

УДК 621.384.62

## ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОМЕТЕОРИТОВ

© 2007 г. Н. Д. Семкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов, Н. Л. Богоявленский, Д. В. Горюнов

*Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева*

*Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34*

Поступила в редакцию 20.12.2005 г.

После доработки 29.05.2006 г.

Представлены теория, расчетные параметры и детали конструкции линейного ускорителя, позволившего разогнать заряженные микрочастицы  $\varnothing 0,1\text{--}10$  мкм до скоростей 12 км/с. Электродинамический контур ускорителя имеет 27 ускоряющих промежутков, к каждому из которых прикладывается потенциал, равный 20 кВ. Частицы инжектируются в линейный электродинамический ускоритель после предварительного ускорения в линейном электростатическом ускорителе с эффективным напряжением 145 кВ. Общее эффективное ускоряющее напряжение 670 кВ. Общая длина ускоряющих секций 3,62 м. Существенное отличие описываемого ускорителя от существующих 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. Приведены экспериментальные данные работы ускорителя.

PACS: 87.65.+y, 96.50.Pw

В последние годы сохраняется тенденция увеличения концентрации высокоскоростных техногенных пылевых частиц на околоземных орбитах. Учитывая все повышающиеся требования к надежности и долговечности космических аппаратов, а также появление множества новых материалов, необходимо дальнейшее исследование процессов взаимодействия высокоскоростных пылевых частиц с материалами элементов конструкций космических аппаратов.

Для проведения ударных экспериментов используются ускорители различных типов [1, 2], однако наиболее “чистыми” являются электростатические и линейные ускорители, в которых ускорение частиц осуществляется энергией электрического поля. Такие ускорители высокоскоростных твердых частиц обычно основаны на ускоряющей системе Слоуна–Лоуренса, где синфазность движения частиц с изменением напряжения на трубках дрейфа достигается путем выполнения дрейфовых трубок разных длин [3, 4]. Они имеют узкий диапазон ускоряемых частиц и небольшое число ускоряющих секций, поскольку такая система не позволяет ускорять частицы в широком диапазоне масс без предварительной перенастройки геометрии ускоряющего тракта.

В данной работе представлена конструкция линейного ускорителя [5], являющегося дальнейшей модификацией ускорителя с ускоряющей системой типа Слоуна–Лоуренса. Основные отличия предлагаемого ускорителя: 1) формирование

напряжения на трубках дрейфа как функции скорости и удельного заряда частиц, что позволило существенно расширить диапазон масс ускоряемых частиц без изменения геометрии ускорительного тракта, 2) использование генератора изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке, что позволило выполнить все дрейфовые трубки одинаковыми и этим существенно уменьшить габариты ускорительного тракта.

### ТЕОРИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЯ

На рис. 1 показана структура ускорительного тракта линейного электродинамического ускорителя пылевых частиц.

Дрейфовые трубки поочередно соединены с противоположными полюсами источника пачки прямоугольных импульсов переменной длительности импульсов в пачке. Начало пачки импульсов соответствует моменту времени, когда частица находится в середине первой трубки дрейфа (начало первой секции). Таким образом, между первой и второй дрейфовыми трубками возникает ускоряющее поле, под действием которого частица получает некоторое ускорение. В момент времени, когда частица достигает середины второй дрейфовой трубки (начало второй ускоряющей секции), полярность ускоряющего напряжения меняется. В дальнейшем смена полярности напряжения происходит в то время, когда частица

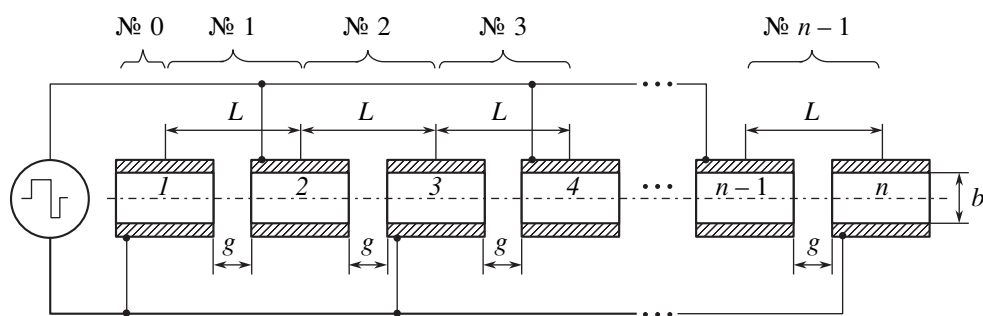


Рис. 1. Структура ускорительного тракта линейного электродинамического ускорителя.

находится в середине каждой последующей трубки дрейфа. Полная величина ускоряющего потенциала линейного электродинамического ускорителя равна удвоенной амплитуде приложенного к трубкам дрейфа напряжения, умноженной на число ускоряющих секций.

Частица с массой  $m$  и зарядом  $Q$ , пройдя одну ускоряющую секцию, находящуюся под потенциалом  $U$ , получит приращение кинетической энергии:

$$\Delta W = W_2 - W_1 = QUT, \quad (1)$$

где  $W_1, W_2$  – кинетическая энергия частицы в начале и конце ускоряющей секции;  $U$  – разность потенциалов между трубками дрейфа;  $T$  – коэффициент времени пролета ускоряющей секции, т.е.  $UT = \int_0^L E(z)dz$ , где  $E$  – напряженность электрического поля.

Во время переключения напряжения частица находится в середине дрейфовой трубки, где напряженность электрического поля на несколько порядков меньше, чем в зазоре, и частицу можно считать экранированной. Это обстоятельство позволяет пренебречь влиянием переходного процесса на движение частицы. Подробно траектории частиц, определение распределения электрического поля в ускоряющей секции и расчет времен переключения напряжения на трубках дрейфа рассмотрены в [6, 7]. Здесь же будут приведены лишь необходимые сведения для разъяснения работы электродинамического ускорителя.

Зная параметры частицы и напряжение, приложенное к соседним трубкам дрейфа, можно определить время, которое частица затратит на прохождение  $i$ -ой секции:

$$T_i = \frac{L+g}{2V_{i-1}} + \frac{V_i - V_{i-1}}{\frac{QU}{m}T} + \frac{L+g}{2V_i}, \quad (2)$$

где  $V_{i-1}$  – скорость частицы в начале  $i$ -ой секции,  $V_i$  – скорость частицы в конце  $i$ -ой секции.

Как видно из формулы (2), для расчета времен переключения напряжения на трубках дрейфа не-

обходимы значения начальной скорости частицы  $V_0$  и ее удельного заряда  $Q/m$ . Таким образом, становится очевидным, что, регулируя длительность и частоту импульсов на трубках дрейфа как функцию начальной скорости и удельного заряда частицы, можно существенно расширить рабочий диапазон электродинамического ускорителя.

### КОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ

Описываемый линейный ускоритель состоит из двух ускоряющих систем: линейного электростатического ускорителя и линейного электродинамического ускорителя.

Внешний вид ускорителя приведен на рис. 2, а структурная схема – на рис. 3.

Ускоритель работает следующим образом. После зарядки в инжекторе частицы последовательно проходят первую измерительную линейку, линейный электростатический ускоритель, вторую измерительную линейку, линейный электродинамический ускоритель и третью измерительную линейку. Сигналы с первой измерительной линейки после усиления поступают на блок формирователя интервала, который формирует на своем выходе импульс длительностью, обратнопропорциональной скорости частицы. Для связи блока формирователя интервала с блоком микроконтроллера служит блок лазерной развязки. Сигналы со второй и третьей измерительных линеек через соответствующие усилители поступают в блок микроконтроллера. По длительностям сигналов с первой и второй измерительных линеек блок микроконтроллера формирует на своем выходе управляющие сигналы для высоковольтного усилителя. Высоковольтный усилитель формирует на своих выходах ускоряющие напряжения для четных и нечетных трубок дрейфа линейного электродинамического ускорителя.

Вакуумная система состоит из вакуумной камеры и двух систем вакуумной откачки, каждая из которых содержит форвакуумный насос НВР-5.5, диффузионный высоковакуумный насос АВДМ-160, два клапана-отсекателя КВЭ-25, проходной за-



Рис. 2. Внешний вид ускорителя.

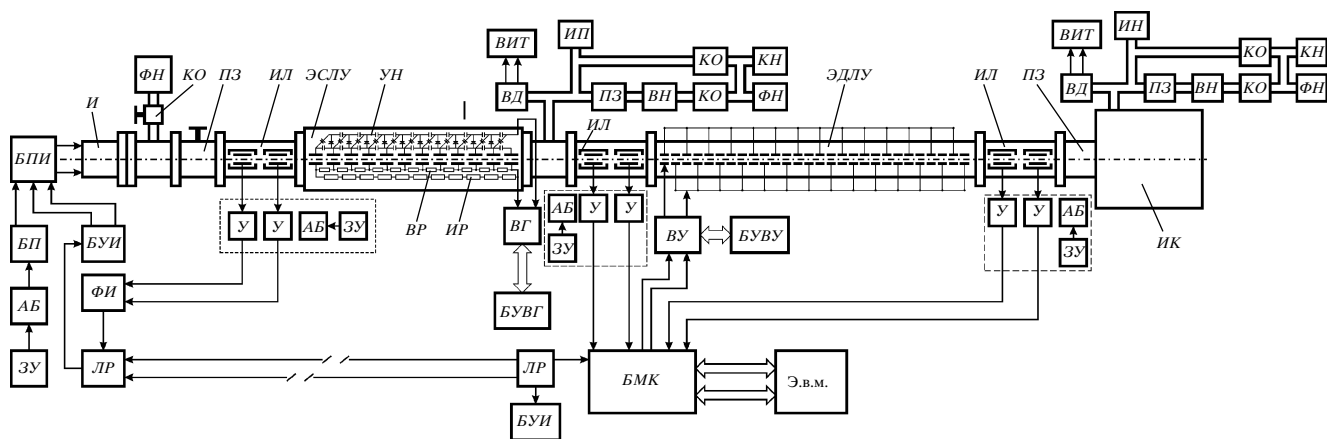


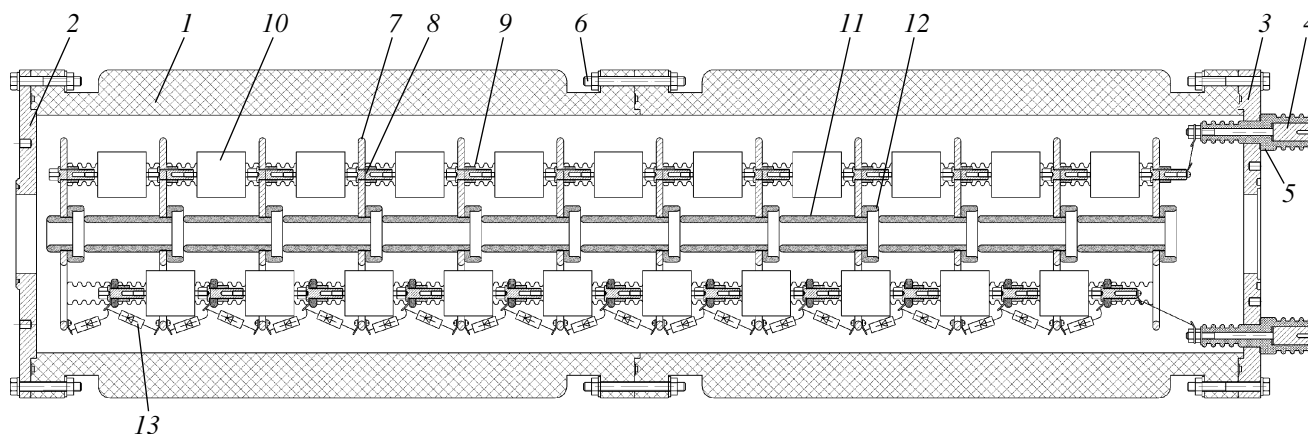
Рис. 3. Структурная схема линейного ускорителя. *И* – инжектор; *ИЛ* – измерительная линейка; *ЭСЛУ* – электростатический линейный ускоритель; *ЭДЛУ* – электродинамический линейный ускоритель; *ИК* – испытательная камера; *ФН* – форвакуумный насос; *ВН* – высоковакуумный насос; *ИН* – игольчатый натекатель; *ПЗ* – проходной затвор; *КО* – клапан-отсекатель; *КН* – клапан-натекатель; *ВД* – вакуумные датчики; *ВИТ* – вакуумметр ионизационно-термопарный; *ВР* – выравнивающие резисторы; *ИР* – измерительные резисторы; *БПИ* – блок питания инжектора; *БП* – блок питания; *АБ* – аккумуляторная батарея; *ЗУ* – зарядное устройство; *ЛР* – лазерная развязка; *БУИ* – блок управления инжектором; *ФИ* – формирователь интервала; *У* – усилитель; *ВГ* – высоковольтный генератор; *ВУ* – высоковольтный усилитель; *БУВУ* – блок управления высоковольтным усилителем; *БМК* – блок микроконтроллера; *УН* – умножитель напряжения; *БУВГ* – блок управления высоковольтным генератором.

твор 23ВЭ-100 и клапан-натекатель КН-2.5. Предельное остаточное давление в вакуумной камере составляло  $10^{-5}$  Торр.

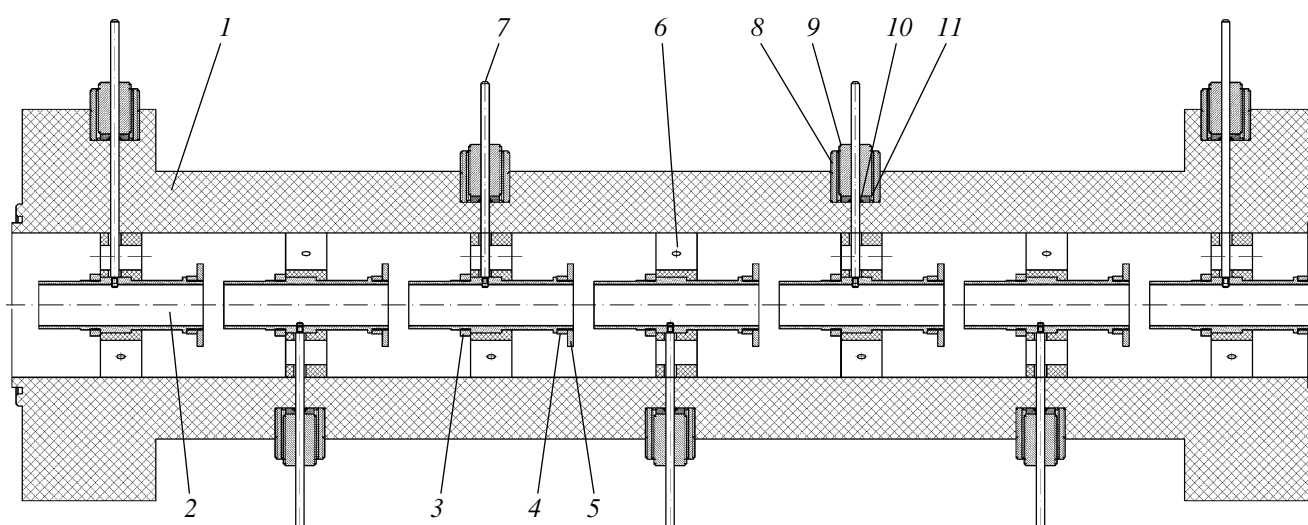
Остановимся подробнее на основных узлах линейного ускорителя.

Линейный электростатический ускоритель (ЛЭСУ) состоит из 12 дрейфовых трубок. Эффек-

тивное ускоряющее напряжение ЛЭСУ может меняться в пределах 0–150 кВ. Каскадный умножитель напряжения, обеспечивающий питание ЛЭСУ, расположен в непосредственной близости от дрейфовых трубок и размещается внутри вакуумной камеры. Питание каскадного умножителя осуществляется высоковольтным генератором, выходной каскад которого собран на воздушном



**Рис. 4.** Конструкция ЛЭСУ. 1 – корпус ЛЭСУ, 2 – левый фланец, 3 – правый фланец, 4 – электрический ввод, 5 – диэлектрическая втулка, 6 – шпилька, 7 – крепежная пластина, 8 – разъем, 9 – гайка, 10 – конденсатор, 11 – трубка дрейфа, 12 – экранирующая полеискривляющая шайба, 13 – диод.



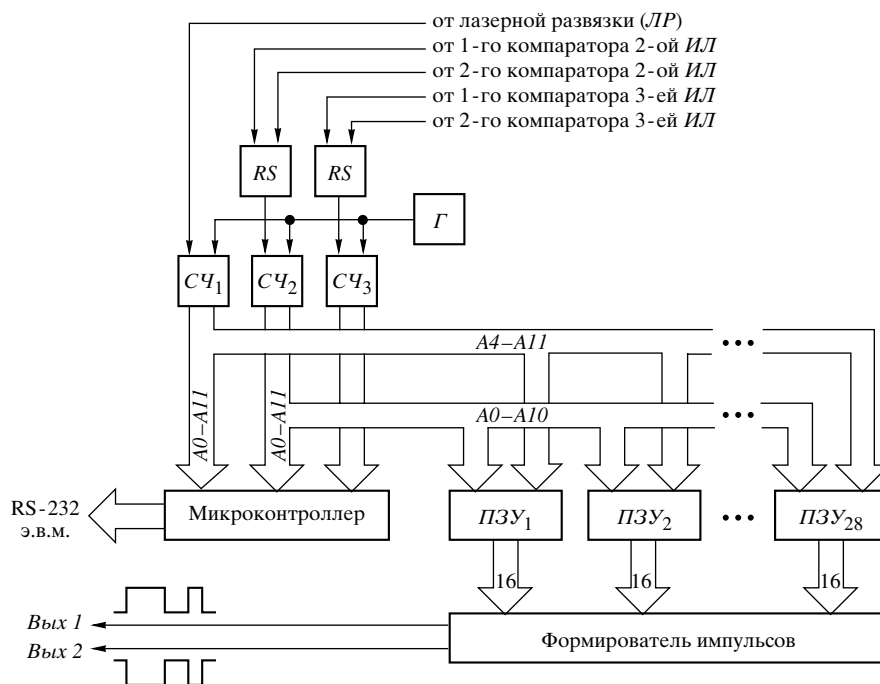
**Рис. 5.** Конструкция секции ЛЭДУ. 1 – корпус секции, 2 – трубка дрейфа, 3 – крепежная гайка, 4 – контргайка, 5 – полеискривляющая шайба, 6 – центрирующая втулка, 7 – электрический вывод, 8 – патрубок, 9 – разжимная втулка, 10 – шайба, 11 – резиновая прокладка.

трансформаторе. Конструкция ЛЭСУ приведена на рис. 4.

Линейный электродинамический ускоритель ЛЭДУ предназначен для ускорения заряженных частиц со скоростями на входе  $>430$  м/с и удельными зарядами от 1 до 164 Кл/кг. Эффективное ускоряющее напряжение ЛЭДУ составляет 450–540 кВ. Конструкция одной секции ЛЭДУ приведена ниже на рис. 5.

Длина трубок дрейфа (80 мм) выбиралась исходя из необходимости экранировки частицы в момент переключения и на время переходного процесса. При такой длине внутри трубки дрейфа имеется участок  $\sim 20$  мм, где напряженность электрического поля ослабевает на  $\sim 3$  порядка по сравнению с напряженностью электрического поля в

зазоре. Диаметр канала трубки дрейфа равен 20 мм, зазор между трубками равен 10 мм. Таким образом, длина одной ускоряющей секции равнялась 90 мм. ЛЭДУ состоит из четырех секций и включает в себя 28 трубок дрейфа: 1-я и 28-я трубки снаружи вакуумной камеры заземлены; все остальные четные и нечетные трубки дрейфа соединены между собой соответственно. Общая длина линейного электродинамического ускорителя составляет 2,52 м. Общая емкость между трубками дрейфа вместе с токоведущими кабелями составляет 1000 пФ. Напряжение на трубках дрейфа изменяется синфазно движению частицы в тракте ЛЭДУ. Для формирования напряжения на дрейфовых трубках служат блок микроконтроллера и высоковольтный усилитель.



**Рис. 6.** Функциональная схема блока микроконтроллера. Г – тактовый генератор, RS – RS-триггер, СЧ<sub>1</sub>, СЧ<sub>2</sub>, СЧ<sub>3</sub> – счетчики импульсов, ПЗУ – модуль постоянного запоминающего устройства.

Блок микроконтроллера формирует на своем выходе импульсы управления высоковольтным усилителем по входным данным с измерительных линеек. Измерительная линейка состоит из пары колец Фарадея, пролетая через которые частица наводит на них потенциал, пропорциональный ее заряду. Скорость частицы определяется как отношение расстояния между кольцами к измеренному интервалу времени между регистрацией частицы на первом и втором кольцах Фарадея. Методика измерения параметров частицы приведена в [8]. Функциональная схема блока микроконтроллера приведена на рис. 6.

Блок микроконтроллера работает следующим образом. На вход блока подаются сигнал с выхода лазерной развязки (длительность импульса обратно пропорциональна скорости частицы после инжектора), с первого и второго компараторов второй измерительной линейки (интервал времени между фронтами этих импульсов обратно пропорционален скорости частицы после линейного электростатического ускорителя) и сигнал с первого и второго компараторов третьей измерительной линейки (интервал времени между фронтами этих импульсов обратно пропорционален скорости частицы после линейного электродинамического ускорителя). Эти временные интервалы выделяются посредством RS-триггеров, и их длительности переводятся в цифровой код посредством соответствующих 12-разрядных счетчиков СЧ<sub>1</sub>-СЧ<sub>3</sub>.

Микроконтроллер передает измеренные длительности импульсов в э.в.м. по последовательному порту RS-232. Коды первого и второго счетчиков подаются на шину адреса модулей ПЗУ. Каждый из модулей ПЗУ содержит 512 К слов (524288 × 16 бит). На шине данных (выходе) каждого модуля ПЗУ формируется цифровой код нахождения частицы в середине соответствующей трубки дрейфа (количество импульсов тактового генератора формирователя импульсов до следующего переключения напряжения на трубках дрейфа). Согласно этим кодам формирователь импульсов формирует стробирующие импульсы, которые подаются на вход высоковольтного усилителя (функциональная схема усилителя приведена на рис. 7).

Частота тактового генератора составляет 8 МГц. Указанный выше диапазон скоростей и удельных зарядов частиц полностью зависит от объема модулей flash-памяти, так как на выходе блока микроконтроллера будут формироваться импульсы лишь для тех частиц, коды которых были заранее записаны в память. Таким образом, блок микроконтроллера осуществляет селекцию частиц по скоростям и удельным зарядам.

Формирователь стробирующих импульсов формирует импульсы, которые через усилители подаются на блок ламп (блок ламп содержит четыре лампы ГМИ-32Б, включенные по мостовой схеме). Высоковольтные источники напряжения питают блок ламп через батарею накопительных конденсаторов (емкостью 1 мкФ для каждой по-

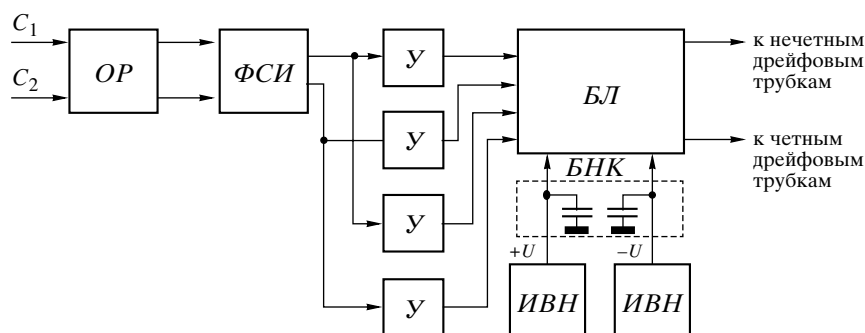


Рис. 7. Функциональная схема высоковольтного усилителя. ОР – оптическая развязка; ФСИ – формирователь стробирующих импульсов; У – усилитель; ИВН – источник высокого напряжения; БНК – батарея накопительных конденсаторов; БЛ – блок ламп.

лярности). Во время переключения напряжения на трубках дрейфа расходуется большое количество энергии, и источники высокого напряжения не могут ее обеспечить. Батарея накопительных конденсаторов обеспечивает энергией блок ламп на время формирования пачки импульсов (длительность всей пачки  $\leq 5$  мс). Затем в течение нескольких секунд идет восстановление напряжения на батарее накопительных конденсаторов.

#### ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При работе с ускорителем в качестве частиц использовалась алюминиевая пудра ПАП-1 ГОСТ 5494-95, состоящая из чешуйчатых частичек со средним размером  $\leq 80$  мкм. Большинство частиц ( $>75\%$ ) имеет средний размер  $<25$  мкм. Однако в инжекторе форма частиц изменяется из-за многократного соударения с поверхностями инжектора. Инжектор, используемый для экспериментов, описан в [8]. Напряжение линейного электродинамического ускорителя составляло 145 кВ. Амплитуда напряжения на трубках дрейфа линейного электростатического ускорителя равнялась 10 кВ. Таким образом, общее эффективное ускоряющее напряжение составило 665 кВ. В ходе эксперимента измерялись скорости частиц после инжектора, линейного электростатического и электродинамического ускорителей. Скорость частиц определялась по времени пролета частиц между кольцами Фарадея каждой из измерительных секций.

Распределения частиц по скоростям представлены на рис. 8. Как видно на рисунке, скорости частиц в линейном электростатическом ускорителе увеличивались в  $\sim 3$  раза по отношению к скоростям частиц после инжектора, а в электродинамическом ускорителе в 2 раза по отношению к скоростям после линейного электростатического ускорителя. Таким образом, скорость частиц на выходе ускорителя в 6 раз выше, чем на его входе. Такие результаты хорошо согласуются с расчетом.

На рис. 9 приведены экспериментальная и теоретическая зависимости скорости частиц на выходе линейного электродинамического ускорителя от их массы.

Для определения массы частиц определялся удельный заряд частиц по измеренным скоростям частицы до и после линейного электростатического ускорителя при известном эффективном ускоряющем напряжении:

$$\frac{Q}{m} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2U_0} = \frac{(L/\Delta T_2)^2 - (L/\Delta T_1)^2}{2U_0}, \quad (3)$$

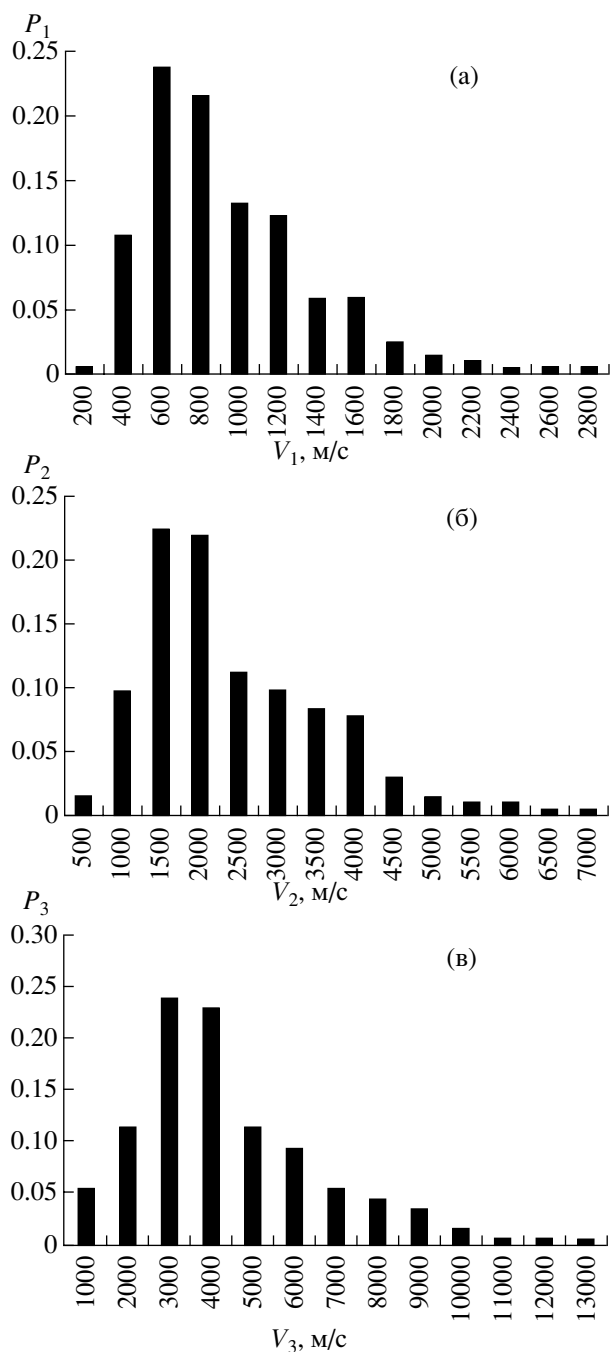
где  $V_1, V_2$  – скорости частицы до и после линейного электростатического ускорителя соответственно,  $L$  – расстояние между кольцами Фарадея (база колец),  $\Delta T_1, \Delta T_2$  – измеренные временные интервалы,  $U_0$  – эффективное ускоряющее напряжение линейного электростатического ускорителя.

Масса частиц определялась как частное удельного заряда, рассчитанного по формуле (3), и заряда частиц, рассчитанного по формуле

$$Q = CU_A, \quad (4)$$

где  $Q$  – заряд частицы,  $C$  – емкость кольца Фарадея,  $U_A$  – амплитуда сигнала, измеренная с помощью осциллографа.

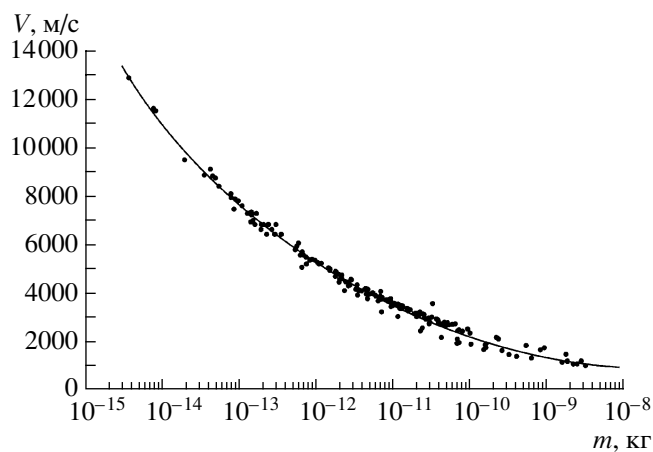
Как видно на рис. 9, экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Разброс экспериментальных данных связан, в основном, с разрядом батареи конденсаторов, от которых питается высоковольтный генератор. Так как частицы следуют не с постоянным интервалом, то выставить строго постоянное напряжение питания высоковольтного усилителя затруднительно, однако существующее отклонение не является критическим для нормального функционирования ускорителя. К тому же спад амплитуды импульсов в пачке можно учесть при отладке рабочего режима ускорителя.



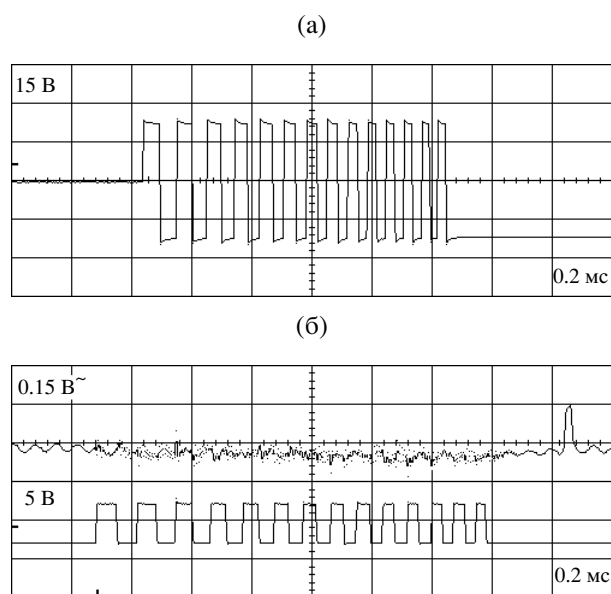
**Рис. 8.** Распределения частиц по скоростям: **а** – после инжектора, **б** – после линейного электростатического ускорителя, **в** – после линейного электродинамического ускорителя.

На рис. 10 приведены осциллограммы, поясняющие процесс отладки рабочего режима линейного электродинамического ускорителя.

Напряжение на трубках дрейфа снималось через делитель. Амплитуда сигнала на рис. 10а составляет 10 кВ. Видно, что имеет место экспоненциальный спад напряжения на вершинах импульсов, ко-



**Рис. 9.** Зависимость конечной скорости частиц от массы (точки – эксперимент, линия – расчет).



**Рис. 10.** **а** – осциллограмма напряжения на нечетных трубках дрейфа, **б** – осциллограммы напряжения на входе высоковольтного усилителя и сигнала с последнего кольца Фарадея.

торый зависит от схемотехнических особенностей высоковольтного усилителя. Этот спад напряжения можно легко учесть в расчете. По интервалу времени между последним импульсом на трубках дрейфа и импульсом с последнего кольца Фарадея при известном между ними расстоянии и скорости частицы можно определить, отстаёт или опережает напряжение от координаты частицы, и внести нужные изменения в модуль ПЗУ.

Итак, описанный в данной статье ускоритель для моделирования микрометеоритов отличается от ранее известных принципом действия. Все трубки дрейфа в данном ускорителе выполнены

одинаковыми, а синхронизация положения частицы с ускоряющим напряжением достигается путем формирования ускоряющего напряжения как функции начальной скорости и удельного заряда частиц, что позволило существенно расширить диапазон ускоряемых частиц. Без какой-либо перестройки наблюдалось устойчивое ускорение частиц в диапазоне удельных зарядов 1–100 Кл/кг. Дальнейшее увеличение удельного заряда частиц требует использования других материалов, а в целом расчетный диапазон ускоряемых частиц составил 0.1–146 Кл/кг. Расчетные параметры хорошо согласуются с практическими результатами. Небольшие габариты делают возможным использование ускорителя не только для научных исследований физики высокоскоростного удара, но и для решения прикладных задач.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержиевский Л.А., Титов В.М., Фадеенко Ю.И., Швецов Г.А. // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 5. С. 77.
2. Фадеенко Ю.И. Высокоскоростной удар. Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы. Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики СО АН СССР, 1967. Вып. 1; 1972. Вып. 2; 1976. Вып. 3; 1979. Вып. 4.
3. Becker D.G., Frichtencht J.F. // Nucl. Sci. 1965. V. NS-12. № 3. P. 699.
4. Слеттери, Беккер, Хамермени, Рой. // Приборы для научных исследований. 1973. Т. 44. № 6. С. 89; Slattery J.C., Becker D.G., Hamermesh B., Roy N.L. // Rev. Sci. Instrum. 1973. V. 44. № 6. P. 755.
5. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Помельников Р.А. // Патент на изобретение № 2205525 РФ. 2003. С. 2.
6. Семкин Н.Д., Пияков А.В. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Самара. 2003. № 3. С. 86.
7. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е. // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 7. С. 24.
8. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Шепелев С.М. // ПТЭ. 2006. № 3. С. 154.