов; j_i – плотность тока ионов; S_e , S_i – соответственно площадь тока эмиссии автоэлектронов и площадь осаждения ионов на частицу.

Автоэлектроны, ускоренные в сильном электрическом поле, могут вызвать ряд физических процессов, таких как разогрев поверхности катода (микрочастица) и/или анода (острие иглы), взрыв из-за джоулевого тепла микроострия на поверхности катода и ионизацию остаточного газа. Все эти процессы ведут к заполнению промежутка «частица-игла» плазмой и возникновению разряда.

На первом этапе моделирования движения частицы в области иглы рассмотрим процесс зарядки микрочастицы только в результате автоэлектронной эмиссии с её поверхности, поскольку именно от величины плотности тока автоэлектронной эмиссии зависит возможность протекания перечисленных процессов и их интенсивность. К тому же, вклад ионной составляющей плазмы в заряд частицы в 5-10 раз меньше вклада автоэлектронов.

Плотность тока автоэлектронной эмиссии сильно зависит от напряжённости электрического поля на поверхности частицы и описывается уравнением Фаулера-Нордгейма [3]:

$$j_e = \frac{1,54 \cdot 10^{-6}}{t^2(y)} E_p^2 \varphi^{-1} \exp \left[\frac{6,83 \cdot 10^9 \varphi^{1,5}}{E_p} \theta(y) \right], \quad (5)$$

где $\theta(y)$ – функция Нордгейма; E_p – напряжённость поля на поверхности частицы; φ – работа выхода материала (эВ); $y = 3,79 \cdot 10^{-5} E_p^{-0,5} \Phi^{-1}$; $t(y) = 1,041 \div 1,095$; $\theta(y) = 0,93 - 0,966 \cdot y^2$.

Для расчёта будем использовать упрощённую формулу:

$$j_e \approx 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{E_p^2}{\varphi} \cdot 10^{\left[4,39 \varphi^{-0,5} - \frac{2,82 \cdot 10^9 \cdot \varphi^{1,5}}{E_p} \right]}, \quad (6)$$

где j_e , E_{out} , φ измеряются в А/м², В/м и эВ соответственно.

Для упрощения расчётов и исходя из неопределённости формы острия иглы зарядного электрода, поле у поверхности иглы будем представлять как поле шара, отстоящего от зарядного электрода на расстоянии, равном длине иглы, и с радиусом, равным радиусу кривизны острия иглы. Для проведения расчётов выберем радиус иглы R равным 10-50 мкм.

Напряжённость поля на оси иглы определяется выражением:

$$E_n = \frac{f \cdot R}{(x+R)^2}, \quad (7)$$

где f – потенциал на зарядном электроде; R – радиус острия иглы; x – расстояние от поверхности иглы до частицы.

Поле на поверхности подлетающей проводящей частицы определяется по формуле:

$$E_p = \frac{\beta}{\epsilon_0} (\sigma_i + \sigma_q), \quad (8)$$

где β – коэффициент усиления поля; σ_i – поверхностная плотность заряда, индуцированная на поверхности частицы внешним полем (определяется выражением (2)); σ_q – поверхностная плотность свободного заряда частицы.

Поверхностная плотность свободного заряда частицы определяется по формуле:

$$\sigma_q = -\frac{q_p}{4\pi \cdot r_p^2}. \quad (9)$$

Коэффициент β зависит от формы частицы и состояния её поверхности (наличие сколов, выступов на поверхности). Оценить коэффициент β можно по формуле [3]:

$$\beta = \frac{h}{r_e} + 1, \quad (10)$$

где h – высота выступа; r_e – радиус эмиссии.

Выразим зависимость площади эмиссии S_e от коэффициента усиления поля, при этом будем считать высоту выступа $h \leq 0,5 \cdot r_p$, а конец выступа представляет собой полусферу:

$$S_e = 2\pi \left(\frac{r_p}{2 \cdot (\beta - 1)} \right)^2, \quad (11)$$

где r_p – радиус частицы.

Для определения характерных времён процессов зарядки и величины заряда, получаемого микрочастицей, решим систему уравнений, описывающих движение частицы и изменение её заряда в области иглы зарядного электрода инжектора. При условии, что микрочастица движется вдоль оси иглы зарядного электрода:

$$\left\{ \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \frac{q_p}{m_p} \cdot \vec{E}_{out}, \quad (12) \right.$$

$$\left. \frac{dq_p}{dt} = S_e \cdot j_e, \quad (13) \right.$$

где m_p – масса частицы; x – координата частицы вдоль оси иглы; E_{outx} – вектор напряжённости поля вдоль оси иглы.

Уравнение (12) описывает динамику движением микрочастицы под действием электростатического поля, а уравнение (13) – динамику изменения заряда частицы.

Внешнее поле E_{out} определяется как сумма поля иглы E_n и среднего поля в инжекторе E_m , которое определяется по формуле:

$$E_m = \frac{f}{d}, \quad (14)$$

где f – напряжение на зарядном электроде; d – среднее расстояние между зарядным электродом и заземлённой стенкой зарядной камеры инжектора (при расчётах величина d бралась равной 15 мм).

2. Результаты вычислений

Система уравнений (12)–(13) решалась численными методами с помощью программного пакета Matlab. При решении системы не учитывалось влияние объёмного заряда в промежутке «частица-игла» на величину тока эмиссии электронов. Расчёты проводились для круглых алюминиевых частиц с незначительными дефектами на их поверхности ($\beta=2$) и при напряжении на зарядном электроде $f=25$ кВ.

Рассчитаем максимально возможные значения отношения заряда, полученного частицей в инжекторе, к её массе (q/m) при условии, что частица в начальный момент времени находилась на расстоянии 1 мкм от иглы. Зависимости q/m при бесконтактном механизме зарядки и разных диаметрах зарядной иглы показаны на рис. 1. Зависимости заряда, полученного частицей в инжекторе, к её массе при контактном механизме зарядки и разных диаметрах зарядной иглы показаны на рис. 2.

Как видно из сравнения графиков на рис. 1 и 2, уже при диаметре иглы, равном 33 мкм, частица приобретает заряд боль-

ший, чем при меньшем диаметре в случае контактной зарядки. Дальнейшее уменьшение диаметра иглы приводит к получению частицей максимального заряда, который ограничен возникающей автоионной эмиссией с поверхности микрочастицы при величине напряжённости поля $E_p=10^{10}$ В/м. Таким образом, предложенная модель бесконтактной зарядки позволяет прогнозировать получение значений q/m , намного превосходящих теоретически возможные при контактной зарядке.

Построим зависимость q/m от расстояния до иглы в момент начала автоэлектронной эмиссии с поверхности частиц с радиусом 1 и 3 мкм при нулевой начальной скорости, при напряжении на электроде $f=25$ кВ и диаметре иглы 33 мкм (рис. 3).

Полученная зависимость показывает, что чем ближе микрочастица способна подлететь к поверхности зарядной иглы, тем больший заряд она может получить в процессе бесконтактной зарядки.

Однако бесконтактная зарядка оказывается менее эффективной для частиц с реальными скоростями сближения с зарядной иглой. Для оценки будем считать, что частица получает максимальный заряд внутри зарядной камеры, соприкасаясь со стенками камеры. При этом ближе всего к игле подлетают отрицательно заряженные микрочастицы, получившие свой заряд, коснувшись заземлённой стенки корпуса. Тогда заряд микрочастицы можно оценить по формуле (4), в которую подставляется среднее значение напряжённости электрического поля в камере E_m согласно (14), при этом начальная координата равна d . Зависимость q/m для частиц от их радиуса при различных диаметрах игл показана на рис. 4.

Значения q/m частицы, полученные для частиц с начальными условиями, близкими к реально существующим в инжекторе, в разы меньше максимально возможных (рис. 1). Это означает, что при скоростях движения частиц в инжекторе, которые составляют 30-50 м/с, микрочастица не может приблизиться к игле на

расстояние, при котором плотность тока автоэлектронной эмиссии имеет величину, достаточную для зарядки частицы до относительно большого заряда за время движения частицы от иглы.

Решение системы уравнений (12)–(13) также позволяет определить динамику движения микрочастицы в области зарядной иглы и максимально возможную плотность тока автоэлектронов с

поверхности частицы. При определении максимально возможной плотности тока не учитывалось ограничение тока объемным зарядом в промежутке «частица-игла». На рис. 5 показано изменение плотности тока, на рис. 6 – изменение скорости в зависимости от времени для частицы радиуса 1мкм с начальным зарядом $q_0 = -10^{-17}$ Кл.

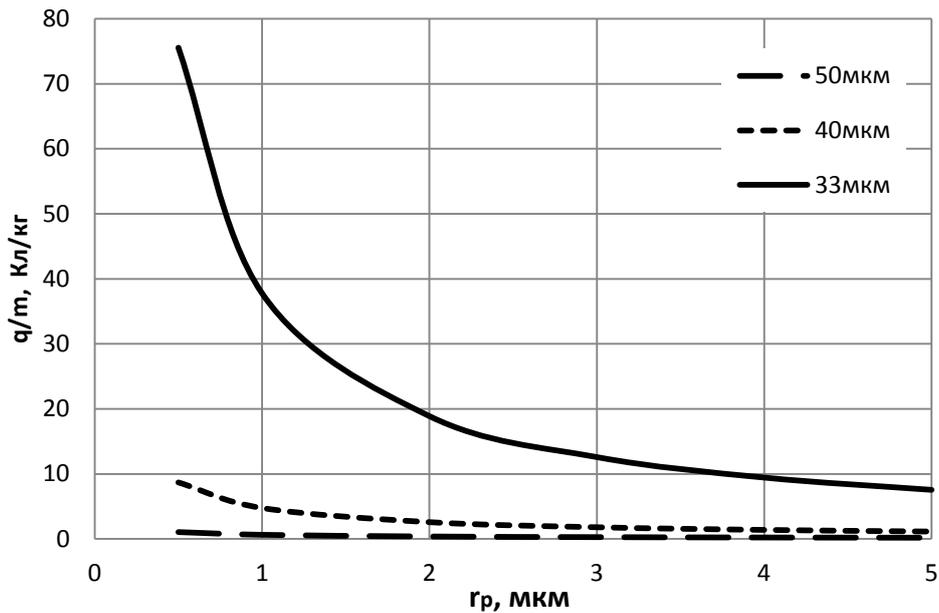


Рис. 1. Зависимости отношения q/m микрочастиц от радиуса при бесконтактном механизме заряда для диаметра иглы 50, 40, 33 мкм

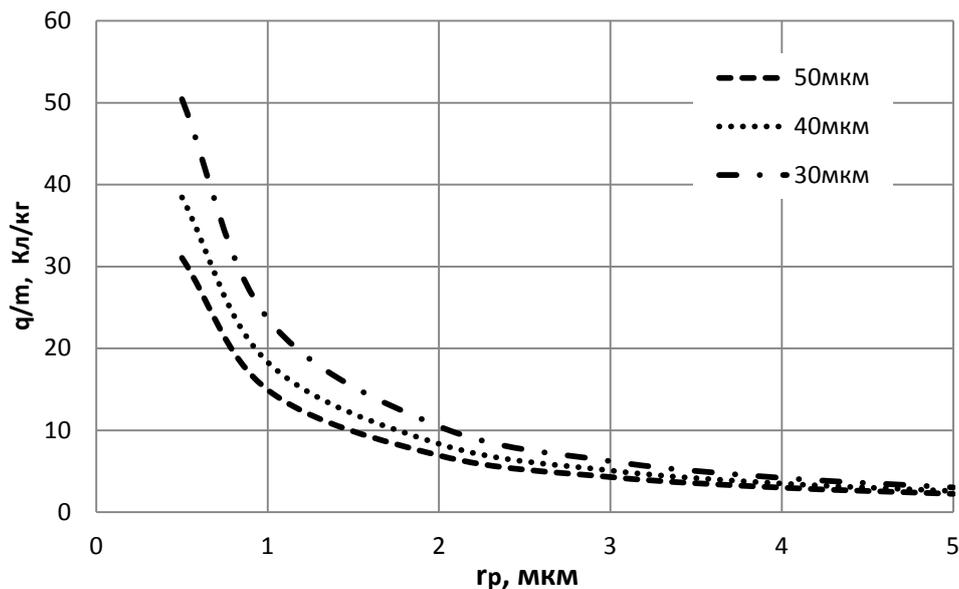


Рис. 2. Зависимости отношения q/m микрочастиц от радиуса при контактном механизме заряда для диаметра иглы 50, 40, 30 мкм

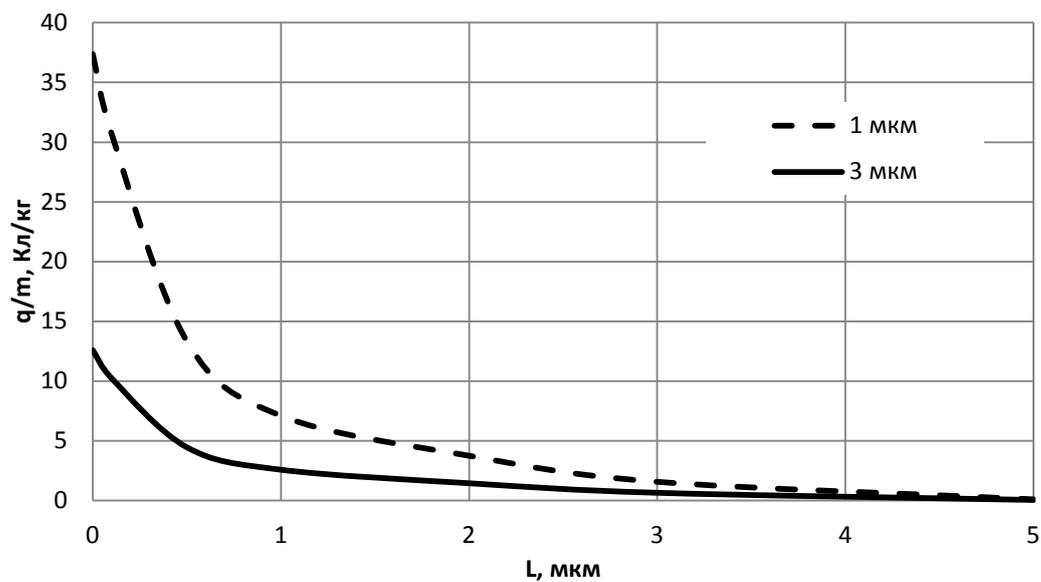


Рис. 3. Зависимости q/m от начальной координаты для частиц с радиусами 1 и 3 мкм

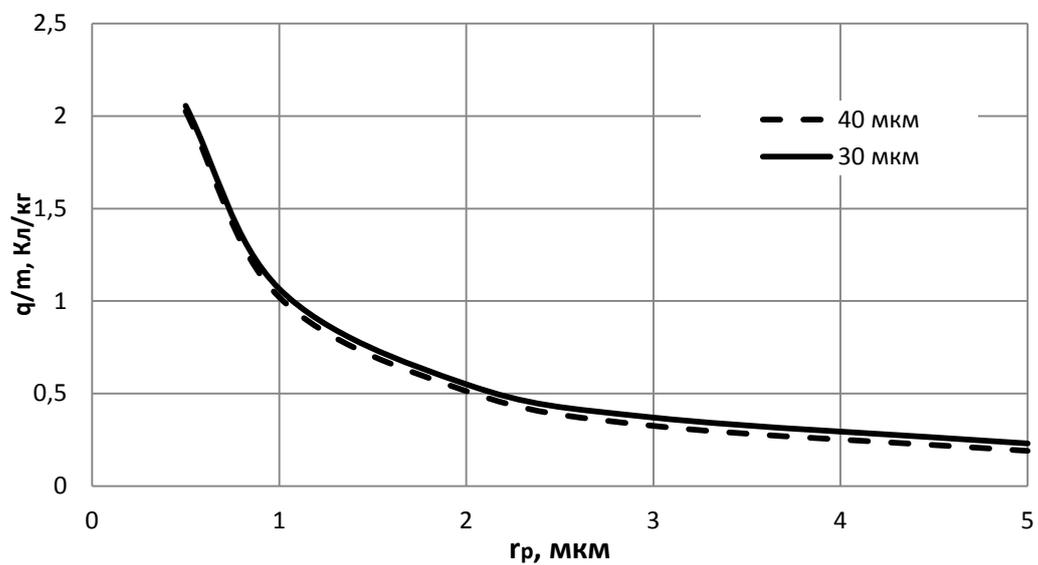


Рис. 4. Зависимости q/m от радиуса частицы для диаметра иглы 40, 30 мкм

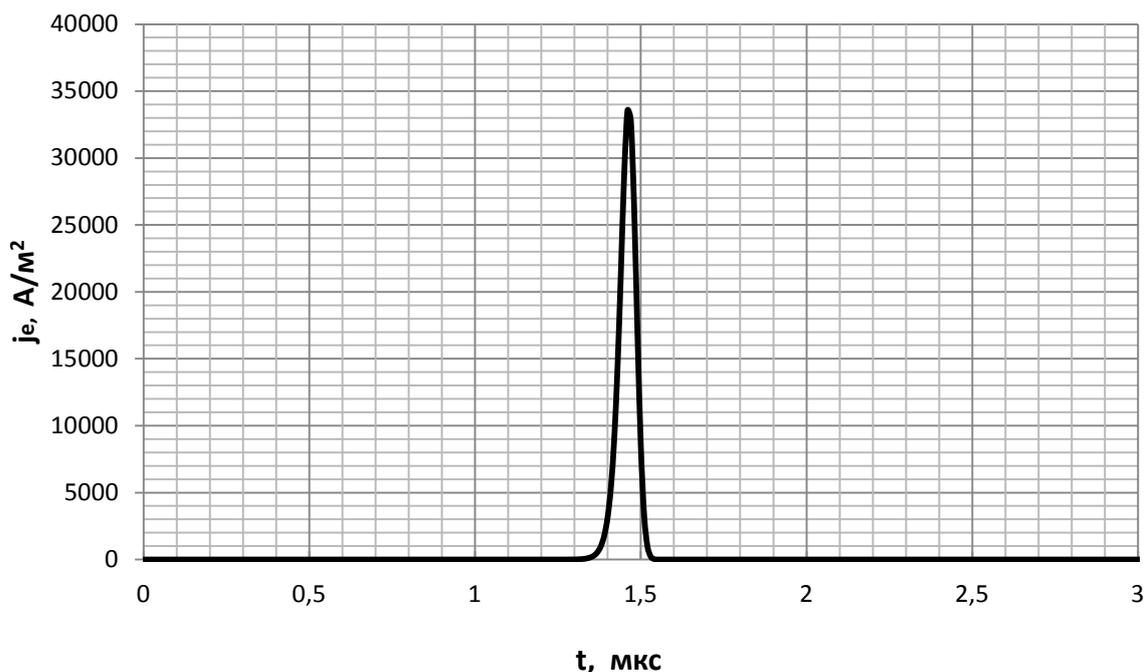


Рис. 5. Зависимость плотности тока автоэлектронной эмиссии от времени

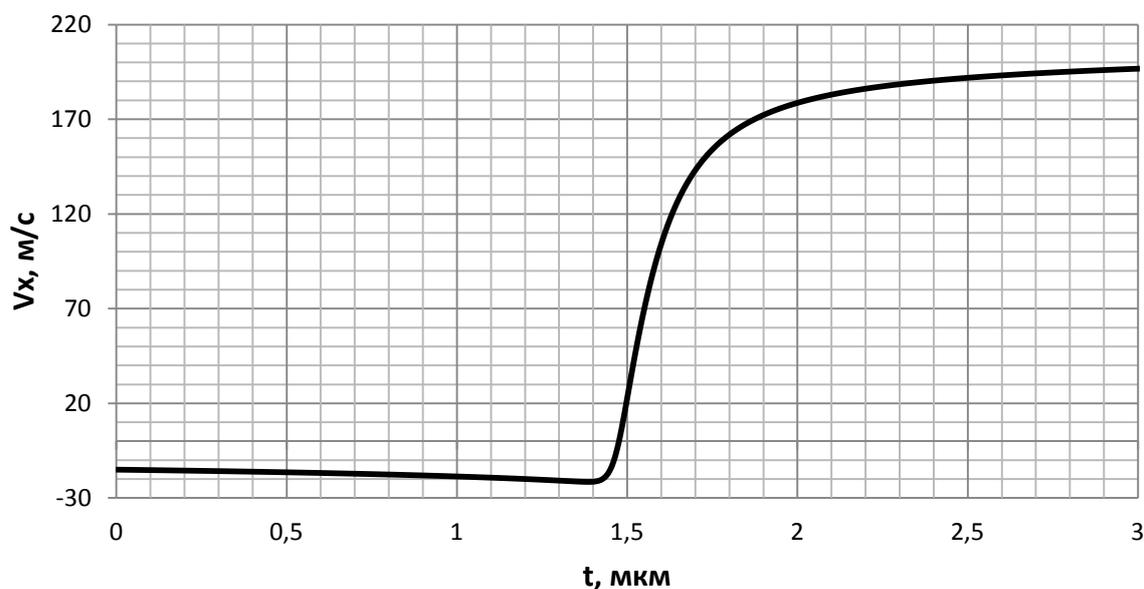


Рис. 6. Зависимость скорости движения частицы от времени

Как видно из графика на рис. 5, время перезарядки частицы составляет $t = 0,1$ мкс, а максимальная плотность тока достигает значений $j_e = 10^4$ A/m^2 . Полученные значения плотности тока, согласно представлениям о взрывной автоэлектронной эмиссии [3], указывают на возможность

испарения части материала микрочастицы и последующей ионизации его паров. Плазма в зазоре «частица-игла» может внести изменения в конечный заряд на микрочастице и в динамику изменения плотности тока автоэлектронной эмиссии за счет объемного заряда ионов в зазоре.

Заключение

С помощью построенной математической модели бесконтактной зарядки микрочастицы в результате автоэлектронной эмиссии определены максимально возможные отношения q/m , которые можно теоретически получить в инжекторе при бесконтактной зарядке. Определён максимальный диаметр иглы (не более 33 мкм), при котором заряд частицы, полученный вследствие автоэлектронной эмиссии, будет превосходить заряд, обусловленный контактной зарядкой.

Полученная зависимость q/m частицы от расстояния до электрода в момент начала автоэлектронной эмиссии показывает возможность получения большего отношения q/m частицы, если на зарядный

электрод подавать импульсное напряжение, т.е. в момент отсутствия поля в инжекторе частица имеет возможность подлететь к игле зарядного электрода на меньшее расстояние, чем в случае постоянного потенциала на зарядном электроде.

Описанная модель позволяет определить максимальную плотность автоэлектронной эмиссии с поверхности частицы, которой вполне достаточно для испарения материала частицы и образования плазмы в промежутке «частица-игла» и участия заряженных частиц плазмы в формировании окончательного заряда частицы. Данное обстоятельство указывает на необходимость расширения представленной модели и введения в неё уравнений динамики плазмы.

Библиографический список

1. Сёмкин, Н.Д., Пияков А.В., Погудин А.П. Эволюция и перспективы развития устройств для моделирования микрометеоритов в лабораторных условиях // Прикладная физика. 2008. № 4. С. 153-163.

2. Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.: Энергия, 1974. 480 с.

3. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.

Информация об авторах

Сёмкин Николай Данилович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: semkin@ssau.ru. Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Видманов Алексей Сергеевич, аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: jkt13@rambler.ru. Область научных интересов: ускорительная техника, космическое приборостроение.

MODELING THE PROCESS OF CHARGING MICROPARTICLES IN THE CHAMBER OF AN ELECTROSTATIC INJECTOR

© 2015 N. D. Syomkin, A. S. Vidmanov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Mechanisms of charging microparticles in the area of the electrostatic injector needle are analyzed in the paper. The main attention is paid to the process of charging the conductive particles due to the emission of electrons from its surface under the influence of strong electrostatic field. A mathematical model of contact and contactless charging of particles is described. The results of solving a system of equations describing the dynamics of charging and the motion of the microparticle in the area of the injector charge needle are presented. The values of the relationship between the microparticle's charge and its mass at the outlet of the electrostatic injector for different diameters of the charging needle and sizes of microparticles are calculated. A comparative analysis of the results of calculating the values of the relationship between the charge of a microparticle and its weight depending on the charging mechanisms and parameters of the microparticles and the charging needle is carried out. The results of calculating the maximum possible values of the relationship between the charge received by the microparticle in the injector and its mass depending on the charging mechanism are presented. The dependence of the values of the relationship between the charge of a particle and its mass on the distance from the needle at the beginning of autoelectronic emission from the particle surface is shown. The values of the relationship between the microparticle's charge and its mass at the outlet of the electrostatic injector for real initial values of the particle velocities and charges in the charging chamber are calculated.

Charging microparticles, accelerator particulate, electrostatic injector, autoelectronic emission.

References

1. Syomkin, N.D., Piyakov A.V., Pogodin A.P. Evolution and prospects of development of devices for modeling the micrometeorites in laboratory conditions. *Applied Physics*. 2008. No. 4. P. 153-163. (In Russ.)
2. Vereshchagin I.P., Levites V.I., Mirzabekyan G.Z., Flank M.M. *Osnovy elektrozodinamiki dispersnykh system* [Fundamentals of electrogasdynamics of disperse systems]. Moscow: Energiya Publ., 1974. 480 p.
3. Mesyats G A., Proskurovsky D.I. *Impul'snyy elektricheskiy razryad v vakuume* [Pulse electric discharge in vacuum]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 256 p.

About the authors

Syomkin Nikolay Danilovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara State Aerospace University. E-mail: semkin@ssau.ru. Area of Research: high-speed impact, mass spectrometry, space device engineering.

Vidmanov Aleksei Sergeevich, post-graduate student, Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara State Aerospace University. E-mail: jkt13@rambler.ru. Area of Research: accelerating equipment, space device engineering.