

УДК 533.98

МОДЕЛЬ ЗАРЯДКИ МИКРОЧАСТИЦЫ РАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМОЙ С УЧЁТОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

© 2015 Н. Д. Сёмкин, А. С. Видманов

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

Проведён анализ разрядного механизма зарядки микрочастицы в зарядной камере инжектора электростатического ускорителя. Рассмотрены процессы возникновения и разлёта разрядной плазмы, которая возникает при подлёте микрочастицы к зарядному электроду. Для определения заряда, полученного частицей в результате микрозаряда, решается задача разлёта многокомпонентной плазмы под действием электростатического поля. Решается система уравнений, описывающая динамику расширения сгустка плазмы, процессы рекомбинации и ионизации, а также учитывающая влияние электростатического поля на ток с поверхности плазменного сгустка. Описанная система дифференциальных уравнений позволяет найти степень ионизации химических компонентов, входящих в плазменный сгусток, а также количество ионов в зависимости от времени и химического состава. Получены зависимости степени ионизации ионов от компонентного состава сгустка плазмы и от напряжения на зарядном электроде. Показана зависимость заряда частицы от напряжения на игле зарядного электрода.

Зарядка микрочастицы; электростатический разряд; разрядная плазма; степень ионизации.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-164-170

Для построения математической модели работы электростатического инжектора [1] и определения параметров потоков частиц необходимо определить заряд частицы, который она приобретает при взаимодействии с зарядным электродом инжектора. Наиболее простой моделью зарядки частиц является контактная модель. В этом случае считается, что частица имеет электрический контакт с электродом [2].

Однако существует ряд экспериментов [3,4], в которых регистрировался мик-

роразряд между электродом и подлетающей к нему частицей. Такой механизм зарядки объясняется возникновением взрывной автоэлектронной эмиссии. В данной работе решается задача определения заряда, получаемого частицей, из решения системы уравнений, описывающей разлёт взрывной плазмы в вакуум в электростатическом поле. Схематическое изображение разряда между частицей и иглой зарядного электрода показано на рис. 1.

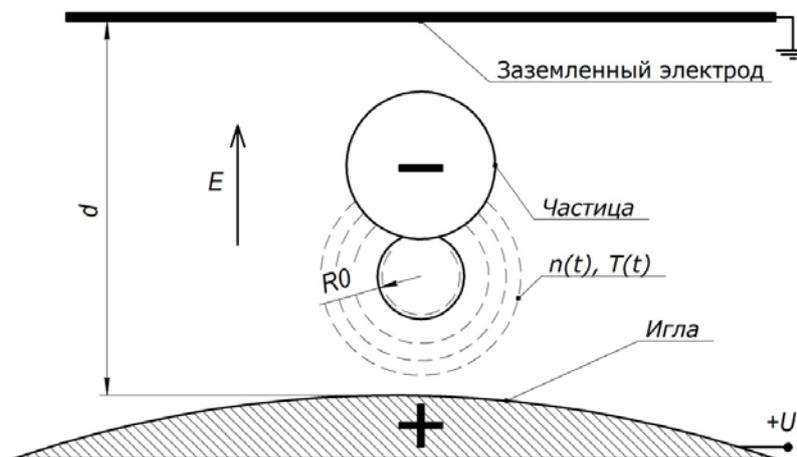


Рис.1. Схематическое изображение разлёта разрядной плазмы

Будем рассматривать плазму, состоящую из k_{\max} компонентов, концентрация которых c_k удовлетворяет условию:

$$\sum_{k=1}^{k_{\max}} c_k = 1. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dx_e}{dt} &= x_e \sum_{k=1}^N c_k ((1-x_{k,1})G_{1,k,0} - x_{k,1}G_{2,k,1}) - \frac{3}{16} \frac{1}{R_0(t/t_0)} th \left(\frac{e(ER - \frac{q}{C})}{2T_e} \right), \\ \frac{dx_k}{dt} &= x_e ((1-x_{k,1})G_{1,k,0} - x_{k,1}G_{2,k,1}), \\ \frac{dT_e}{dt} + 2 \frac{kT_e}{t} &= \frac{\frac{2}{3}E^* + kT_e}{x_e} \left(-\frac{dx_e}{dt} \right) - \frac{T_e - T_i}{\tau_{ei}}, \\ \frac{dT_i}{dt} + 2 \frac{kT_i}{t} &= x_e \frac{T_e - T_i}{\tau_{ei}}, \\ \frac{dq}{dt} &= S j_{i0} \langle u_i \rangle th \left(\frac{e(ER - \frac{q}{C})}{2T_e} \right), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где x_e, x_k – безразмерная концентрация электронов и ионов k -го компонента; T_e, T_i – температура электронов и ионов; E^* – энергия рекомбинации на один акт; k – постоянная Больцмана; c_k – концентрация k -го компонента плазмы; R – радиус плазменного сгустка; R_0 – начальный радиус сгустка; t_0 – начальное время разлёта; q – нескомпенсированный электрический заряд плазмы; e – заряд электрона; j_{i0} – ионный тепловой ток насыщения; S – площадь поверхности сгустка плазмы; E – напряжённость электростатического поля; C – электрическая ёмкость полусферы; u_i – тепловая скорость ионов; $G_{1,k}$ – скорость ионизации; $G_{2,k}$ – суммарная скорость рекомбинации.

Скорость ионизации определяется по формуле [5]:

$$G_{1,k} = 2 \left(\frac{2\pi m_e k}{h} \right)^{-3/2} \frac{T_e^{-3/2}}{n_e} G_{2,k} \exp\left(-\frac{I_{k0}}{T_e}\right), \quad (3)$$

Запишем систему уравнений, описывающую процессы рекомбинации и ионизации в плазме, изменение температуры ионов и электронов, а также учитывающую ток с поверхности плазменного образования [5]:

где m_e – масса электрона; h – постоянная Планка; n_e – концентрация электронов; I_k – потенциал ионизации k -го компонента плазмы.

Суммарная скорость рекомбинации определяется по формуле [5]:

$$G_{2,k} = G_{3,k} + G_{4,k} = 2,7 \cdot 10^{-13} T_e^{-3/2} + \frac{4\pi}{9} \sqrt{2\pi} \frac{e^{10} n_e}{m_e^{1/2} T_e^{9/2}}, \quad (4)$$

где $G_{3,k}$ – скорость фоторекомбинации на все уровни; $G_{4,k}$ – скорость тройной рекомбинации.

Образовавшийся плазменный сгусток начинает расширяться с постоянной, экспериментально определяемой скоростью $U_0 \approx 2 \cdot 10^6$ см/с, слабо зависящей от напряжённости поля в промежутке [6].

При этом концентрация плазмы может достигать значений $n_0 \approx 10^{21}$ см⁻³ [7].

Закон расширения плазмы, учитывая автомодельность разлёта, запишем в виде [8]:

$$R = R_0 \cdot \frac{t}{t_0}, \quad (5)$$

где R_0 – начальный размер плазменного сгустка; $t_0 = U_0/R_0$, $t \geq t_0$ – время разлёта плазмы.

Начальный размер плазменного сгустка будем считать равным радиусу частицы: $R_0 \approx 5 \div 10 \mu\text{м}$.

Объём расширяющегося плазменного сгустка и его радиус связаны кубической зависимостью, поэтому изменение объёма во времени определяется следующим соотношением:

$$V = V_0 \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^3, \quad (6)$$

где V_0 – начальный объём плазмы.

За начальную температуру разлетающейся плазмы примем температуру взрывной автоэлектронной эмиссии: $T_{e0} \approx T_{k0} \approx 1 \div 3 \text{ эВ}$, которая определялась экспериментально [6].

Для упрощения определения начальных степеней ионизации считаем, что в момент времени t_0 плазма находится в квазинейтральном состоянии. В этом случае степень ионизации однократно ионизированной k -го компонента плазмы можно рассчитать по уравнению Саха-Ленгмюра [9]:

$$x_{k0} = \frac{C \cdot T_{k0}^{\frac{3}{2}}}{n_{k0}} \cdot \exp\left(-\frac{I_k}{T_{k0}}\right), \quad (7)$$

где n_{k0} – концентрация k -го компонента плазмы, $C = 6,06 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3} (\text{эВ})^{-3/2}$.

Начальную степень ионизации электронов с учётом (1) можно выразить через следующую сумму:

$$x_{e0} = \sum_{k=1}^{k_{\max}} c_k x_{k0}. \quad (8)$$

Напряжённость внешнего электрического поля вблизи зарядной иглы будем определять по известной формуле напряжённости электрического поля вдоль оси игольчатого электрода, имеющего форму гиперboloида вращения, для системы электродов «игла–плоскость» [10]:

$$E = \frac{2U}{R \cdot \ln\left(\frac{4d}{R_N}\right)}, \quad (9)$$

где U – разность потенциалов; R_N – радиус закругления острия иглы; d – межэлектродное расстояние.

Изменение степени ионизации плазмы x_i от относительного времени t/t_0 для различного химического состава плазмы, приведённого в табл. 1, при напряжении на электроде $U = 10 \text{ кВ}$ показано на рис. 2.

Таблица 1. Химический состав плазмы

Концентрация химических элементов, %							
№	К	Н	Al	Fe	Na	Si	O
1	4	0,05	88,925	5	1	1	0,025
2	4	0,05	1,5	91	1,2	2	0,25
3	4	0,05	1,5	2	1	91,2	0,25

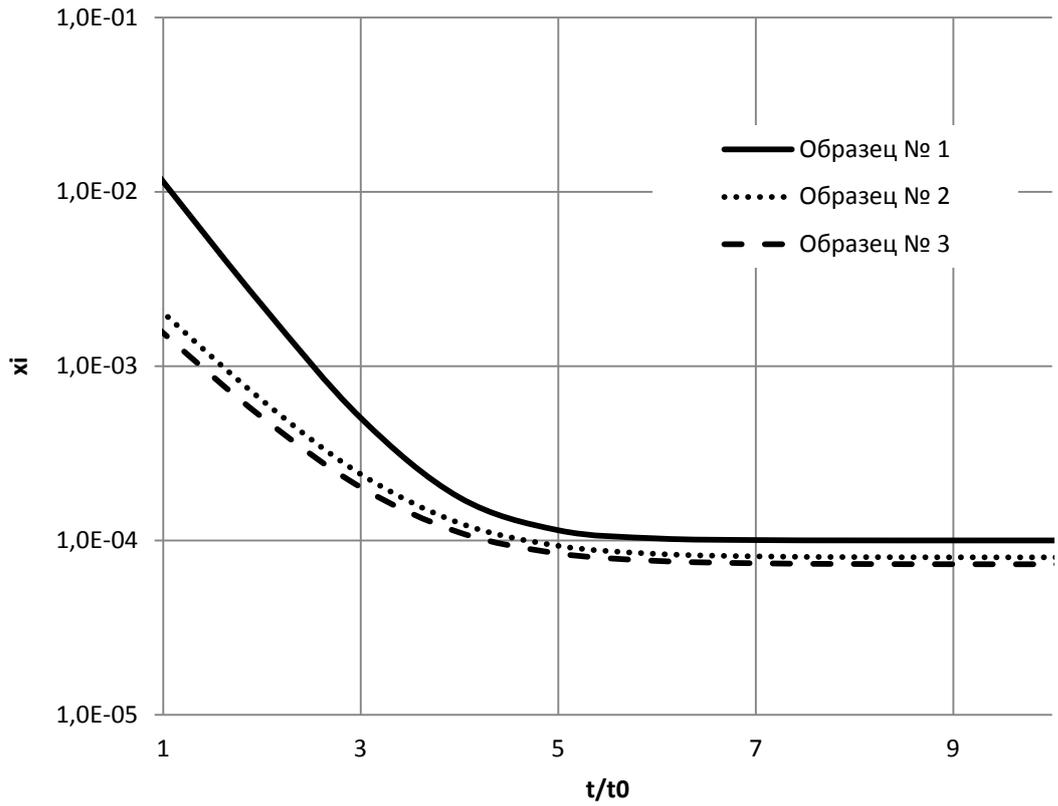


Рис. 2. Зависимость степени ионизации ионов от времени

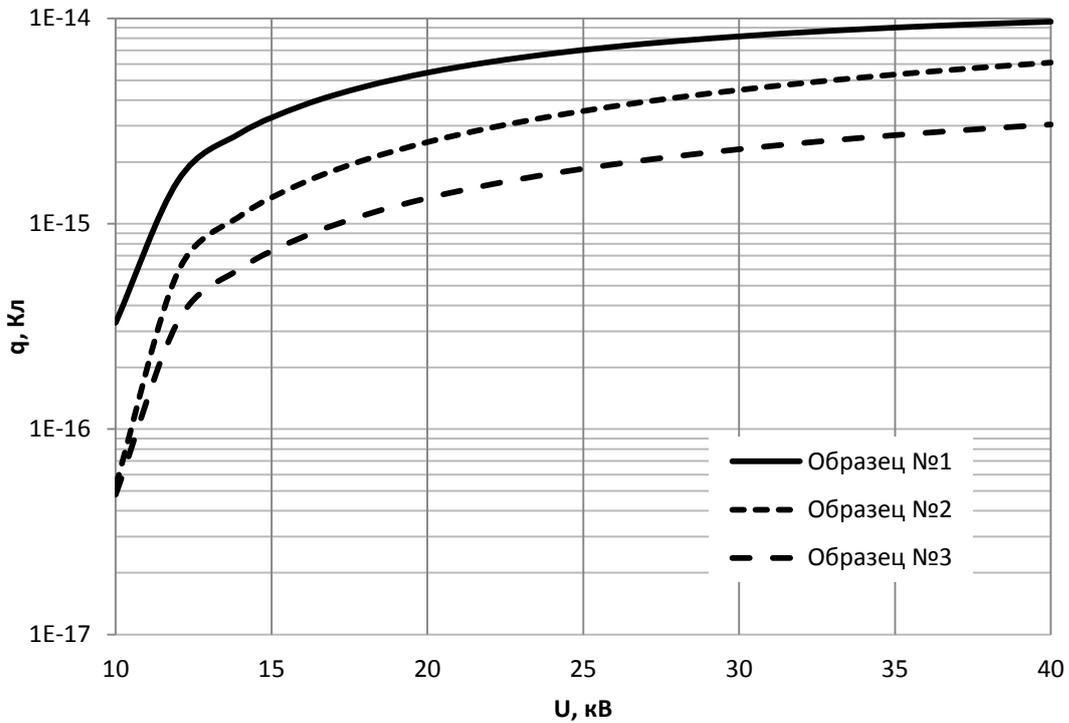


Рис. 3. Зависимость заряда частиц от напряжения на зарядном электроде

Как видно из графиков на рис. 2, происходит так называемая «закалка» плазмы [7], при этом степень ионизации перестаёт изменяться и асимптотически стремится к значению $x_{i\infty}$. Это говорит о прекращении процессов рекомбинации и ионизации в сгустке плазмы вследствие её расширения.

Для определения заряда, полученного частицей в результате микрозаряда, будем считать, что все ионы после «закалки» попадают на частицу:

$$q = ex_{\infty} n_0 V_0. \quad (10)$$

Зависимость заряда частицы q от напряжения на зарядном электроде U и от состава разрядной плазмы показано на рис. 3.

Проведённые расчёты показывают, что электрическое поле в зазоре уменьшает время «закалки» плазмы, что увеличивает количество ионов, осевших на частицу в результате микрозаряда. Незначительное влияние на конечный заряд оказывает состав плазмы. Сравнение результатов расчёта для трёх образцов показывает, что частица приобретает больший заряд, если в состав плазмы разряда входят компоненты с меньшим потенциалом ионизации.

Библиографический список

1. Сёмкин 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.
2. Акишин А.И., Новиков Л.С. Методика и оборудование имитационных испытаний материалов космических аппаратов. М.: Московский университет, 1990. 90 с.
3. Пошехонов П.В., Погорельский М.М. Инициирование вакуумного пробоя металлическими частицами // ЖТФ. 1969. Т. 39, № 6. С. 1080-1085.
4. Мартынов Е.П., Иванов В.А. Микрозаряд проводящих частиц и пробой вакуумного промежутка // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14, № 11. С. 2005-2010.
5. Держиев В.И., Захаров А.Ю. Кинетика ионизации и рекомбинации в разлетающемся плазменном сгустке. М.: Институт прикладной математики АН СССР, 1978. 45 с.
6. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
7. Бугаев С.П., Литвинов Е.В., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Взрывная эмиссия электронов // Успехи физических наук. 1975. Т. 115, № 1. С. 101-120. doi: 10.3367/UFNr.0115.197501d.0101
8. Зельдович А.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
9. Сёмкин Н.Д., Воронов К.Е., Новиков Л.С. Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2005. 470 с.
10. Резвых К.А. Расчёт электростатических полей в аппаратуре высокого напряжения. М.: Энергия, 1967. 120 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.

A MODEL OF CHARGING MICROPARTICLES BY DISCHARGE PLASMA WITH ACCOUNT FOR THE ELECTROSTATIC FIELD

© 2015 N. D. Semkin, A. S. Vidmanov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The discharge mechanism of charging microparticles in the charge case of the injector of an electrostatic accelerator is analyzed. The processes of origination and spread of the plasma discharge that occurs as the microparticle approaches the charging electrode are discussed. To determine the charge of the particles obtained as a result of microdischarge the problem of expansion of multi-component plasma under the influence of an electrostatic field is solved. A system of equations that describe the dynamics of the expanding plasma bunch, ionization and recombination processes, taking into account the influence of the electrostatic field on the plasmoid surface current, is solved. The described system of differential equations makes it possible to find the degree of ionization of chemical elements contained in the plasma bunch and the amount of ions as a function of time and chemical composition. The dependences of the degree of ionization of ions on the composition of the plasma bunch and the voltage on the charging electrode are obtained. The dependence of the particle charge on the voltage of the needle electrode is shown.

Charging microparticles; electrostatic discharge; discharge plasma; the degree of ionization.

References

1. Semkin N.D., Piyakov A.V., Voronov K.E., Shepelev S.M., Bogoyavlenskii N.L. A charged dust particle injector. *Instruments and Experimental Techniques*. 2006. V. 49, no. 3. P. 440-445. doi: 10.1134/s0020441206030262
2. Akishin A.I., Novikov L.S. *Metodika i oborudovanie imitatsionnykh ispytaniy materialov kosmicheskikh apparatov* [Methods and equipment for simulation testing of spacecraft materials]. Moscow: Moscow University Publ., 1990. 90 p.
3. Poshekhonov P.V., Pogorelsky M.M. The initiation of vacuum breakdown of metal particles. *Technical Physics*. 1969. V. 39, no. 6. P. 1080-1085.
4. Martynov E.P., Ivanov V.A. Microdischarges conductive particles and the breakdown of the vacuum gap. *Soviet Journal of Communications Technology and Electronics*. 1969. № 11. P. 2005-2010.
5. Derzhiev V.I., Zakharov A.Yu. *Kinetika ionizatsii i rekombinatsii v razletayushchemsya plazmennom sgustke*. [Kinetics of ionization and recombination in the expanding plasma bunch]. Moscow: Institute of Applied Math. USSR Academy of Sciences Publ., 1978. 45 p.
6. Mesyats G.A., Proskurovsky D.I. *Impul'snyy elektricheskiy razryad v vakuume* [Pulsed electric discharge in vacuum]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984. 256 p.
7. Bugaev S.P., Litvinov E.V., Mesyats G.A., Proskurovsky D.I. Explosive emission of electrons. *Soviet Physics Uspekhi*. 1975. V. 18, no. 1. P. 51-61. doi: 10.1070/PU1975v018n01ABEH004693

About the authors

Semkin Nikolay Danilovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. 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, Samara, Russian Federation. E-mail: jkt13@rambler.ru. Area of Research: accelerating equipment, space device engineering.