

УДК 621.389

МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ МИКРОЧАСТИЦЫ С ЗАРЯДНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ИНЖЕКТОРА И МИШЕНЬЮ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

© 2013 Н. Д. Сёмкин, А. С. Видманов, В. В. Брагин

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

Рассмотрен механизм взаимодействия заряженной микрочастицы с мишенью масс-спектрометра. Приведены экспериментальные данные измерения параметров потока ионов при высокоскоростном ударе заряженной частицы. Проведена оценка вклада потенциальной и кинетической энергии микрочастицы в ионизацию вещества мишени масс-спектрометра.

Зарядка микрочастицы, инжектор, высокоскоростной удар, масс-спектрометр, ионизация вещества.

Введение

Для проведения экспериментов по изучению высокоскоростного удара широкое применение получили ускорители, использующие для разгона частиц постоянное или переменное электрическое поле. Неотъемлемой частью ускорительной системы является инжектор (генератор)

пылевых частиц. Основная задача инжектора заключается в зарядке частиц до максимального значения. Существует множество различных конструкций инжекторов твёрдых заряженных частиц [1, 2]. Наиболее эффективными считаются инжекторы контактного типа (рис. 1).

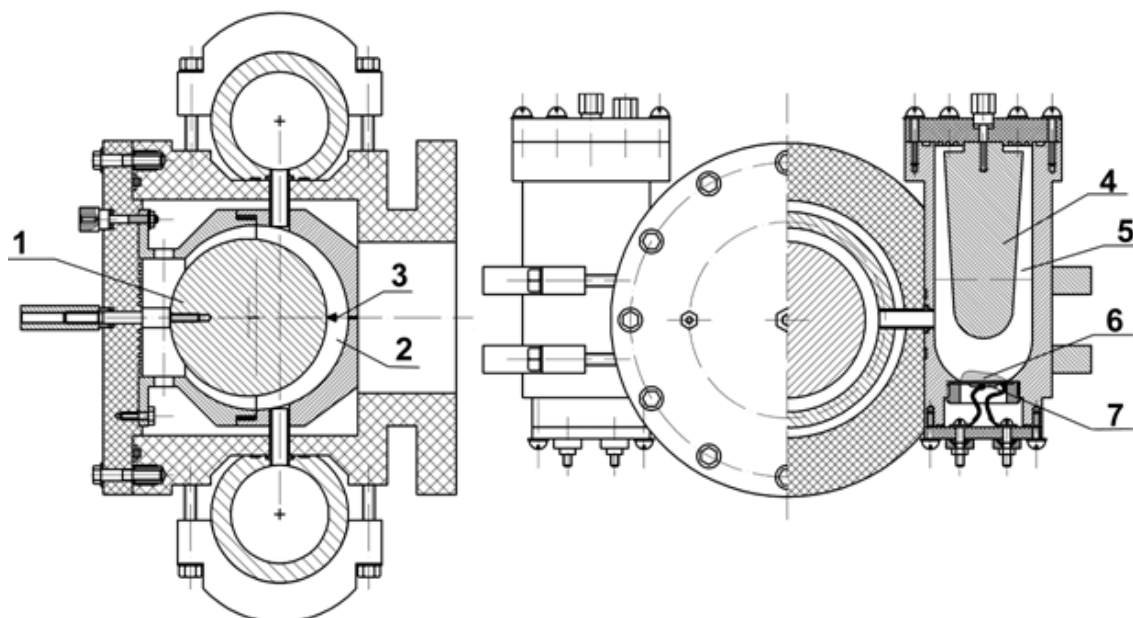


Рис. 1. Конструкция инжектора:

1 – зарядный электрод, 2 – зарядная камера, 3 – игла или «метёлка», 4 – бункерный электрод, 5 – бункерная камера, 6 – микропорошок, 7 – пьезоизлучатель

В подобных инжекторах микрочастица заряжается посредством контакта с зарядным электродом, который выполнен в виде иглы или «метёлки», а также через плазму. Максимальный заряд частицы ограничен токами автоэлектронной или автоионной эмиссии. Так, положительно

заряженная частица может иметь максимальную напряжённость 10^{10} В/м, а отрицательно заряженная частица – 10^9 В/м.

Эксперимент проводился на электродинамическом ускорителе, схема которого показана на рис. 2 [3].

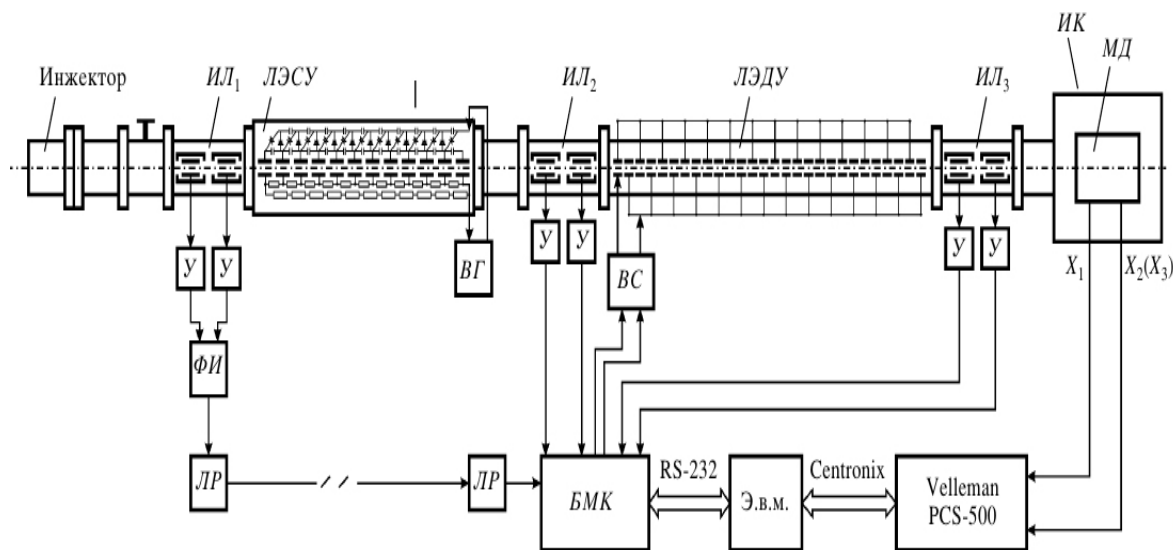


Рис.2. Схема электродинамического ускорителя:

ИЛ1-ИЛ3 – измерительные линейки; У – усилитель; ФИ – формирователь импульса; ЛР – лазерная развязка; ВУ – высоковольтный усилитель; ВГ – высоковольтный генератор; БМК – блок микроконтроллера; Velleman PCS-500 – осциллографическая приставка; ИК – исследовательская камера; МД – многопараметрический датчик; ЛЭСУ – линейный электростатический ускоритель, ЛЭДУ – линейный электродинамический ускоритель

В ходе экспериментов с инжектором [1] была получена зависимость величины удельного заряда микрочастицы от её массы (рис. 3).

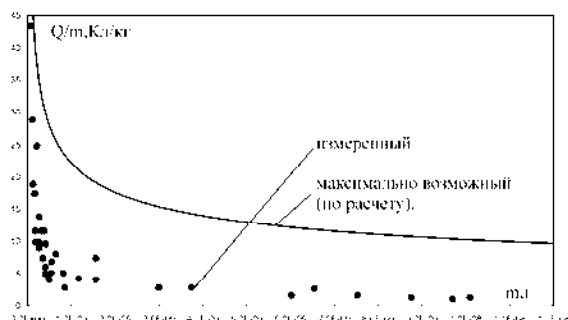


Рис. 3. Результаты измерения удельного заряда

Как видно из рисунка, заряд на частице не достигает максимально возмож-

ного значения. Это может быть связано с характером взаимодействия частиц с зарядным электродом. Процесс зарядки микрочастицы может происходить через электрический пробой между иглой и поверхностью частицы. Процессы ионизации вещества изучаются с помощью ионизационных датчиков или пылеударных масс-спектрометров [4].

1. Методика проведения эксперимента

Эксперименты проводились с использованием пылеударного масс-спектрометра, конструкция которого показана на рис. 4. В эксперименте была использована смесь частиц Al и Cr. При ускоряющем напряжении ускорителя

$U_{yc}=120$ кВ скорости частиц лежали в диапазоне от $146 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ до $3,2 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ при массах от $4,1\cdot 10^{-15}$ кг до $6,1\cdot 10^{-11}$ кг.

Датчик состоит из ниобиевой мишени 1; ускоряющей сетки 2; фокусирующего зеркала 3; «мягкого» рефлектрона 4; «жесткого» рефлектрона 2, 9; приёмников ионов 5. Микрочастицы попадают в прибор через торец «мягкого» рефлектрона. Направление вектора скорости примерно совпадает с осью датчика.

При ударе частицы о мишень 1 образуется плазма, положительный компонент которой выбрасывается полем системы «мишень – ускоряющая сетка». «Мягкий» рефлектрон служит для фокусирования во времени, а «жесткий» рефлектрон компенсирует начальный временной разброс ионов, который получается за счёт их начального энергетического распределения в ускоряющем поле. Приёмник 5 представляет собой четыре вторично-электронных умножителя типа ВЭУ-6, соединённых параллельно. Расстояние от ускоряющей сетки до мишени составляет $8\cdot 10^{-3}$ м. Длина безполевого участка – $0,55$ м, «мягкого» рефлектрона – $0,205$ м, «жесткого» – $4\cdot 10^{-3}$ м. После приёмника 5 сигнал через эмиттерный повторитель 7 попадает на запоминающий осциллограф 8. Сигнал мишени через усилитель 6 подаётся на второй вход осциллографа.

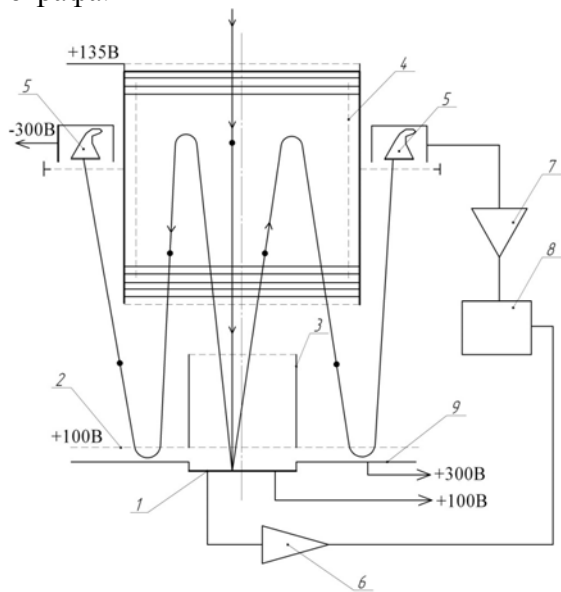


Рис. 4. Блок-схема масс-спектрометра

Скорость частицы определялась по длительности переднего фронта импульса мишени:

$$V_u = \frac{l_M}{t_{nn}}, \tag{1}$$

где $l_M = 8\cdot 10^{-3}$ м – расстояние от ускоряющей сетки до мишени, t_{nn} – длительность переднего фронта импульса мишени.

Эквивалентная схема мишени представлена на рис. 5, где $C_{эКВ}$ – сумма монтажной ёмкости мишени и входной ёмкости усилителя, $R_{вХ}$ – входное сопротивление усилителя. Величина ёмкости вычислялась по известным $R_{вХ} = 120$ кОм и $t_M = 8,5$ мкс: $C_{эКВ} = t_M / R_{вХ} = 71$ пф.

Наведённый ток от заряженной микрочастицы, согласно эквивалентной схеме на рис. 4, описывается выражением:

$$C \frac{dU_c}{dt} + \frac{U_c}{R} - I_u(t) = 0 \tag{2}$$

с начальными условиями: $t = 0; U_c = 0$.

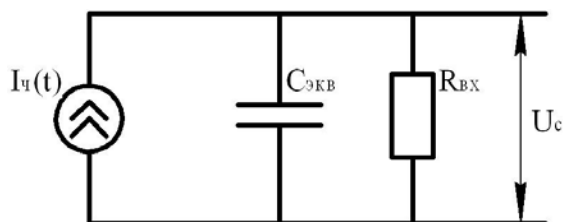


Рис. 5. Эквивалентная схема измерения сигнала с мишени

В случае, когда система «мишень – ускоряющая сетка» представляет собой плоский конденсатор, $I_u(t)$ будет постоянной величиной (штриховая линия на рис. 6):

$$I_u(t) = \frac{Q_u \cdot V_u}{l_M}, \tag{3}$$

где Q_u – заряд частицы; V_u – скорость частицы.

Решением уравнения (2) будет выражение:

$$U_c(t) = U_0 \left(1 - \exp \left(- \frac{t}{R_{вх} \times C_{эКВ}} \right) \right), \quad (4)$$

где $U_0 = \frac{Q_ч \cdot V_ч \cdot R_{вх}}{I_M}$.

Вид U_c для этого случая показан на рис. 6 (штриховая линия). В течение времени t_1, t_2 происходит взаимодействие частицы с мишенью с образованием плазмы. Поле мишени разделяет её на электронный и ионный компоненты. Ионный компонент выбрасывается полем мишени за пределы системы «мишень–ускоряющая сетка», а электронный компонент остаётся на мишени. Это равносильно созданию ионного тока, противоположно направленного к наведённому току, что приводит к образованию характерной ступени на заднем фронте наведённого на мишени сигнала. Схематично это изображено на рис. 6.

Характер взаимодействия частицы с мишенью является сложным процессом и зависит от многих параметров. Наиболее существенными параметрами являются заряд и скорость частицы, масса и геометрическая форма частицы, материалы и плотности частицы и мишени, рельеф мишени в точке контакта.

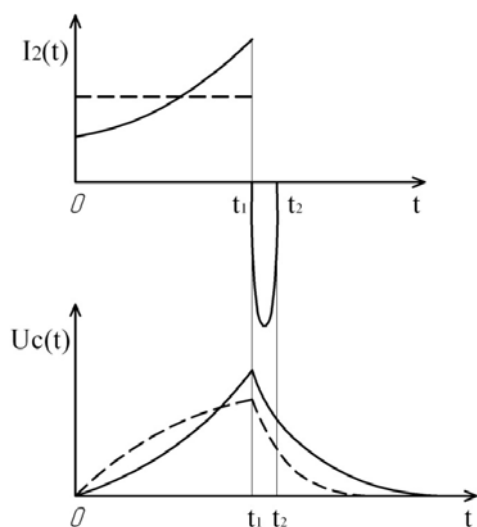


Рис. 6. Временная зависимость наведённых пылевой частицей тока и напряжения на мишени

Так как время нейтрализации электронного компонента плазмы положительного заряда ёмкости $C_{эКВ}$ значительно меньше $t_M = R_{вх} \times C_{эКВ}$, то

$$Q_{пл} = \frac{\Delta U_M \cdot C_{эКВ}}{K_{ус}}, \quad (5)$$

где $Q_{пл}$ – величина эмитированного ионного заряда; ΔU_M – величина отрицательного скачка на заднем фронте импульса мишени; $K_{ус}$ – коэффициент усиления. В результате экспериментов было установлено, что обычно при наблюдаемых скоростях и зарядах частиц $Q_{пл} = 0,01 \cdot Q_ч$.

После окончания процессов взаимодействия частицы с мишенью $[t_2; \infty]$ $I_ч(t)=0$, и поэтому $C_{эКВ}$ разряжается с постоянной времени t_M :

$$U_c(t) = U_c(t_2) \exp \left(- \frac{t_2 - t}{t_M} \right). \quad (6)$$

Так как система «мишень – ускоряющая сетка» имеет более сложный характер поля, чем поле плоского конденсатора, то реальная форма импульса будет несколько отличаться от описанной выше (рис. 6, сплошная линия).

Таким образом, по одному импульсу мишени можно определить: по переднему фронту импульса – скорость частицы; по ступени на заднем фронте импульса – количество эмитированного заряда; по амплитуде импульса – заряд частицы.

Зная $V_ч, Q_ч, U_ч$, можно вычислить массу частицы:

$$m_ч = \frac{Q_ч \times 2U_ч}{V_ч^2}. \quad (7)$$

Оценить количество ионов в спектре можно по следующей формуле:

$$n_{и} = \frac{\sum_{i=t}^k U_i}{U_1}, \quad (8)$$

где n_i – количество ионов в спектре; k – количество масс (импульсов) в спектре; U_i – амплитуда i -го импульса; U_I – амплитуда импульса, соответствующего одному иону. Экспериментально установлено, что одиночный ион с энергией 40 эВ вызывает на выходе приёмника сигнал, равный 20-40 мВ по амплитуде, и поэтому в расчётах U_I принималось равным 30 мВ.

Таким образом, использование масс-спектрометра позволяет измерить основные характеристики микрочастицы (V_c , Q_c , U_c , m_c), а также количество ионов, возникающих при взаимодействии заряженной частицы с мишенью.

2. Механизм взаимодействия заряженной частицы с мишенью

О характере взаимодействия движущейся заряженной частицы с металлической мишенью можно судить по зависимости количества зарегистрированных ионов в спектре плазмы от параметров частицы (Q_c , V_c , m_c). Различают два вида взаимодействия частицы с мишенью: ударный и разрядный. Ударный механизм характеризуется ионизацией вещества мишени за счёт кинетической энергии частицы. Разрядный механизм характеризуется образованием ионизованного газа в результате электрического разряда между заряженной микрочастицей и поверхностью мишени, которая находится под электрическим потенциалом.

Детальный расчёт заряда, образованного при взаимодействии частиц с металлической мишенью, в условиях большой неопределённости эксперимента является неоправданным превышением точности, и поэтому в дальнейшем ограничимся оценочными расчётами.

Массу и температуру катодного факела найдём по следующей приближённой модели. Величина отрицательного заряда Q_e , вызванного автоэлектронным потоком, не может превышать величины заряда частицы: $Q_e \leq Q_c$. Тогда масса $M_{кф}$ катодного факела, образованного при взрыве вершины эмиттера, не может превышать величину, равную mQ_c :

$$M_{кф} \leq \mu Q_c, \quad (9)$$

где m – коэффициент электропереноса [5, 6]. Для оценок примем $m = (2 \div 6) \cdot 10^{-5}$ г/Кл для острия из материала с атомной массой M_a [7]. Для материалов мишеней $m = 10^{-4}$ г/Кл, так как они менее тугоплавкие, чем молибден. Таким образом, для характерных зарядов ($Q_c = 10^{-13}$ Кл) масса $M_{кф}$ катодного факела будет равна 10^{-17} г.

Тогда число частиц в катодном факеле для материала из ниобия будет равно:

$$N_{кф} = \frac{M_{кф}}{M_a} = 10^6. \quad (10)$$

Температуру катодной плазмы оценим через потенциальную энергию заряженной частицы: $T = kE_n/N_{кф}$, где $k < 1$ – безразмерный коэффициент, учитывающий долю потенциальной энергии E_n , затраченную на разогрев катодной плазмы. Учитывая связь потенциальной энергии E_n заряженной частицы с зарядом частицы Q_c в виде: $E_n = Q_c^2/2C_c$, можно записать:

$$T = \frac{K \cdot M_a \cdot Q_c^2}{2C_c \cdot Q_c \cdot \mu} = \frac{K \cdot M_a}{2\mu} \cdot \frac{Q_c}{C_c} = \xi \cdot U_c, \quad (11)$$

где ξ – коэффициент пропорциональности; U_c – потенциал заряженной частицы.

Температура катодного факела находится в пределах 5-10 эВ. Таким образом, высокотемпературная катодная плазма может оказаться достаточно мощным источником ионов, образованных при взаимодействии заряженной пылевой частицы с металлической мишенью. Из приведённых оценок следует, что в случае потенциального механизма основными параметрами процесса являются заряд частицы Q_c и её размер R_c .

Наряду с катодной плазмой, под воздействием автоэлектронного тока может образовываться анодная плазма, параметры которой оценены в [8]. По оценкам [9], температура анодного пара, т.е.

пара с пылевой частицы, составляет порядка 0,3 эВ. В этом случае уравнение Саха неприменимо, и для оценки плотности ионов нужно применять кинетическое уравнение:

$$\frac{dn^+}{dt} = \gamma_u \times n_a, \quad (12)$$

где γ и j/l ; S_u – частота ионизации пучком быстрых электронов с энергией $E \sim 1$ кэВ; S_a – сечение ионизации.

По оценкам степени ионизации анодного пара, число ионов Na^+ с анода будет равно: $Na^+ = Na \cdot \alpha_a$, где Na – количество испарённых атомов, α_a – степень ионизации анодного пара ($\alpha_a = 10^{-3}$).

Если взять поверхностную концентрацию адсорбированных атомов порядка 10^{16} см $^{-2}$, а площадь – порядка $\sim 10^{-8}$ см 2 , т.е. $N^+ \sim 10^5$, то величина эмитированного ионного заряда будет лежать в пределах $10^{-15} \div 10^{-16}$ Кл, что и наблюдается обычно в проведённых экспериментах.

Если сравнивать удельные энергетические характеристики двух видов взаимодействия частицы с преградой (ударного, разрядного), то можно отметить следующее.

Для удара внутренняя энергия равна

$$E_y \approx \frac{V_ч^2}{2(1 + \sqrt{\rho_y / \rho_y})^2} = 10^5 \cdot V_ч^2. \quad (13)$$

При разрядном механизме удельную энергию можно оценить следующим образом. Если считать, что вся потенциальная энергия (электростатическая) заряженной частицы была израсходована на образование катодной плазмы, масса которой $M_{кпл} = \mu Q_ч$, то

$$E_p = \frac{E_{пор}}{M_{кпл}} = \frac{Q_ч \times U_ч}{2\mu \times Q_ч} \approx 5,5 \times 10^9 \frac{Дж}{кг}. \quad (14)$$

Поэтому $E_y / E_p > 1$ при $V_ч \geq 0,5 \div 1$ км·с $^{-1}$. Таким образом, эффективность разрядного механизма значительно выше эффективности кинетического взаимодействия (т.е. разряд охватывает значительно меньшую массу вещества мишени и частицы, чем ударное воздействие, и поэтому удельная энергия, приходящаяся на 1

атом в зоне разряда, может значительно превышать удельную энергию ударного воздействия). Можно предположить, что разрядный механизм составляет конкуренцию ударному механизму для скоростей, превышающих 1 км·с $^{-1}$.

3. Результаты эксперимента

В эксперименте было зарегистрировано 88 спектров от пылевых частиц. Наиболее характерные спектры показаны на рис. 7. Верхний луч осциллографа соответствует сигналу мишени, нижний – сигналу приёмника. На фотографиях хорошо видно, что импульсам мишени с ярко выраженными ступеньками соответствуют более мощные спектры.

При проведении эксперимента вакуум был низок ($1,1 \cdot 10^{-4}$ мм.рт. ст.), что приводило, по-видимому, к сильному загрязнению поверхностей мишени и частицы адсорбированными атомами и молекулами, химический состав которых может быть оценён лишь предположительно. Для ряда характерных точек (сплошная линия на рис. 8) отчётливо видна зависимость количества эмитированных ионов от заряда частицы.

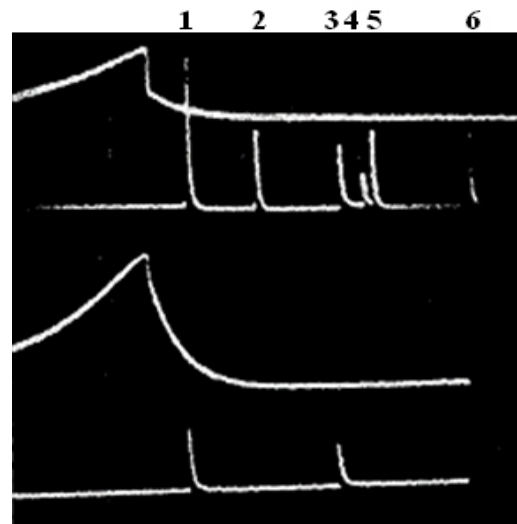


Рис. 7. Масс-спектрограммы ионов, образующихся за счёт электрического разряда между микрочастицей и мишенью:

1 – H+, 2 – K++, 3 – O2+, 4 – K+, 5 – CO2+, 6 – Nb

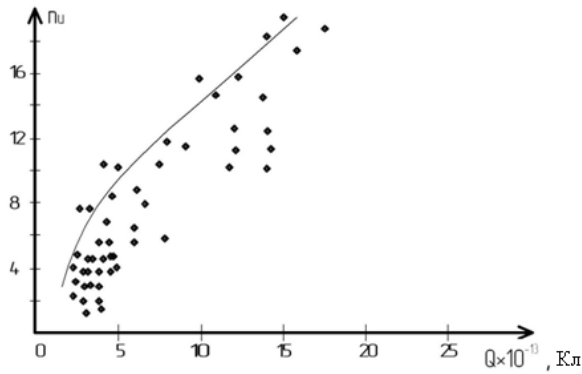


Рис. 8. Зависимость выхода ионов от заряда пылевой частицы

Для выявления качественных характеристик зависимости масс-спектрограмм от величины заряда Q_c частицы была осуществлена следующая процедура: диапазон зарядов частиц был разбит на три поддиапазона.

Пылевые частицы, заряд которых $Q_c = 1,4 \div 3,62 \cdot 10^{-13}$ Кл, $Q_c = 3,63 \div 6,59 \cdot 10^{-13}$ Кл, $Q_c = 6,66 \div 29,2 \cdot 10^{-13}$ Кл, составили три группы с малым, средним и большим зарядом соответственно. В первой группе содержится $n_y = 90$ частиц, во второй – $n_y = 29$ частиц, в третьей – $n_y = 29$ частиц. На рис. 9 по оси ординат отложена вели-

чина n_{U_i}/n_{y_k} ($k=1,2,3$), имеющая смысл среднего числа ионов, приходящихся на одно взаимодействие пылевой частицы с мишенью. Отчётливо видна тенденция увеличения выхода ионов с увеличением заряда частицы, что свидетельствует о потенциальном механизме образования ионов. Аналогичная процедура, но для случая, когда пылевые частицы были разбиты на три группы в соответствии с диапазоном скоростей, подтверждает данный вывод. Несмотря на то, что частицы имеют относительно малую скорость ($V_c = 100-350$ м·с⁻¹), выход ионов выше, поскольку в этой группе они обладают в среднем большим зарядом.

Определяющая роль электрического разряда в возникновении эмиссии при скоростях бомбардирующих частиц, меньших 1 км/с, была подтверждена путём нейтрализации ускоренных частиц электронами, испускаемыми накалённой спиралью [8]. В случае нейтрализации частиц масс-спектры не регистрировались, что соответствует данным, полученным при измерении полного эмиттируемого заряда.

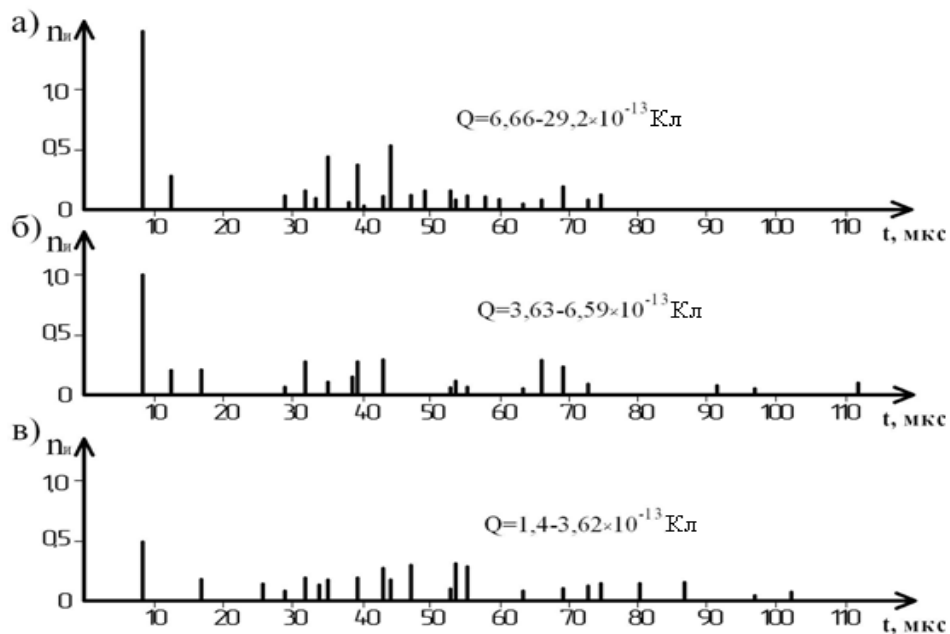


Рис. 9. Зависимость обобщённой масс-спектрограммы от заряда пылевой частицы

Заключение

Результаты экспериментов, проведенных с использованием масс-спектрометра, показали преобладание разрядного механизма образования ионов над кинетическим при скоростях, меньших 1 км/с. Полученные данные подтверждают сделанное предположение о характере механизма заряда микрочастиц в контактном инжекторе. Передача носителей заряда от электрода инжектора происходит преимущественно через плазму. Таким образом, расчёт заряда, полученного частицей в инжекторе, можно проводить, используя соотношения для анодного и катодного разряда через плазму.

Библиографический список

1. Семкин, Н.Д. Инжектор заряженных пылевых частиц [Текст] / Н.Д. Семкин, А.В. Пияков, К.Е. Воронов, Н.Л. Богоявленский, С.М. Шепелев // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – №3. – С. 154-159.
2. Семкин, Н. Д. Эволюция и перспективы развития устройств для моделирования микрометеоритов в лабораторных условиях [Текст] / Н. Д. Семкин, А. В. Пияков, А. П. Погодин // Прикладная физика. – 2008. – №4 – С. 153 -163.
3. Семкин, Н.Д. Имитация микрометеоритов с помощью электродинамического ускорителя [Текст] / Н.Д. Семкин,

К.Е. Воронов, А.В. Пияков, И.В. Пияков // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №4. – С.159-165.

4. Семкин, Н.Д. Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях [Текст] / Н.Д. Семкин, К.Е., Воронов, Л.С. Новиков. – Самара: Изд-во СГАУ, 2005. – 470 с.

5. Фурсий, Г.Н. Взрывная эмиссия, сопровождающая переход автоэлектронной эмиссии в вакуумный пробой [Текст] / Г.Н. Фурсий, А.А. Антонов, В.М. Жуков // Вестник ЛГУ. – 1971. – № 10. – С. 75-79.

6. Бугаев С.П. Взрывная эмиссия электронов [Текст] / С.П. Бугаев, Е.А. Литвинов, А.Г. Месяц // УФН. – 1975. – Т. 115. – №1 . – С. 101-120.

7. Новиков, Л.С. Масс-спектрометрия ионов, эмиттируемых при соударении микрометеоритных частиц с материалами [Текст] / Л.С. Новиков, Н.Д. Семкин, В.С. Куликаускас // ФХОМ. – 1989. – № 6. – С.49-56.

8. Дергицев, В.И. Разлет в вакуум плазмы сплошного состава [Текст] / В.И. Дергицев, А.Ю. Захаров, А.А. Фимоков. // (Препр. /ИПМ АН СССР; № 54). – М., 1976. – 29 с.

9. Зельдович, Я.Ю. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений [Текст] / Я.Ю. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 687 с.

MECHANISMS OF INTERACTION OF CHARGED MICROPARTICLES WITH THE DISCHARGE ELECTRODE OF THE INJECTOR AND THE MASS SPECTROMETER TARGET

© 2013 N. D. Syomkin, A. S. Vidmanov, V. V. Bragin

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The paper deals with the mechanism of interaction between charged microparticles and the mass spectrometer target. Experimental data on measuring the ion flow parameters in case of high-speed impact of the charged particle are presented. The contribution of the charged particle's potential and kinetic energy to the ionization of the mass spectrometer's target matter is assessed.

Charging of a microparticle, injector, high-speed impact, mass spectrometer, ionization of matter.

Информация об авторах

Сёмкин Николай Данилович, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, 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 радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: jkt13@rambler.ru. Область научных интересов: ускорительная техника, космическое приборостроение.

Брагин Василий Владимирович, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: bragin_vv@inbox.ru. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, физика космической плазмы.

Syomkin Nikolay Danilovich, doctor of technical science, professor, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: semkin@ssau.ru. Area of research: high-speed impact, mass spectrometry, space device engineering.

Vidmanov Aleksei Sergeevich, postgraduate student, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: jkt13@rambler.ru. Area of research: accelerator technology, space device engineering.

Bragin Vasily Vladimirovich, postgraduate student, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: bragin_vv@inbox.ru. Area of research: electromagnetic compatibility, space plasma physics.