

Физические параметры электростатически ускоренных микрочастиц

© О.М. Марченко, С.А. Бедняков, С.С. Авторин, О.Б. Дзагуров, Н.Б. Акимов, О.П. Глотов, Н.Г. Чеченин

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
E-mail: oleg.marchenko.99@bk.ru

Поступило в Редакцию 30 июня 2025 г.

В окончательной редакции 18 августа 2025 г.

Принято к публикации 18 августа 2025 г.

На базе электростатических инжектора и ускорителя в НИИЯФ МГУ запущена система, позволяющая получать пучок ускоренных металлических микрочастиц со скоростями до 3 км/с. В составе системы разработан программно-аппаратный комплекс, реализующий времяпролетную методику фиксации значений физических параметров каждой отдельной частицы. Получены распределения физических параметров ускоренных частиц двух различных алюминиевых порошков.

Ключевые слова: ускоритель твердых частиц, электростатический инжектор, микрометеориты, зарядочувствительный усилитель.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.22.61584.20420

Космическая пыль и микрометеороиды наряду с космической радиацией являются одним из основных разрушающих факторов воздействия космического пространства на элементы космических аппаратов (КА). Наиболее уязвимыми к такому воздействию оказываются оптические элементы КА, а также чувствительные части научной аппаратуры и солнечные элементы. Средняя скорость столкновений КА с такими частицами составляет порядка 20 км/с. В окрестностях Луны скорость пылинок, как правило, не превышает вторую космическую скорость для Луны, составляющую 2,4 км/с. Это связано с тем, что там концентрация вторичных скоростных частиц, инжектированных с поверхности в результате метеоритной бомбардировки, превышает концентрацию внешних высокоскоростных частиц. Размер большей части частиц находится в диапазоне 1–1000 мкм, частицы меньшего размера эффективно удаляются из солнечной системы за счет давления света, а большего встречаются значительно реже.

Лабораторное моделирование воздействия высокоскоростных микрочастиц на приборы и материалы сопряжено с большими трудностями. Они связаны, с одной стороны, с разработкой системы ускорения частиц в нужном направлении, а с другой — с контролем физических параметров ускоренных частиц. Тем не менее крайне высокая стоимость летных испытаний вынуждает исследователей по всему миру решать данную задачу. Важными задачами подобных методов являются испытания и калибровка датчиков для измерений потоков микрочастиц в космосе. Такие датчики работают на действующих космических миссиях [1] и активно разрабатываются в России [2–4] для последующей установки на КА. Для повышения надежности и проведения функциональных испытаний таких приборов необходимо поддерживать и развивать имеющиеся и создавать новые лабораторные стенды.

Одним из наиболее эффективных методов получения высокоскоростных микрочастиц является электростатическое ускорение. Оно подразумевает получение из нейтрального порошка одиночных заряженных частиц при помощи электростатического инжектора [5] и последующее ускорение в электростатическом поле. Источником поля, как правило, служит генератор Ван де Граафа [6,7]. В США и Китае функционируют электростатические ускорители, предназначенные для работы с заряженными микрочастицами [8,9]. Проводящиеся на них в настоящее время эксперименты по воздействию ускоренных частиц на сенсорные детали оборудования [10,11] подтверждают необходимость развития таких экспериментальных методов. Кроме того, ведется разработка новых методов ускорения микрочастиц [12]. В НИИЯФ МГУ работы с электростатическим ускорением микрочастиц ведутся с конца 60-х годов прошлого столетия [13,14].

Важнейшим узлом установки для электростатического ускорения заряженных микрочастиц является источник заряженных микрочастиц — электростатический инжектор. Схема инжектора, применяемого в НИИЯФ МГУ, приведена на рис. 1.

Штрихпунктирная линия на рис. 1 демонстрирует возможный путь частицы внутри инжектора, звездочками обозначены акты перезарядки. Частица, случайным образом попавшая в одно из отверстий 5, оказывается во внешней камере инжектора. Напротив выходного отверстия на зарядном электроде установлен пучок проводящих углеродных волокон. Это необходимо для уменьшения радиуса кривизны поверхности зарядного электрода при последнем перед вылетом из инжектора акте перезарядки и увеличения удельного заряда частицы. Инжектор крепится к вакуумной системе на высоковольтном терминале ускорителя при помощи отверстия в основании 9, служащем также вакуумным фланцем.

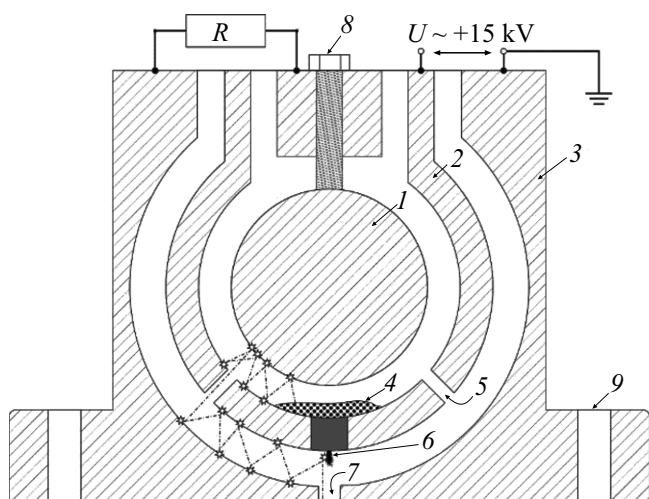


Рис. 1. Схематическое изображение используемого электро-статического инжектора заряженных частиц. 1 — бункерный электрод, 2 — зарядный электрод, 3 — корпус инжектора, 4 — навеска порошка, 5 — отверстие между бункером и внешней камерой, 6 — направленный пучок углеродных волокон, 7 — выходное отверстие, 8 — регулировочный винт, 9 — основание инжектора.

В развитие предыдущих исследований [13,14] в НИИ ЯФ МГУ на базе ускорителя ЭГ-8 и электро-статического инжектора реализован стенд для ускорения микро-частиц. Схема установки приведена на рис. 2. В состав стенда входит вакуумная система из форвакуумных

и турбомолекулярных насосов, вакуумная камера для испытываемого материала или прибора. Также в сочетании с системой функционирует программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий фиксацию скоростей и зарядов каждой пролетевшей частицы.

Программно-аппаратный комплекс имеет в своем составе два набора из детекторного медного цилиндра и калиброванного зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ). Также для работы используются цифровой запоминающий восьмибитный осциллограф АКИП-72204А с полосой пропускания до 10 МГц, программное обеспечение (ПО) PicoScope 6 для работы с осциллографом и авторское ПО для обработки полученных сигналов. Общий вид получаемых при измерениях сигналов приведен в правой части рис. 2. При этом фиксируемыми параметрами являются относительные времена максимумов, минимумов и переходов через базовую линию напряжений на выходах ЗЧУ. Последующая обработка сигналов позволяет получить физические параметры частиц при измерениях по двум цилиндрам: зная расстояние между цилиндрами, а также коэффициенты усиления ЗЧУ, можно вычислить скорость и заряд частицы, вызвавшей импульсы, по формулам

$$v = \frac{L}{\Delta t}, \quad q = k \frac{1}{2} \Delta U, \quad (1)$$

где v — скорость частицы, L — расстояние между центрами цилиндров, Δt — время между точками перехода сигнала через базовую линию в двух каналах осциллографа, q — заряд частицы, k — коэффициент

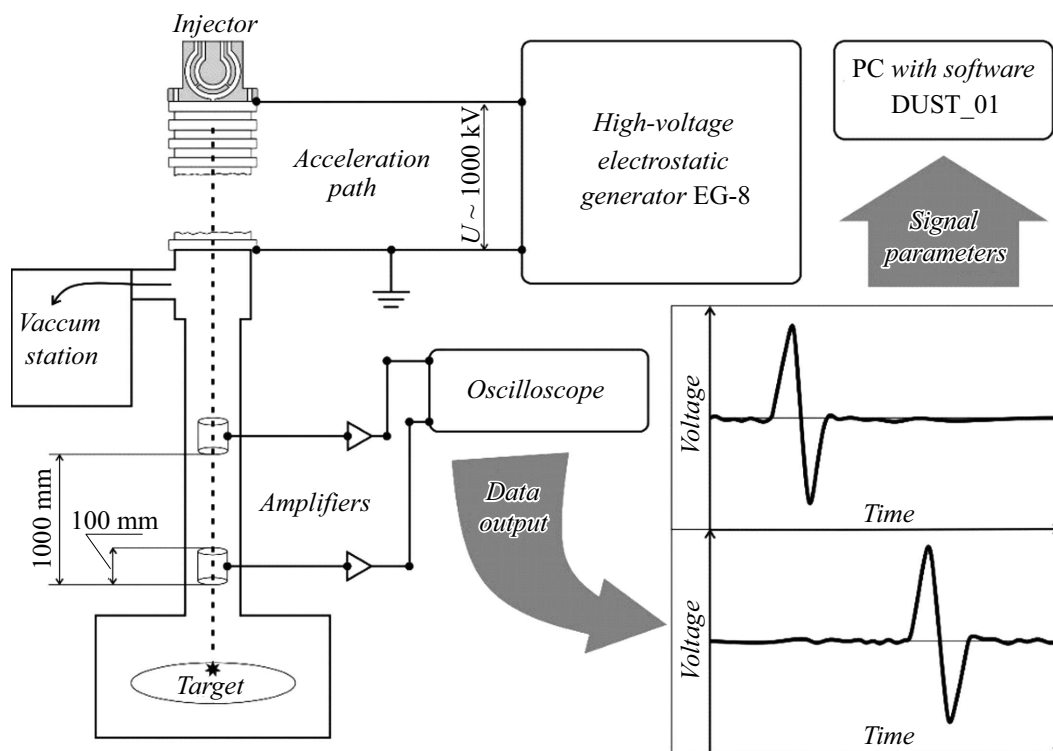


Рис. 2. Схема установки для ускорения микро-частиц.

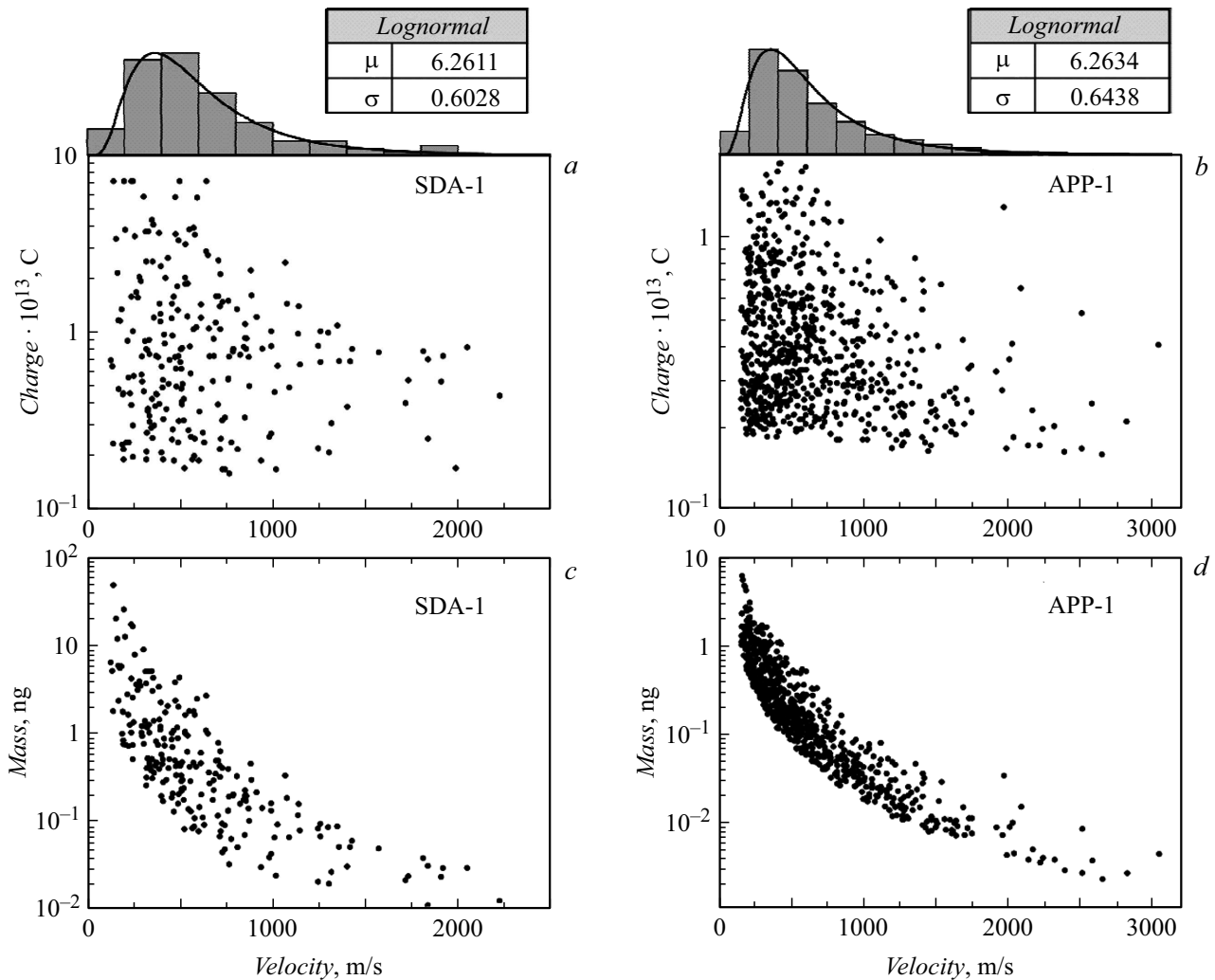


Рис. 3. Экспериментальные значения скоростей, зарядов и масс частиц.

усиления ЗЧУ, ΔU — разница между максимальным и минимальным значениями напряжения на выходе ЗЧУ.

Масса частицы может быть затем вычислена по формулам

$$\frac{mv^2}{2} = Eq, \quad m = 2 \frac{Eq}{v^2}, \quad (2)$$

где m — масса частицы, E — суммарное ускоряющее напряжение.

Таким образом, измерения физических параметров частицы, включающих массу, заряд и скорость, являются косвенными. Ошибка в измеренных значениях указанных параметров в основном определяется ошибками определения величин, входящих в формулы (1), (2), но не измеряемых непосредственно в описываемом эксперименте. Среди них ускоряющее напряжение, расстояние между цилиндрами, геометрические размеры цилиндров, коэффициенты усиления ЗЧУ, а также их временные параметры.

Измерения физических параметров проводились для двух марок алюминиевых порошков. Порошок ПАП-1

представляет собой получаемый в результате измельчения в шаровой мельнице материал, состоящий из чешуйчатых частиц алюминия. АСД-1 представляет собой алюминий в виде сферического мелкодисперсного порошка. При работе с порошком ПАП-1 величина напряжения на ускорителе составляла 500 kV, для порошка АСД-1 — 400 kV. Напряжение на инжекторе не превышало 15 kV и подбиралось таким образом, чтобы интенсивность потока была не более одной частицы в несколько секунд. Полученные значения скоростей, зарядов и масс частиц для каждого из экспериментов отражены на рис. 3. Там же приведены гистограммы распределений частиц по скоростям и параметры соответствующей аппроксимации логнормальным распределением.

Диаграммы *a* и *b* (рис. 3) свидетельствуют о слабой связи между зарядом частиц и их скоростью. Это обусловлено тем, что скорость частицы при данном ускоряющем напряжении связана с зарядом частицы, отнесенным к ее массе. Диаграммы *c* и *d* (рис. 3) свидетельствуют о сильной связи скорости частицы с ее массой. На их основании сделан вывод, что наиболее

скоростными в настоящей работе являлись частицы с наименьшей массой. Реализованная методика открывает широкие перспективы для исследований в области высокоскоростных соударений, а также для наземных испытаний узлов и деталей КА и детекторов космических частиц.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Kempf, S. Tucker, N. Altobelli, C. Briois, M.L. Cable, E. Grün, M.S. Gudipati, B.L. Henderson, H.W. Hsu, K. Hand, M. Horanyi, F. Postberg, J. Schmidt, R. Srama, Z. Sternovsky, G. Tobie, M.Y. Zolotov, C. Belting, S. Bortfeldt, J. Bouwman, N. Brennan, K. Bryant, T. Cassidy, D. Crotser, A. Curtin, E. DeVito, D. Ebuen, N. Faber, M. Fisher, J. Fontanese, M. Fowle, W. Frank, S. Gurst, S. Haselschwardt, V. Hoxie, K. Hubbell, D. James, M. Kien, S. Knappmiller, R. Kohnert, A. Lampe, M. Lankton, S. Lev-Tov, C. McGinn, M. Miller, G. Newcomb, S. Oberg, L. O'Brien, K. Pilewskie, S. Polson, V. Scarffe-Barrett, D. Summers, S. Wade, A. Ware, A. Yehle, C. Wuerthner, A. Garcia Arteaga, B. Oaida, C. Eberl, P. Fitton, W. Goode, Z. Levin, G. Lowry, J. Stanley, A. Tracy, Z. Ulibarri, E. Williams, C. Yoke, B.S. Southworth, J.K. Hillier, N. Khawaja, F. Klenner, M. Napoleoni, J. Simolka, J. Sioeng, *Space Sci. Rev.*, **221**, 10 (2025). DOI: 10.1007/S11214-025-01134-0
- [2] А.М. Телегин, К.Е. Воронов, Д.А. Шестаков, *Инженерная физика*, **1** (1), 49 (2024). DOI: 10.25791/INFIZIK.1.2024.1381
- [3] Е.В. Голованов, В.В. Кашин, И.А. Горбачев, А.В. Захаров, Г.Г. Дольников, В.В. Колесов, *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*, **16**, 829 (2024). DOI: 10.17725/rensit.2024.16.829
- [4] Е.Н. Слюта, В.В. Высочкин, В.В. Иванов, В.Ю. Маковчук, А.И. Назаров, В.И. Погонин, Е.А. Роскина, В.В. Сафронов, Л.П. Таций, *Астроном. вестн.*, **55**, 444 (2021). DOI: 10.31857/S0320930X21050042 [E.N. Slyuta, V.V. Vysochkin, V.V. Ivanov, V.Y. Makovchuk, A.I. Nazarov, V.I. Pogonin, E.A. Roskina, V.V. Safronov, L.P. Tatsiy, *Solar Syst. Res.*, **55** (5), 437 (2021). DOI: 10.1134/S003809462105004X].
- [5] Н.Д. Семкин, А.В. Пияков, А.П. Погодин, *Прикладная физика*, № 4, 153 (2008). <https://applphys.orion-ir.ru/appl-08/08-4/PF-08-4-153.pdf>
- [6] H. Shelton, C.D. Hendricks, R.F. Wuerker, *J. Appl. Phys.*, **31**, 1243 (1960). DOI: 10.1063/1.1735813
- [7] J.F. Friichtenicht, *Rev. Sci. Instrum.*, **33**, 209 (1962). DOI: 10.1063/1.1746548
- [8] J. Huang, J. Han, H. Li, M. Cai, X. Li, Z. Zhang, Z. Chen, L. Wang, X. Yang, C. Feng, *Chin. Sci. Bull.*, **54**, 616 (2009). DOI: 10.1007/s11434-009-0039-0
- [9] A. Shu, A. Collette, K. Drake, E. Grün, M. Horányi, S. Kempf, A. Mocker, T. Munsat, P. Northway, R. Srama, Z. Sternovsky, E. Thomas, *Rev. Sci. Instrum.*, **83**, 075108 (2012). DOI: 10.1063/1.4732820
- [10] X. Yang, C. Zhang, W. Wang, H. Li, S.N. Zhang, W. Yuan, Z. Ling, G. Jin, Z. Zhang, L. Li, *Publ. Astron. Soc. Pac.*, **134**, 065002 (2022). DOI: 10.1088/1538-3873/ac75c7
- [11] A.J. Gemer, Z. Sternovsky, D. James, M. Horanyi, *Planet. Space Sci.*, **183**, 104628 (2020). DOI: 10.1016/j.pss.2018.12.011
- [12] L. Liu, K. Flanagan, P. Robinson, A. Desai, R. Martinez, *J. Appl. Phys.*, **137**, 113105 (2025). DOI: 10.1063/5.0239008
- [13] А.И. Акишин, Е.В. Блюдов, С.С. Васильев, В.П. Кирюхин, М.П. Станиславский, Л.В. Конаныкин, Ю.А. Чернов, *Ю.Б. Черняк, ПТЭ*, № 6, 185 (1970).
- [14] A.A. Bednyakov, R.A. Gilyarov, O.B. Dzagurov, V.V. Krivolap, V.S. Kulikauskas, *Instrum. Exp. Tech.*, **41**, 284 (1998).