

УДК 621.384.62

ЦИКЛИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

© 2011 А. В. Пияков

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

Представлены теория, расчётные параметры и детали конструкции циклического ускорителя, позволившего разгонять заряженные микрочастицы диаметром 0,1...10 мкм до скоростей 25 км/с. Общее эффективное ускоряющее напряжение составляет 5 МВ. Отличие этого ускорителя от существующих состоит в том, что все трубки дрейфа динамического контура выполнены одинаковыми, а синфазность движения частицы с напряжением на трубках дрейфа осуществляется путем формирования ускоряющего напряжения как функции скорости частицы и ее удельного заряда, а также в циклическом контуре ускорителя.

Ускоритель, микрометеорит, пылевая частица, дефлектор, трубка дрейфа.

Введение

В последние годы сохраняется тенденция увеличения концентрации высокоскоростных техногенных пылевых частиц на околоземных орбитах. По некоторым данным, уже сейчас концентрация техногенных пылевых частиц в три раза превышает концентрацию микрометеоритов естественного происхождения. Учитывая всё повышающиеся требования к надёжности и долговечности космических аппаратов, а также появление множества новых материалов, необходимо дальнейшее развитие исследований процессов взаимодействия высокоскоростных пылевых частиц с материалами элементов конструкций космических аппаратов.

Для проведения ударных экспериментов используются различные типы ускорителей, однако наиболее “чистыми” являются электростатические и линейные ускорители, в которых ускорение частиц осуществляется энергией электрического поля. Такие ускорители высокоскоростных твёрдых частиц основаны на ускоряющей системе Слоуна – Лоуренса, где синфазность движения частиц с изменением напряжения на трубках дрейфа достигается путем выполнения дрейфовых трубок разной длины. Они имеют узкий диапазон ускоряемых частиц и небольшое число ускоряющих секций, что обусловлено тем, что данная система не позволяет ускорять частицы в широком диапазоне масс

без предварительной перенастройки геометрии ускоряющего тракта. Кроме того, данному классу ускорителей характерны относительно большие габариты и масса.

Конструкция ускорителя

Для дальнейшего повышения эффективного ускоряющего напряжения предложена конструкция циклического ускорителя твёрдых частиц. В основе этого ускорителя лежит принцип электродинамического ускорения частиц. Удержание частиц в замкнутом ускоряющем тракте осуществляется посредством тороидальных дефлекторов. Структурная схема циклического ускорителя пылевых частиц приведена на рис. 1.

Ускоритель работает следующим образом. Инжектор частиц выпускает в тракт заряженные частицы с требуемым интервалом следования (примерно 1 частица в секунду). Частица последовательно проходит первую измерительную линейку, ЛЭСУ, вторую измерительную линейку и попадает в тракт циклического ускорителя. По измеренным временам пролёта первой и второй измерительных линеек, а также заданному напряжению ЛЭСУ система управления ускорителем вычисляет удельный заряд частицы. Затем частица пролетает несколько кругов по тракту циклического ускорителя, каждый раз ускоряясь в четырех ЛЭДУ. Управляемые тороидальные дефлекторы предназначены для

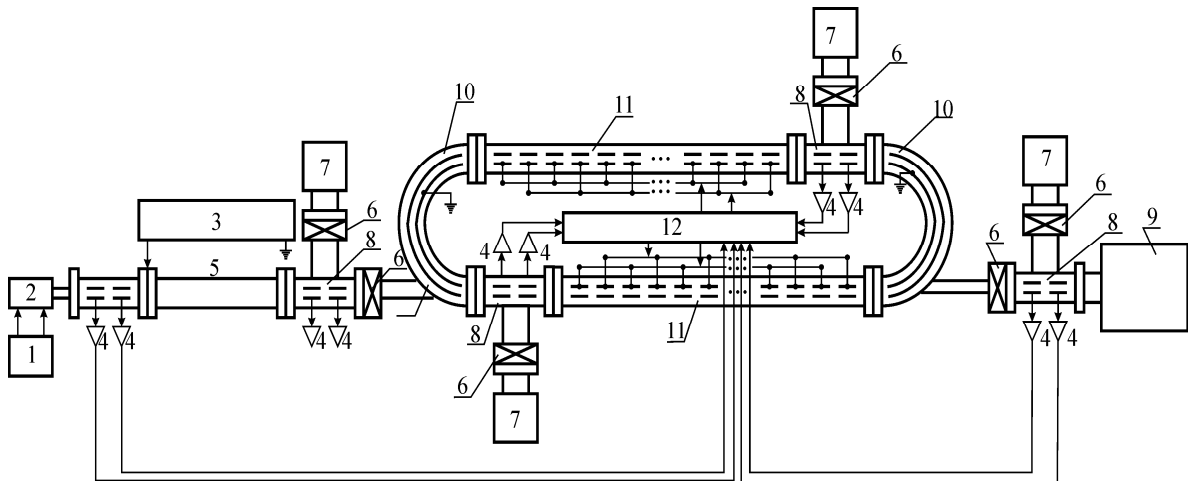


Рис. 1. Структурная схема циклического ускорителя пылевых частиц: 1- источник питания инжектора; 2 – инжектор заряженных частиц; 3 – источник высокого напряжения (~100кВ); 4 – зарядочувствительный усилитель; 5 – линейный электростатический ускоритель (ЛЭСУ); 6 – вакуумный отсекаель; 7 – система вакуумной откачки и контроля вакуума (СВОКВ); 8 – измерительная линейка; 9 – вакуумная камера для экспериментов; 10 – управляемый тороидальный дефлектор; 11 – линейный электродинамический ускоритель (ЛЭДУ); 12 – система управления ускорителем

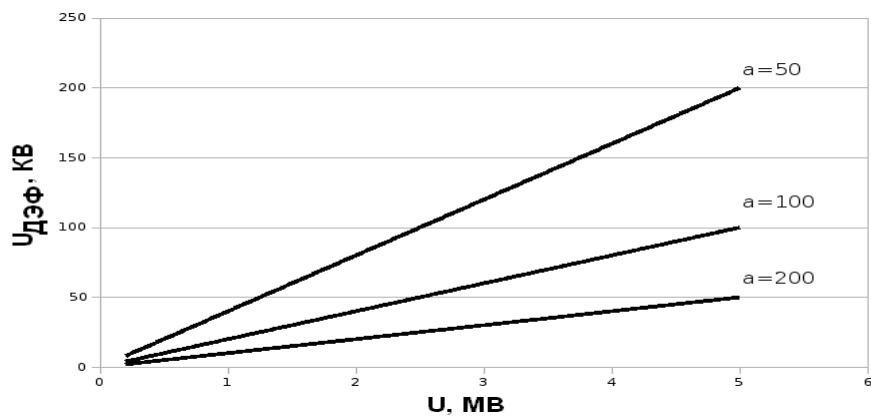


Рис. 2. Зависимость отклоняющего напряжения от эквивалентного ускоряющего напряжения для различных значений коэффициента геометрии поля. Зазор между пластинами $d = 10$ мм

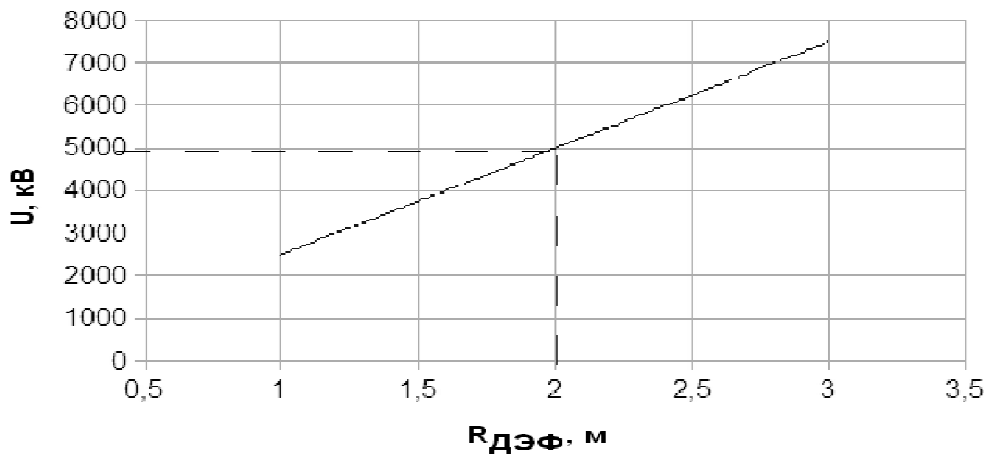


Рис. 3. График зависимости максимального ускоряющего напряжения от радиуса дефлектора для зазора между пластинами $d=10$ мм

искривления траектории частицы. В зависимости от скорости частицы (которая постоянно измеряется измерительными линейками, установленными в контуре циклического ускорителя) и её удельного заряда система управления ускорителем управляет высоковольтными усилителями импульсов и высоковольтным усилителем напряжения, которые в свою очередь формируют необходимые напряжения на дрейфовых трубках ЛЭДУ и на обкладках тороидальных дефлекторов. В момент достижения частицей критической скорости (той скорости, при которой максимального выходного напряжения высоковольтного усилителя напряжения становится недостаточно, чтобы удержать частицу в тракте за счет тороидальных дефлекторов) процесс ускорения прекращается и частица выводится в вакуумную камеру для экспериментов. ЭВМ предназначена для ведения статистики об ускоряемых частицах с помощью специально разработанного программного обеспечения.

Технико-экономическая эффективность использования разработки выражается прежде всего в существенной дешевизне лабораторного моделирования по сравнению с постановкой натуральных экспериментов на космических аппаратах. Оптимальное применение материалов и рациональное конструирование, основанное на результатах лабораторных экспериментов, позволят увеличить срок службы космических аппаратов, более точно прогнозировать срок их службы и надежность. Особенно актуальны такие исследования при проектировании аппаратов, предназначенных для научных экспериментов в дальнем космосе при изучении комет, где плотность потока пылевых частиц высока.

Расчёт скорости и энергии частицы

Эквивалентное ускоряющее напряжение линейного электродинамического ускорителя определяется выражением

$$U = U_{\text{эф}} \cdot T_0,$$

где T_0 – времяпролетный коэффициент электродинамического ускорителя; $U_{\text{эф}}$ – эффективное ускоряющее напряжение ускорителя.

Эквивалентное ускоряющее напряжение всего ускорителя определяется выражением

$$U_{\Sigma} = U \cdot N,$$

где N — количество пройденных электродинамических ускорителей.

Максимально возможная скорость частицы при этом будет определяться выражением

$$V_{\text{MAX}} = \sqrt{2 \frac{q}{m} U T_0 + V_0^2},$$

где q/m – удельный заряд; V_0 – скорость частицы на входе.

Максимальное число кругов, которые частица пройдет в ускорителе, будет определяться из условия равнодействия центробежной силы движения частицы в дефлекторе и электростатической силы электрического поля дефлектора. Отклоняющее напряжение можно оценить по формуле

$$U_{\text{дэф}} = \frac{m \cdot V^2}{q \cdot a} = \frac{2U}{a},$$

где $a = \frac{1}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$ – коэффициент геометрии

поля; R_1, R_2 – внутренний и внешний радиусы пластин дефлектора.

Оценка максимально достижимых скоростей

Максимальная скорость на выходе и максимальное отклоняющее напряжение связаны соотношениями:

$$\begin{cases} V_{\text{MAX}} = \sqrt{2 \frac{q}{m} U T_0 + V_0^2} \\ U_{\text{дэф}} = \frac{m \cdot V^2}{q \cdot a} \end{cases},$$

Максимальная напряжённость электрического поля для различных методов обработки поверхности соответственно будет равна: 50 кВ/см — для механической, 70 кВ/см — для гальванической, 100 кВ/см — для ионной обработки.

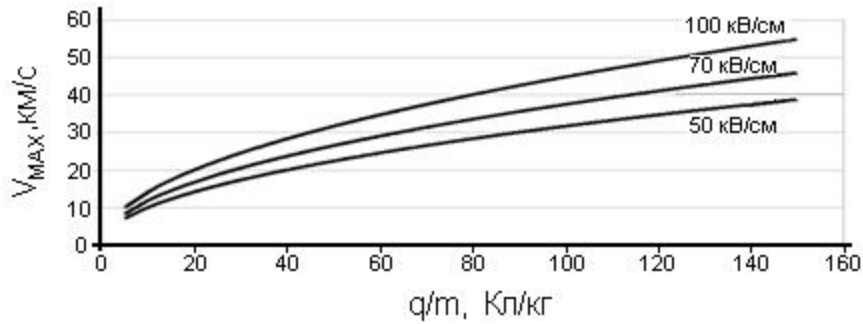


Рис. 4. Зависимость максимально достижимой скорости от удельного заряда q/m для различных максимально допустимых отклоняющих напряжений. Радиус основной траектории дефлектора $R=2\text{ м}$, ширина зазора между пластинами $d = 10\text{ мм}$

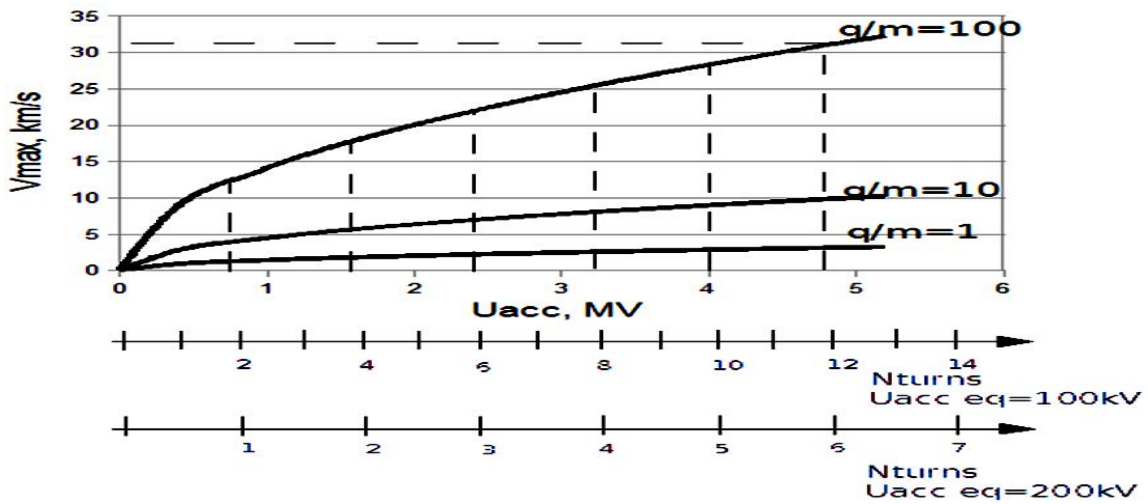


Рис. 5. График зависимости максимально достижимой скорости от ускоряющего напряжения для различных удельных зарядов q/m : N_{turns} – число витков, необходимое для достижения данной скорости; $U_{acc\ eq}$ – эквивалентное ускоряющее напряжение линейного электродинамического ускорителя

Таблица 1. Расчёт конструкции ускорителя

| | |
|---|-----------|
| $U_{acc\ pre}$ [кВ], напряжение предускорителя | 100 |
| N_{gaps} , количество промежутков электродинамического ускорителя | 10...20 |
| U_{gap} [кВ], ускоряющее напряжение промежутка | 10 |
| $U_{acc\ eq}$ [кВ], эквивалентное ускоряющее напряжение электродинамического ускорителя | 100...200 |
| R_1 [м], радиус внутренней пластины дефлектора | 1,995 |
| R_2 [м], радиус внешней пластины дефлектора | 2,005 |
| d [м], ширина зазора между пластинами | 0,01 |
| a , коэффициент геометрии поля | 200 |
| U_{def} [кВ], максимально допустимое отклоняющее напряжение | 50 |
| n , требуемое число ускорений | 24...12 |
| N , требуемое число витков | 6...3 |
| U_{acc} [МВ], суммарное ускоряющее напряжение | 4,9 |

Оценка необходимого числа оборотов

Максимальная скорость частицы достигается после некоторого числа ускорений. Зависимость требуемого числа ускорений от параметров ускорителя определяется выражениями

$$n_{req} = \frac{U_{ДФМАХ} \cdot \frac{a}{2}}{U}, N_{req} = \frac{n_{req}}{2},$$

где $U_{ДФ МАХ}$ - максимально допустимое отклоняющее напряжение; U - эквивалентное ускоряющее напряжение линейного электро-

динамического ускорителя; N_{req} - требуемое число витков.

Расчет конструкций ускорителя

Расчет характеристик ускорителя двух разных конструкций приведен в табл. 1

Библиографический список

1. Alexandre Pozwolski, Compact laser-driven accelerator of macroparticles. Laser and Particle Beams 2001, 19.

CYCLIC ACCELERATOR OF CHARGED PARTICLES

© 2011 A.V. Piyakov

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

The theory, design parameters and construction details of a cyclic accelerator in Zvolen accelerate charged microparticle diameter 0.1 ... 10 mm up to velocities of 25 km / s are presented. The total effective accelerating voltage of 5 MV. The essential difference from the accelerator of the existing is that all of the drift tube of the dynamic circuit made the same, and in-phase motion of the particle to the voltage across the drift tubes is accomplished by forming the accelerating voltage as a function of particle velocity and its specific charge, as well as in cyclic accelerator circuit .

Accelerator, micrometeors, dust particles, the deflector, drift tube.

Информация об авторе

Пияков Алексей Владимирович, докторант, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, к.т.н., доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва. E-mail: piyakov@ssau.ru. Область научных интересов: физика ускорителей частиц, космические эксперименты.

Piyakov Aleksey Vladimirovich, assistant professor of design and production of radio-electronic means, Ph.D., associate professor, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev (National Research University). E-mail: piyakov@ssau.ru. Sphere of scientific interests: accelerators physics, space devices development.