

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАРЯДКИ МИКРОЧАСТИЦ В КАМЕРЕ ИНЖЕКТОРА

Для проведения экспериментов по изучению физики высокоскоростного удара широко используются 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].

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

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

При контактном механизме зарядки частица приобретает заряд, соприкасаясь с зарядным электродом. В общем случае заряд проводящей частицы вычисляется по формуле:

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

где  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда,  $S$  – площадь поверхности частицы.

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

$$\sigma_i = -3E_{out} \cdot \epsilon_0 \cdot \cos\theta, \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол между нормалью к поверхности и вектором напряженности внешнего поля,  $E_{out}$  – модуль напряженности внешнего поля,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

Для упрощения расчета 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:

$$q = -3\pi \cdot E_{out} \cdot \epsilon_0 \cdot r_p^2, \quad (3)$$

где  $r_p$  – радиус микрочастицы.

Бесконтактная зарядка частицы вблизи иглы зарядного электрода инжектора 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 напряженности поля при сближении частицы и электрода. Интенсивная автоэлектронная эмиссия с ее поверхности способна вызвать разогрев и испарение части материала частицы или электрода. Образовавшийся пар, состоящий из атомов испаренного 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;  $S_e, S_i$  – 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 к возникновению разряда.

На первом этапе моделирования движения частицы в области иглы рассмотрим процесс зарядки микрочастицы только в результате автоэлектронной эмиссии с ее 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 напряженности электрического поля на поверхности частицы и описывается уравнением Фаулера-Нордгейма [3]:

$$j_e = \frac{1,54 \cdot 10^{-6}}{t^2(y)} E_p^2 \varphi^{-1} \exp \left[ \frac{6,83 \cdot 10^9 \varphi^{1,5}}{E_p} \Theta(y) \right], \quad (4)$$

где  $\Theta(y)$  – функция Нордгейма;  $E_p$  – напряженность поля на поверхности частицы;  $\varphi$  – работа выхода материала (эВ);

$$y = 3,79 \cdot 10^{-5} E_p^{-0,5} \varphi^{-1};$$

$$t(y) = 1,041 + 1,095 y;$$

$$\Theta(y) = 0,93 - 0,966 \cdot y^2.$$

Для расчета будем использовать упрощенную формулу:

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

где  $j_e$ ,  $E_{out}$ ,  $\varphi$  измеряются в  $A/m^2$ ,  $V/m$  и  $эВ$ , соответственно.

Для упрощения расчетов и из-за неопределенности формы острия иглы зарядного электрода поле у поверхности иглы будем представлять как поле шара, отстоявшего от зарядного электрода на расстоянии, равном длине иглы, и с радиусом, равным радиусу кривизны острия иглы. Для проведения расчетов выберем радиус иглы равным 10-50 мкм. Напряженность поля на оси иглы определяется выражением:

$$E_n = \frac{f \cdot R}{(x+R)^2}, \quad (6)$$

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

Поле на поверхности подлетающей проводящей частицы определяется как

$$E_p = \frac{\beta}{\epsilon_0} (\sigma_i + \sigma_q), \quad (7)$$

где  $\beta$  – коэффициент усиления поля,  $\sigma_i$  – поверхностная плотность заряда, индуцированная на поверхности частицы внешним полем (определяется выражением (2)),  $\sigma_q$  – поверхностная плотность свободного заряда частицы.

Поверхностная плотность свободного заряда частицы определяется по формуле:

$$\sigma_q = -\frac{q_p}{4\pi \cdot r_p^2}. \quad (8)$$

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

$$\beta = \frac{h}{r_e} + 1, \quad (9)$$

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 – полусферой:

$$S_e = 2\pi \left( \frac{r_p}{2(\beta+1)} \right)^2. \quad (10)$$

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

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V_x, \\ \frac{dV_x}{dt} = \frac{q_p}{m_p} \cdot E_{out}, \\ \frac{dq_p}{dt} = S_e \cdot j_e; \end{cases} \quad (11)$$

где  $m_p$  – масса частицы,  $V_x$  – скорость вдоль оси иглы.

Внешнее поле  $E_{out}$  определяется как сумма поля иглы  $E_n$  и среднего поля в инжекторе  $E_m$ , которое определяется как отношение потенциала на зарядном электроде  $f$  и расстояния от зарядного электрода до заземленного электрода зарядной камеры инжектора.

Система (11) решалась с помощью программного пакета Matlab. Расчеты проводились для круглых алюминиевых частиц при напряжении на зарядном электроде  $f = 25$  кВ. Рассчитывались максимально возможные значения отношения заряда, полученного частицей в инжекторе, к ее массе при условии, что частица приближалась к электроду на расстояние менее 1 мкм. Зависимость заряда, полученного частицей в инжекторе, к ее массе при контактном механизме зарядки и разных диаметрах зарядной иглы показаны на рисунке 1 .

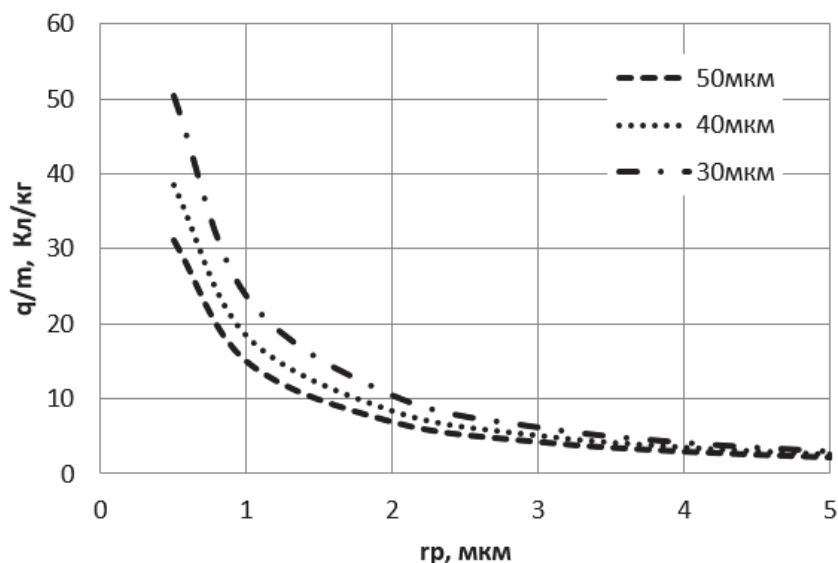


Рисунок 1 – Зависимость отношения  $q/m$  микрочастиц от радиуса при контактном механизме зарядки

Зависимости отношения заряда, полученного частицей в инжекторе, к ее массе при бесконтактном механизме зарядки и разных диаметрах зарядной иглы показаны на рисунке 2.

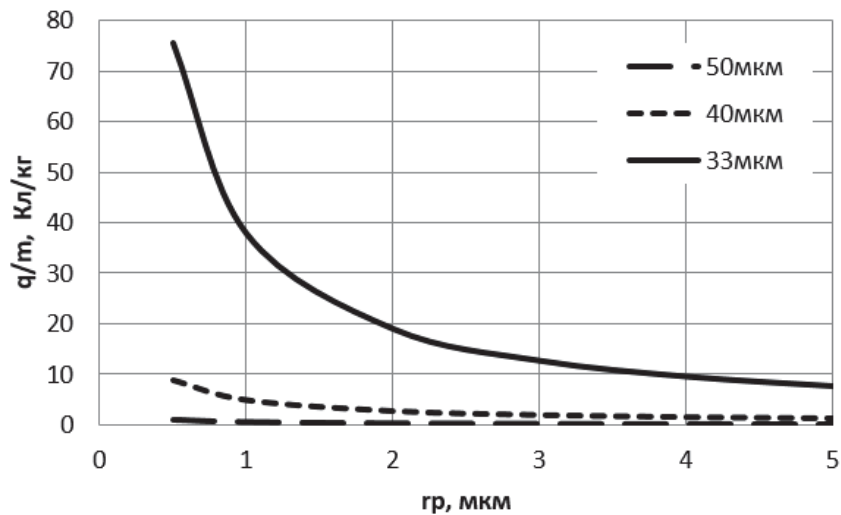


Рисунок 2 – Зависимость отношения  $q/m$  микрочастиц от радиуса при бесконтактном механизме зарядки

Как видно из рисунка 2, уже при диаметре иглы, равном 33 мкм, частица приобретает заряд больший, 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 напряженности поля  $E_p = 10^{10}$  В/м. Таким образом, предложенный анализ бесконтактной зарядки позволяет прогнозировать получение значений  $q/m$ , намного превосходящих значения, теоретически возможные при контактной зарядке.

#### Библиографический список

- 1 Семкин, Н. Д. Эволюция и перспективы развития устройств для моделирования микрометеоритов в лабораторных условиях [Текст] / Н. Д. Семкин, А. В. Пияков, А. П. Погосин // Прикладная физика. – 2008 – №4 – С. 153 -163.
- 2 Верещагин И. П. Основы электрогазодинамики дисперсных систем [Текст] / И.П. Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян, М.М. Пашин. – М.: Энергия, 1974. – 480 с.
- 3 Месяц Г.А. Импульсный электрический разряд в вакууме [Текст] / Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский. – Новосибирск: Наука, 1984. – 256 с.