

УДК 621.384.62

Эволюция и перспективы развития устройств для моделирования микрометеоритов в лабораторных условиях

Н. Д. Семкин, А. В. Пияков, А. П. Погодин

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева,
г. Самара, Россия

Рассмотрены различные конструкции инжекторов заряженных частиц и ускорителей для моделирования столкновения микрометеоритов с материалами элементов конструкций космических аппаратов в лабораторных условиях. Показана эволюция таких устройств и предложены пути их дальнейшего развития.

Введение

Проблема изучения высокоскоростного воздействия частиц на материалы космических аппаратов (КА) возникла более 50-ти лет назад, однако вследствие появления новых материалов и всеувеличивающейся концентрации техногенных высокоскоростных частиц на орбитах Земли остается актуальной и по сегодняшний день.

Как показала практика, наиболее целесообразным является лабораторное моделирование столкновения ускоренных частиц с различными материалами, так как при нем возможны не только высокая повторяемость и контролируемость эксперимента, но и с достаточной достоверностью измерение параметров частиц. Так как на космические аппараты воздействует достаточно широкий диапазон масс частиц, то очевидно, что моделировать их с помощью одного устройства затруднительно.

Стоит отметить, что в последнее время в космической промышленности появляются и находят применение новые материалы, что обуславливает необходимость проведения ударных экспериментов. По проблеме защиты космических материалов от микрометеоритов регулярно проводятся конференции (например, в 2006 г. во Франции состоялись 10-й международный симпозиум "Materials in a Space Environment" и 8-я международная конференция "Protection of Materials and Structures in a Space Environment"; в 2007 г. IEEE провела 22-ю международную конференцию "Particle Accelerator Conference", в 2008 г. аналогичная конференция проведена в Канаде "The Ninth International Space Conference Protection of Materials and Structures from the LEO Space Environment", Toronto, Canada, 19—23 May, 2008).

Техника высокоскоростного метания представляет интерес не только с точки зрения моделирования факторов космической среды на материалы конструкций КА, но и с точки зрения подпитки термоядерных реакторов топливом [1]. Таким образом, очевидной необходимостью является построение различных ускорителей, которые охватывают весь диапазон масс требуемых частиц.

Для имитации воздействия микрометеоритов и техногенных частиц на материалы конструкций КА, а также для создания и калибровки новых микрометеоритных датчиков существуют различные способы ускорения пылевых частиц в лабораторных условиях. Тип и конструкция ускорителя определяются поставленной задачей и зависят от диапазона исследуемых масс и скоростей ускоряемых частиц. Достаточно полные обзоры взрывных ускорителей, легкогазовых пушек и рельсотронных ускорителей приведены в работах [2—4].

Настоящая статья является обзором устройств ускорения заряженных частиц посредством электрического поля, построенных за последнее время. Рассматриваются эволюция и перспективы развития ускорителей как средства ускорения микронных частиц для моделирования микрометеоритов в лабораторных условиях.

Инжекторы заряженных частиц

Неотъемлемой частью любого ускорителя микронных частиц, использующего в качестве ускоряющей силы силу электрического поля, является инжектор частиц. Чем больший заряд получит частица в инжекторе, тем большую скорость она будет иметь на выходе ускорителя.

Все существующие инжекторы частиц можно разделить на два вида: с контактным и бесконтактными способами зарядки частиц. Первые в качестве зарядного электрода используют либо острую иглу, либо метелку тонких нитей. Во втором виде инжекторов заряд частице сообщается путем воздействия на нее различных видов ионизирующего излучения.

По типу заряжаемых частиц все инжекторы можно разделить на инжекторы твердых и жидких частиц.

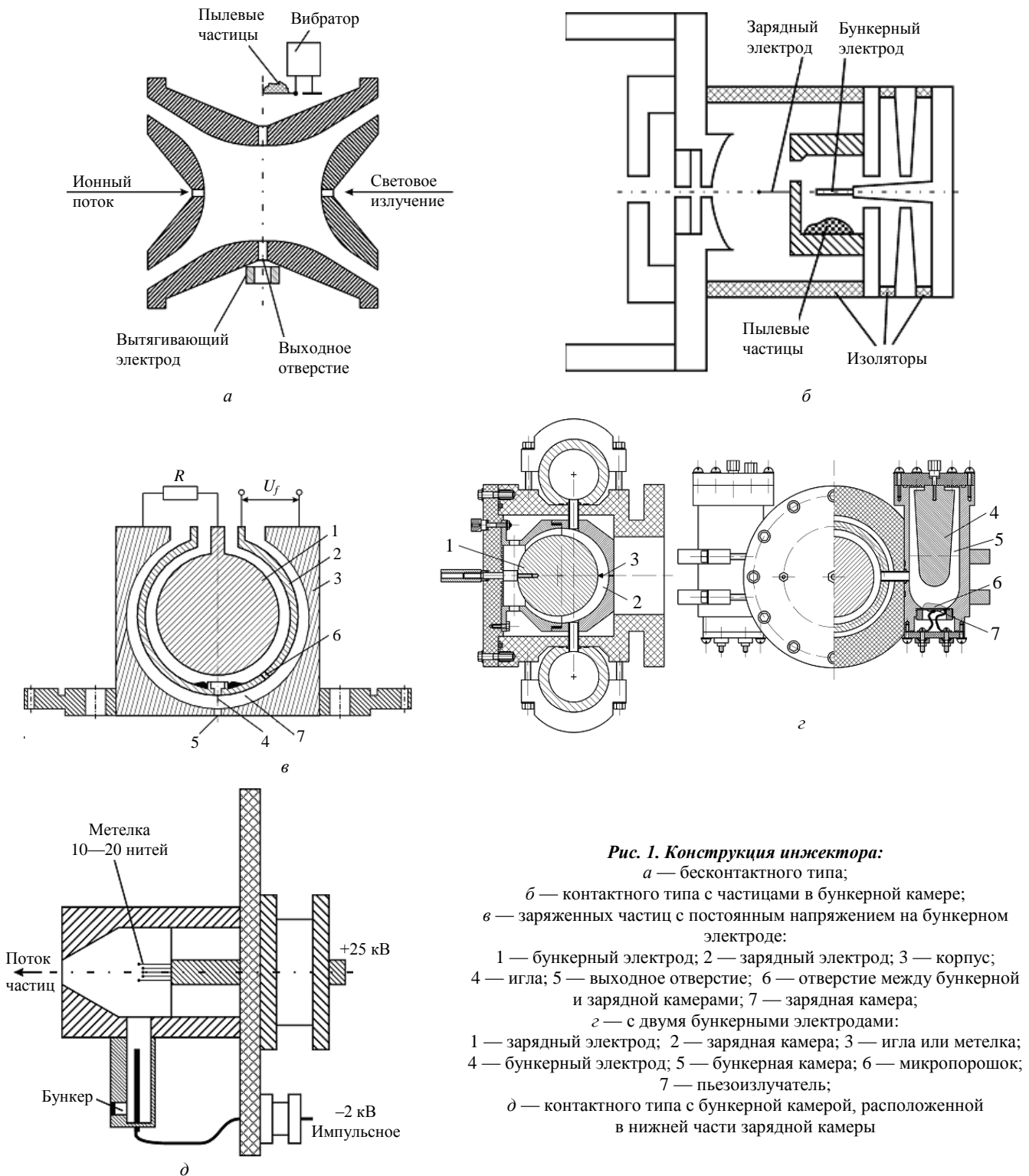
Очевидно, что максимальный заряд частицы может соответствовать максимальной напряженности электрического поля у поверхности частицы (для положительно заряженных частиц максимальная поверхностная напряженность поля составляет 10^{10} В/м, для отрицательно заряженных частиц — 10^9 В/м). Дальнейшее увеличение заряда

невозможно вследствие автоионной или автоэлектронной эмиссии.

Рассмотрим различные конструкции инжекторов подробнее.

• Одним из первых в литературе был описан *инжектор частиц бесконтактного типа* [5, 6]. Его конструкция приведена на рис. 1, а, из которого видно, что под действием вибраций пылевые частицы покидают бункерную камеру и под действием силы тяжести поступают в зарядную каме-

ру. Вследствие действия ионизирующего излучения они приобретают некоторый заряд, после чего через выходное отверстие частицы поступают в ускорительный тракт. Специальные электроды обеспечивают удержание частиц гиперболическим полем в точке действия ионизирующих излучений. За выходным отверстием устанавливается вытягивающий электрод, который создает электрическое поле, способное вытянуть из инжектора заряженную частицу.



Как отмечают авторы, получение частицей максимального заряда занимает 1 ч. В процессе зарядки автоионная эмиссия сглаживает все неровности частицы, что позволяет сообщить ей максимально возможный заряд. Вследствие достаточно продолжительного времени заряда бесконтактные инжекторы не получили широкого распространения.

- Существует множество *инжекторов контактного вида* [6—12]. Все они в своей конструкции содержат один (или несколько) зарядных электродов, выполненных в виде иглы, а также бункерную камеру, в которую помещаются частицы. Конструкция инжектора, описанного в [5], приведена на рис. 1, б.

В данном инжекторе частицы предварительно помещают в бункерную камеру и вытягивают из нее посредством электрического поля, создаваемого импульсным напряжением на бункерном электроде. Частицы покидают инжектор, как только коснутся острия зарядного электрода. Как отмечают авторы, при диаметре острия 4 мкм и потенциале 8 кВ частицы диаметром 0,1—10 мкм получают заряд, соответствующий поверхностной напряженности электрического поля $6,5 \cdot 10^9$ — 10^9 В/м. Данный тип инжектора способен генерировать поток заряженных частиц с широким статистическим распределением масс и скоростей.

- Дальнейшее развитие инжекторов контактного типа позволило отказаться от импульсного напряжения на бункерном электроде. Например, на рис. 1, в показана *конструкция инжектора заряженных частиц*, разработанная в НИИЯФ МГУ [6]. Данный тип инжектора также уменьшает вероятность загрязнения вакуумной камеры пылевыми частицами.

Инжектор работает следующим образом. На зарядный электрод 2 подается напряжение, а бункерный электрод 1 через высокоомный резистор соединяется с корпусом (заземленным контактом). Так как бункерный и зарядный электроды образуют сферический конденсатор, то на бункерном электроде будет некоторый потенциал, под действием которого находящаяся в бункерной камере пыль начнет “подниматься”. По мере заполнения полости бункерной камеры частицами электрическая проводимость зазора между бункерным и зарядным электродами начнет увеличиваться, а сопротивление падать, и за счет резистора потенциал бункерного электрода уменьшится, что в свою очередь уменьшит поток частиц, покидающих бункерную камеру. Меняя сопротивление, можно устанавливать требуемый поток частиц в широких пределах. В работе [6] авторы отмечают, что при напряжении на зарядном электроде 10—15 кВ скорости металлических частиц диаметром 0,1—5 мкм

на выходе инжектора составляли от 0,5 до 5 км/с. Как указывается в [6], зависимость скорости частиц от потенциала имеет два характерных участка: на первом скорость пропорциональна напряжению зарядного электрода, а на втором — пропорциональна квадратному корню из напряжения зарядного электрода.

Данный инжектор, взятый в качестве прототипа, был усовершенствован [7]. Размеры зарядной камеры были увеличены для повышения потенциала на зарядном электроде до 25 кВ, а число бункерных камер было увеличено до двух, чтобы обеспечить возможность работы с двумя материалами без развакуумирования инжектора.

- *Конструкция инжектора с двумя бункерными электродами* приведена на рис. 1, г.

Инжектор функционирует следующим образом. При подаче высокого напряжения на бункерный электрод 4 частицы микропорошка приходят в движение под действием электрического поля. В результате хаотического движения частиц в бункерной камере через соединительную втулку происходит выброс частиц в полость зарядной камеры, образованной левой, правой полусферами и зарядным электродом. В зарядной камере частицы микропорошка продолжают свое хаотическое движение, пока не коснутся острия иглы. При соприкосновении частицы с иглой ей сообщается заряд, и под действием электрического поля частица покидает зарядную камеру через выходное отверстие. Применение двух бункерных камер делает возможным использование двух различных микропорошков без развакуумирования инжектора.

Величина напряжения на бункерном электроде зависит от характеристик микропорошка и величины требуемого потока частиц на выходе инжектора. Если микропорошок имеет высокую насыпную плотность, то сложно “вытянуть” отдельные частицы из общей массы под действием только электрического поля. В этом случае вместо увеличения напряжения на бункерном электроде наиболее целесообразным является придание частицам механического импульса, для чего в дно бункерной камеры вмонтирован пьезоизлучатель, который питается переменным напряжением резонансной частоты (эта частота меняется в зависимости от количества микропорошка в бункере и составляет от 2 до 15 кГц).

Величина напряжения на зарядном электроде зависит от потока частиц, поступающего через соединительную втулку в полость зарядной камеры, и геометрии зарядной камеры. Она устанавливается максимально возможной в пределах 20—25 кВ.

Частицы алюминиевой пудры “ПАП-1” с помощью данного инжектора приобретали скорость 200—1550 м/с (соответственно, для диапазона

масс $9 \cdot 10^{-10} \div 1,1 \cdot 10^{-8}$ г или диапазона диаметров 1—3 мкм). Заряд частиц соответствовал диапазону поверхностной напряженности электрического поля частицы 10^9 — $7,5 \cdot 10^9$ В/м. Наиболее вероятная поверхностная напряженность электрического поля частицы составила $2 \cdot 10^9$ В/м.

• Еще одним путем уменьшения вероятности загрязнения камеры ускорителя пылевыми частицами была конструкция инжектора контактного типа с бункерной камерой, конструктивно выполненной в нижней части зарядной (см. рис. 1, д), что делает возможным проникновение в область зарядной камеры числа частиц, пропорционального импульсу напряжения на бункерном электроде. Конструкция описана в [8] и, как отмечается, частицы диаметром 1—10 мкм на выходе инжектора имеют скорость до 3 км/с.

• С проблемой загрязнения вакуумной камеры нейтральными и плохо заряженными частицами столкнулись и авторы работы [9]. Для решения этой задачи ими была предложена следующая конструкция инжектора (рис. 2).

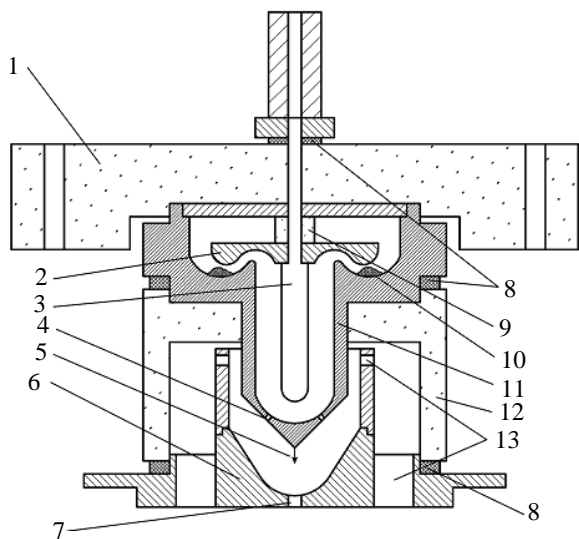


Рис. 2. Инжектор заряженных частиц:

1 — крышка из оргстекла; 2 — диск-отражатель из дюралюминия; 3 — внутренний электрод из отражающей стали; 4 — отверстие для прохода частиц и вакуумной откачки; 5 — заряжающая игла из вольфрама; 6 — катод-основание из дюралюминия; 7 — выходной коллиматор; 8 — витоновые вакуумные уплотнители; 9 — втулка-изолятор из оргстекла; 10 — рабочий порошок; 11 — анод из дюралюминия; 12 — корпус из оргстекла; 13 — отверстия для откачки

В данной конструкции инжектора применен тот же способ сообщения электрического заряда частицам микропорошка — путем контакта их с сильнозаряженным острием (иглой). Однако микропорошок помещается в специальном бункере вне полости, где происходит зарядка частиц и откуда они попадают в ускорительную трубку.

В результате доступ незаряженных частиц в область выходного отверстия-коллиматора оказывается сильно затруднен. Сравнительно большой объем бункера позволяет одновременно загружать в инжектор значительно большую, чем раньше, порцию порошка (до 1 см^3), что вместе с практическим отсутствием "высыпания" незаряженных частиц существенно увеличивает время рабочего цикла между двумя загрузками (до нескольких десятков—сотен часов в зависимости от требуемой интенсивности потока).

Как отмечают авторы, такая модель инжектора заряженных частиц позволяет увеличить их поток до 10^3 с^{-1} на выходе ускорительной трубки без увеличения опасности загрязнения ее "пылью" из нейтральных и слабозаряженных частиц. Система автофокусировки ускоряемых частиц практически устраняет их рассеяние на электродах и изоляторы ускорительной трубки.

• Дальнейшим развитием конструкций инжекторов можно считать конструкцию инжектора с добавленной промежуточной камерой (рис. 3, а) [10].

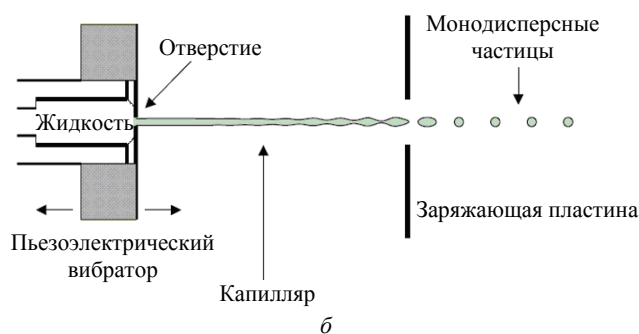
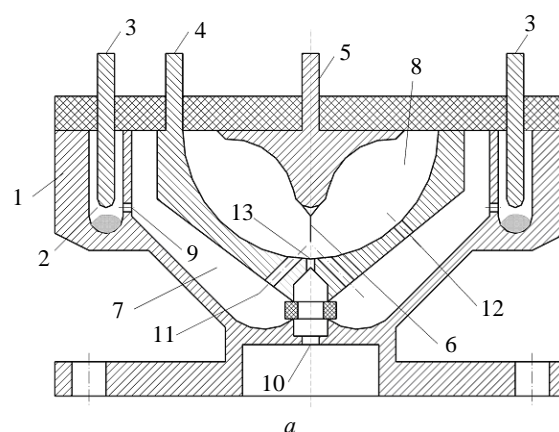


Рис. 3. Конструкция инжектора:

а — с промежуточной камерой; б — жидких частиц

Данный инжектор содержит корпус 1 (см. рис. 3, а), в котором по окружности выполнены бункерные камеры 2 с расположенными в них бункерными электродами 3. В полости корпуса установлен промежуточный электрод 4 со сферической внут-

ренной поверхностью, а в крышке корпуса — зарядный электрод 5 с размещенной на нем иглой 6. Промежуточная камера 7 образована корпусом и внешней поверхностью промежуточного электрода, зарядная камера 8 образована внутренней поверхностью промежуточного электрода и зарядным электродом. В корпусе выполнены отверстия 9, соединяющие полости бункерных камер 2 с промежуточной камерой 7, и отверстие 10, выполненное в корпусе соосно с иглой 6. В промежуточном электроде выполнены отверстия 11 и 12, соединяющие полость промежуточной камеры 7 с полостью зарядной камеры 8, и отверстие 13, выполненное в промежуточном электроде по оси зарядного электрода.

Геометрия промежуточной камеры выбрана таким образом, чтобы силовая линия с наименьшей напряженностью в этой камере находилась напротив отверстий 12 и проходила через отверстия 11 в направлении иглы 6.

Устройство работает следующим образом. Пылевые частицы находятся в бункерной камере, которая соединена через отверстие 9 с объемом промежуточной камеры 7, образованной корпусом и промежуточным электродом 4. В общем случае таких бункерных камер в источнике заряженных пылевых частиц может быть несколько, каждый для своего сорта пылевых частиц. При подаче напряжения на бункерный электрод пылевые частицы начинают через отверстия 9 поступать в промежуточную камеру, где, двигаясь по силовым линиям электрического поля через отверстия 11, попадают в область иглы 6. Если пылевая частица после зарядки не попала в выходное отверстие 13, или если не коснулась иглы 6, то она смещается в зону слабого поля в районе отверстий 12, через которые она попадает обратно в промежуточную камеру.

Таким образом, для создания потока заряженных частиц, равного потоку прототипа, необходимо приблизительно в 100 раз меньшее количество пылевых частиц, кроме того, попадание в объем ускорителя недостаточно заряженных частиц практически исключается. Эта конструкция дает возможность создать поток частиц со значительно большей средней скоростью, чем у описанных ранее.

Возможно также комбинирование удачных решений. Например, в бункерные камеры инжектора, представленного на рис. 3, б, были добавлены пьезоизлучатели [11].

Таким образом, можно сделать вывод, что дальнейшее развитие конструкций инжекторов заряженных частиц будет идти по пути усложнения форм электродов в целях придания частицам максимального заряда и уменьшения вероятности проникновения плохо заряженных частиц в ускорительный тракт.

- Отдельным классом инжекторов заряженных частиц можно считать *инжекторы жидких заряженных частиц*. Одна из возможных конструкций такого инжектора приведена в работах [12, 13].

Капельки, произведенные с использованием пьезоэлектрического вибратора через отверстия, поступают в зарядную камеру. Частота следования капелек составляет 52 кГц. Капельки, полученные при использовании отверстия диаметром 15 мкм, имеют диаметр 28 мкм. Полученные капельки заряжаются с помощью заряжающей пластины. Из-за механических ограничений отверстие должно быть увеличено на внешней стороне металлической пластины, таким образом, область электрического поля в отверстии является очень маленькой. Однако реактивная струя жидкости остается неповрежденной на расстоянии до нескольких миллиметров. Заряжающая пластина должна быть помещена после точки, в которой реактивная струя жидкости разбивается на капельки так, чтобы формирование капельки имело место в пределах области высокого электрического поля. Отверстие бункерной камеры имеет два главных преимущества для того, чтобы произвести высоко заряженные водные/ледяные капельки в вакууме. Прежде всего жидкость остается в относительно большом объеме и находится в контакте с металлом вплоть до точки, в которой она входит в вакуум, позволяя лучший тепловой контакт с жидкостью по сравнению с капилляром с жидкостью в теплоизолированном наконечнике, а следовательно, жидкость с меньшей вероятностью замерзнет перед входом в отверстие. Второе преимущество состоит в том, что жидкость подвергается острому градиенту давления в отверстии, таким образом кипит, гидростатическое давление понижается постепенно около конца, а пузыри быстро разрушаются. Недостатком такого инжектора является диапазон размеров возможных частиц. Размеры капельки составляют около 25 мкм.

Еще один инжектор жидких частиц описан в [14]. Его конструкция приведена на рис. 4.

Инжектор работает следующим образом. Жидкость через игольчатый натекатель 1 малыми дозами подается в камеру подготовки жидкости 2 в резервуаре 3 с крышкой 4. При этом жидкость начинает бурно кипеть, давление резко увеличивается, но так как объем поступившей жидкости мал, она быстро обезгаживается, и вакуум восстанавливается. Затем жидкость поступает в капилляр 5 с игольчатым электродом 6, на который подается высокий потенциал через междукламерную крышку 7. В камере диспергирования 8 на конце капилляра 5 мениск жидкости принимает форму сфероида и при появлении достаточного заряда на поверхности жидкости под действием электриче-

ских сил начинает вытягиваться и принимать форму тонкой струи. Последняя под действием поверхностных сил дробится на маленькие частицы, диаметр которых тем меньше, чем меньше диаметр мениска. Данный инжектор высокоскоростных заряженных жидких частиц позволяет получать потоки частиц с частотой следования 5—500 Гц при диаметре частиц 0,05—10 мкм и со скоростями от 0,1 до 2 км/с.

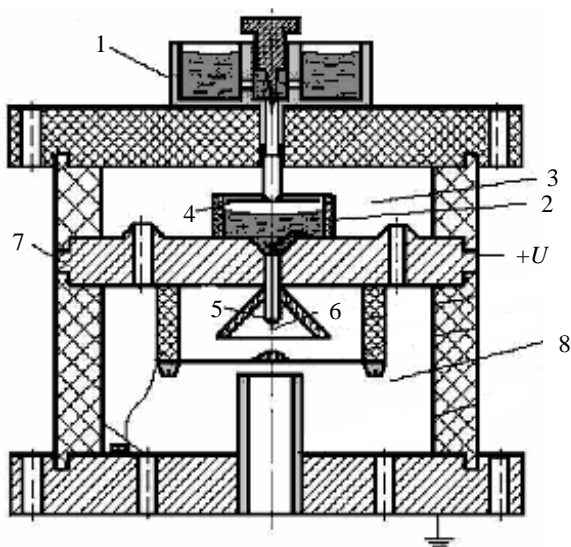


Рис. 4. Инжектор жидких пылевых частиц

Из рассмотренных выше типов инжекторов можно сделать следующие выводы:

наиболее распространенным и перспективным на данный момент является контактный способ зарядки частиц;

для достижения наиболее эффективной зарядки частиц увеличивается длина траектории частицы от бункера до выходного отверстия, что позволяет избежать попадания в тракт плохо заряженных частиц.

Дальнейшее развитие инжекторов пойдет по пути изменения конфигурации электродов без изменения способа зарядки частиц.

Ускорители заряженных пылевых частиц

Первые электростатические ускорители использовали в качестве источника напряжения генератор Ван-де-Граафа [15, 16]. Напряжение с генератора Ван-де-Граафа подается на любую ускорительную трубку. Приращение скорости в таком ускорителе описывается выражением

$$V_{fin} = \sqrt{V_i^2 + 2 \frac{Q}{m} T_0 U_0},$$

где V_{fin} — конечная скорость частиц;
 V_i — скорость инжекции частиц;

Q — заряд частиц;

m — масса частиц;

T_0 — коэффициент полезного действия ускоряющей системы;

U_0 — выходное напряжение генератора.

Основным недостатком такого метода ускорения является громоздкость конструкций электростатических генераторов (шары могут достигать в диаметре нескольких метров). К тому же при больших напряжениях шары этих генераторов помещают в камеры с инертным газом, что во много раз усложняет конструкцию. К достоинствам этого типа ускорителей следует отнести возможность ускорения ими всего диапазона частиц.

В более поздних модификациях генератор Ван-де-Граафа был заменен каскадным умножителем напряжения, что упростило конструкцию в целом и позволило использовать ускоритель на небольшие напряжения порядка сотен киловольт в прикладных целях. Однако такие ускорители находят применение в лабораторном моделировании микрометеоритов до сих пор как в России (НИИЯФ МГУ), так и за рубежом (факультет ускорителей ядерного института имени Макса Планка, Хайдельберг, Германия).

Из вышесказанного следует, что основной проблемой является построение высоковольтных источников. В связи с этим развитие получили ускоряющие системы, в которых частица ускоряется, проходя много относительно низковольтных промежутков, так называемые линейные электродинамические ускорители. Так, в работах [17—19] авторы предлагают ускоритель, структурная схема которого приведена на рис. 5.

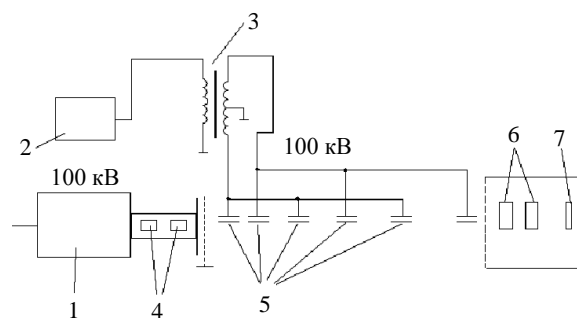


Рис. 5. Ускоритель с переключающимися электродами:

1 — инжектор и линейный ускоритель; 2 — генератор ускоряющего напряжения; 3 — высоковольтный трансформатор; 4, 6 — детектор скорости и заряда; 5 — система ускоряющих электродов; 7 — мишень

После вылета из инжектора частица направляется к ускорительной трубке и влетает в первую трубку дрейфа. Полярность напряжения на трубках дрейфа меняется с частотой генератора синусоидального напряжения (в данном случае 36 кГц). Если частица пролетает через все трубки дрейфа

синфазно с изменением полярности напряжения, то она получает приращение скорости. Длины ускорительных секций (расстояние между центрами соседних трубок дрейфа) выбраны таким образом, что ускоряющаяся частица проводит в каждой ускорительной секции одинаковое время. Ускорение частиц производится на спаде синусоидального напряжения, что обеспечивает дополнительную фокусировку. Проходя каждую ускорительную секцию, частица получает приращение скорости, т. е. имеем

$$V_{ex} = \sqrt{V_{in}^2 + 2 \frac{Q}{m} TU},$$

где V_{ex} — скорость частицы на выходе ускорительной секции;
 V_{in} — скорость частицы на входе ускорительной секции;
 Q — заряд частиц;
 m — масса частиц;
 T — коэффициент полезного действия ускоряющей секции;
 U — разность потенциалов соседних трубок дрейфа.

Длина трубок дрейфа определяется соотношением

$$L_n = L_0 \sqrt{\frac{n + n_0}{n_0}},$$

где L_0 — длина нулевой ускорительной секции;
 n — номер ускорительной секции;
 n_0 — отношение напряжения предускорителя к размаху импульсов на трубках дрейфа.

С помощью этого ускорителя авторы [17—19] разгоняют частицы до скоростей 11—47 км/с.

Достоинство этого ускорителя — получение большого эффективного ускоряющего напряжения без применения громоздких высоковольтных генераторов.

К недостаткам следует отнести необходимость использования высоковольтных предварительных ускорителей (в данном случае ускоритель Ван-де-Граафа), так как данная ускорительная система может работать только на линейном участке характеристики приращения. К тому же предъявляются большие требования к инжектору частиц, т. е. инжектируемые частицы должны иметь малый разброс масс и зарядов (в данном случае использовались частицы с удельным зарядом 30 Кл/кг). Кроме того, подстройка частоты неуправляема от удельного заряда частиц, ее выставляют вручную, что приводит к малому коэффициенту полезного действия ускорителя.

Данный ускоритель был модернизирован [20]: введена автоматическая настройка частоты как

функция от скорости влета частиц в тракт ускорителя. Схема этого ускорителя приведена на рис. 6.

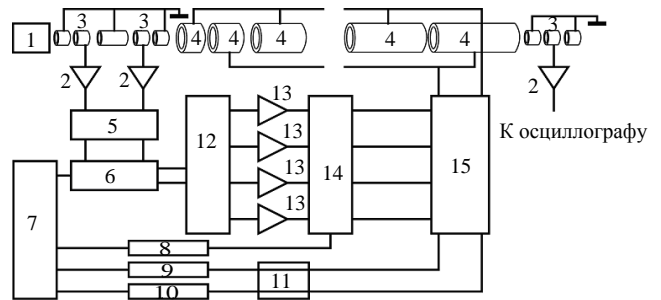


Рис. 6. Структурная схема модифицированного ускорителя:
 1 — ускоритель с генератором Ван-де-Граафа; 2 — усилитель сигнала; 3 — индукционный датчик; 4 — трубки дрейфа; 5 — селектор скоростей; 6 — система генерирования частоты; 7 — пульт управления; 8—10 — источники питания +25, +70 и -70 кВ, соответственно; 11 — батарея конденсаторов; 12 — схемы формирования импульсов; 13 — усилители; 14 — возбудители; 15 — высоковольтные переключатели

Ускоритель работает следующим образом. После прохождения ускорителя Ван-де-Граафа, частицы инжектируются в тракт ускорителя. Напряжение на трубках дрейфа имеет прямоугольную форму и меняет полярность в момент нахождения частицы в середине каждой трубки дрейфа. Частота прямоугольных импульсов является функцией от скорости инжекции частиц, а также от геометрии ускорительного тракта.

Для определения скорости частиц после ускорителя с генератором Ван-де-Граафа установлена пара индукционных датчиков. Так как скорость частицы с прохождением ускоряющих секций растет, то для сохранения синфазности движения частицы с напряжением на трубках дрейфа каждая последующая ускорительная секция должна иметь больший по сравнению с предыдущей продольный размер.

Для настройки ускорителя на оптимальный выход и наиболее эффективную работу сигналы от детектора частиц на выходе ускорителя наблюдаются на осциллографе, развертка которого запускается последним высоковольтным переключающим импульсом. Если частица находится в фазе с приложенным напряжением, то в момент поступления этого импульса она проходит через центр последней дрейфовой трубки. Поскольку расстояние между последней дрейфовой трубкой и детектором известно, этим методом можно точно измерить фазу частицы и подобрать начальные условия (фаза на входе, отношение напряжений при инжекции, спад) таким образом, чтобы получить правильную фазу на выходе. Когда начальные условия изменяют так, чтобы увеличить запаздывание фазы частиц на выходе, наступает ситуация, когда частицы попадают на выход слишком позд-

но и, очевидно, ускоряются неполностью. Выпадая из синхронизма с приложенным напряжением, эти частицы, наоборот, замедляются. И тем не менее они проходят, поскольку, проходя промежуток во время спада напряжения, они подвергаются сильной фокусировке.

Если теперь начальные условия менять в обратную сторону, добиваясь опережения по фазе на выходе, наступает момент, когда пропускание резко уменьшается. Диапазон начальных условий, при которых система работает надлежащим образом, хорошо согласуется с расчетами. На выходе легко выделить любую частицу со скоростью до 30 км/с при частоте следования две частицы в минуту. Однако скорость частиц является функцией не только скорости влета в ускорительный тракт, но и функцией удельного заряда частиц.

Таким образом, проблема широкого диапазона ускоряемых частиц сохранилась и в данной конструкции.

Интерес представляет ускоритель [6], схема которого приведена на рис. 7, а.

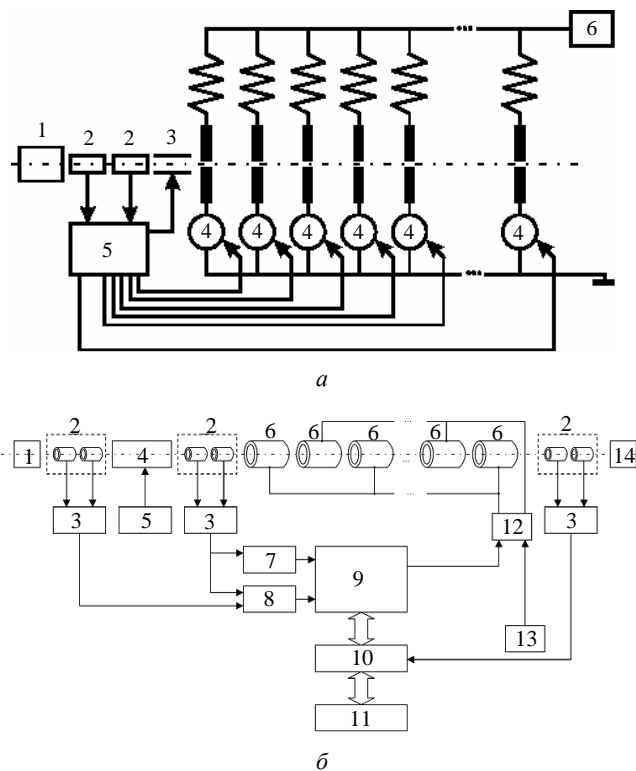


Рис. 7. Схема ускорителя:
а — с разрядниками;

- 1 — инжектор частиц; 2 — индукционные датчики;
3 — отклоняющая система; 4 — разрядники; 5 — схема управления; 6 — источник высокого напряжения;
- б — пылевых частиц:
1 — инжектор; 2 — индукционные датчики; 3 — усилители;
4 — линейный ускоритель; 5 — источник фиксированного высокого напряжения; 6 — дрейфовые трубки; 7 — селектор скоростей; 8 — селектор удельных зарядов; 9 — генератор изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке; 10 — блок сопряжения; 11 — электронно-вычислительная машина; 12 — усилитель пачки импульсов переменной длительности; 13 — каскадный генератор; 14 — мишень

Ускоритель работает следующим образом. В первоначальный момент времени все электроды заряжаются от источника высокого напряжения до некоторого потенциала. Инжектируемая частица проходит последовательно два индукционных датчика. Время пролета между датчиками прямо пропорционально скорости частицы. По этому времени схема управления формирует на своих выходах импульсы, которыми соответствующие разрядники последовательно заземляют соответствующие электроды. Таким образом, синфазно движению частицы создается ускоряющее электрическое поле. Если скорость частицы не попадает в заданный рабочий диапазон скоростей, то такая частица отклоняется системой, что позволяет не засорять ускорительный тракт неустойчивыми частицами.

К достоинствам этого ускорителя можно отнести то, что авторы отказались от ранее используемых конфигураций трубок дрейфа, так называемой ускоряющей системы Слоуна-Лоуренса. Применение одинаковых по длине ускоряющих секций сокращает продольные размеры ускорителя, а следовательно, такой ускоритель можно широко использовать для решения прикладных задач.

К недостаткам следует отнести нерешенную по сравнению с предыдущим ускорителем проблему узкого диапазона ускоряемых частиц, а также конструктивную сложность исполнения. Современные разрядники имеют малую долговечность (порядка 1000—10000 разрядов), а следовательно, такая система нуждается в частом профилактическом ремонте.

Для решения этой проблемы была предложена следующая конструкция ускорителя [21—23], структурная схема которого представлена на рис. 7, б.

Устройство работает следующим образом. Инжектор генерирует заряженные частицы в заданном диапазоне масс с частотой порядка 1 Гц. Заряженная частица последовательно проходит первый индукционный датчик, линейный ускоритель, второй индукционный датчик, цилиндрические электроды, третий индукционный датчик и попадает на мишень. Первая пара индукционных датчиков и линейный ускоритель предназначены для определения параметров частицы (удельного заряда Q/m и начальной скорости V_0). Пролетая внутри индукционного датчика, частица наводит на него потенциал обратного заряду частице знака. Так как датчик изготовлен из металла, то его поверхность эквипотенциальна, а значит, не имеет значения, с какой части снимать напряжение. По поступающим с индукционных датчиков сигналам селекторы скоростей и удельных зарядов формируют на своих выходах цифровой код начальной скорости частицы и код ее удельного заряда.

В селекторе скоростей измеряются временные интервалы пролета частицей центров датчиков для первого и второго индукционных датчиков. Измеренные временные интервалы прямо пропорциональны скорости движения частицы. Пройдя через линейный ускоритель, частица получает приращение скорости. Аналогично первому датчику работает второй. По поданным в генератор изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке кодам начальной скорости и удельного заряда на его выходе формируется пачка импульсов, которая создает ускоряющее поле между каждой парой электродов. Данное поле меняется во времени соответственно положению частицы в ускоряющем тракте. Параметры пачки выбираются из ряда данных для формирования импульсов, заранее заложенных в генератор изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке с ЭВМ.

Усилитель пачки импульсов переменной длительности усиливает сформированные генератором изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке импульсы. Усиленные импульсы поступают на цилиндрические электроды. Третий индукционный датчик подключен к блоку сопряжения и служит для получения выходных данных. Затем уже ускоренная частица попадает на мишень, и весь процесс повторяется. ЭВМ производит статистику эксперимента и динамическое управление ускорителем.

Интерес представляет также конструкция циклического ускорителя пылевых частиц, описанная в [24]. Хотя ускорение частиц в ней и происходит под действием лазерного пучка, но управление траекторией частицей — электродинамическое, поэтому мы считаем логичным привести ее в данном обзоре (рис. 8, а).

Этот ускоритель состоит из четырех трубок М1—М4, а также четырех дефлекторов, выполненных в виде загнутых плоских конденсаторов. Частица ускоряется в трубках под действием лазера, а в дефлекторах — под действием электрического поля искривляет свою траекторию. Напряжение на дефлекторах является функцией номера витка частицы. В работе [24] приводятся расчетные данные: частица диаметром 1 мкм из карбоната кремния (SiC) и зарядом $3,15 \cdot 10^{-13}$ Кл (удельный заряд 187,6 Кл/кг) по прохождении 4650 витков будет иметь скорость 106 км/с. Однако получить на выходе инжектора поток одинаковых частиц практически невозможно. Поэтому перспективы построения такого ускорителя без внесения каких-либо изменений в управляющей системе выглядят неубедительными. Для устранения вышеобозначенной проблемы был предложен ускоритель [25], конструкция которого показана на рис. 8, б.

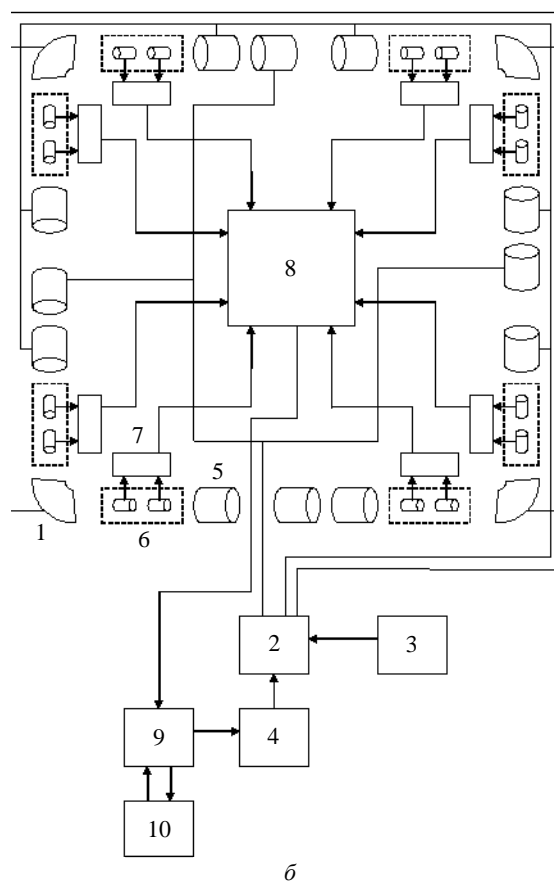
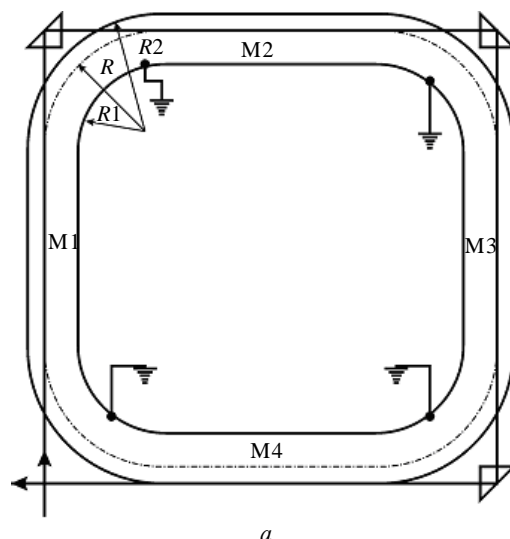


Рис. 8. Конструкции циклического ускорителя частиц (а); циклического электродинамического ускорителя (б)

Устройство содержит тороидальные дефлекторы 1, расположенные по углам квадрата и подключенные к выходу высоковольтного усилителя 2, входы которого подключены к выходам высоковольтного источника питания 3 и генератора измеряемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке 4; электродинамические ускоряющие секции, состоящие из цилиндрических электродов 5, расположенных в ребрах квадрата и соединенных так, что электроды с нечетными но-

мерами подключены к одному, а с четными номерами к другому выходу высоковольтного усилителя 2; индукционные датчики 6, расположенные в начале и в конце ускоряющих секций, подключены ко входам усилителей 7, выходы последних подключены ко входам сумматора 8, выход которого подключен ко входу блока сопряжения 9; ЭВМ 10, входы которого подключены к выходам блока сопряжения 9, а выходы — к его входам

Устройство работает следующим образом. Частица с известными удельным зарядом попадает в электродинамический ускоритель через отверстие в первом тороидальном дефлекторе 1. Затем она проходит через индукционные датчики 6. В ЭВМ происходит вычисление ее скорости. На основе известной скорости и удельного заряда ЭВМ через блок сопряжения 9 подает управляющий сигнал на генератор изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке 4, который через высоковольтный усилитель 2 подключен к попарно соединенным цилиндрическим электродам 5. Когда частица проходит промежуток между электродами к нему под действием управляющего сигнала прикладывается ускоряющий потенциал. Покинув ускоряющий тракт, частица проходит индукционные датчики для измерения ее скорости. В зависимости от измеренной скорости на внешнюю пластину тороидального дефлектора 1 через высоковольтный усилитель с генератора 4 подается сигнал определенной амплитуды и длительности, внутренняя пластина дефлектора заземлена. Под действием поля в дефлекторе происходит поворот частицы на 90° , и она попадает в следующую секцию ускорителя. Вышеописанный цикл ускорения повторяется до достижения необходимого ускорения. По окончании ускорения напряжение с тороидальных дефлекторов снимается, и частица выводится из ускоряющего тракта через отверстие в тороидальном дефлекторе. Результирующее ускорение является функцией ускоряющего напряжения электродинамических трубок.

Заключение

Дальнейшее развитие ускорителей предполагается вести по пути усложнения системы управления ускорителем, как пример — системы формирования напряжений на трубках дрейфа. Данному обстоятельству способствует стремительное развитие цифровой техники, благодаря чему становится возможным построение быстродействующих систем управления высокой степени сложности.

Литература

1. Манзон Б. М. Ускорение макрочастиц для управляемого термоядерного синтеза// Успехи физических наук. 1981. Т. 134. № 2. Август. С. 611—639.

2. Мерзиевский Л. А., Тутов В. М., Фадеев Ю. И., Швецов Г. А. Высокоскоростное метание твердых тел// Физика горения и взрыва. 1987. № 5. С. 77—91.

3. Новиков С. А., Петров В. А. Установки взрывного типа для механических испытаний материалов и конструкций: Обзор. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1989. — 37 с.

4. Голубятников А. Н., Леонтьев Н. Е., Пилюгин Н. Н. Методы повышения эффективности легкогазовых баллистических установок// Успехи механики. 2003. № 2. Апрель—июнь, С. 97—125.

5. Fechtig H., Grun E., Kissel J. Laboratory simulation. Charber 9, M. P./ Institute für Kernphysik, 69, Heidelberg 1, FRG. 1989. P. 594—601.

6. Акишин А. И., Новиков Л. С. Методика и оборудование имитационных испытаний материалов космических аппаратов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. — 90 с.

7. Семкин Н. Д., Пияков А. В., Воронов К. Е., Богоявленский Н. Л., Шепелев С. М. Инжектор заряженных пылевых частиц// Приборы и техника эксперимента. 2006. № 3. С. 154—159. (Semkin N. D., Piyakov A. V., Voronov K. E., Shepelev S. M., Bogoyavlenskii N. L. A Charged Dust Particle Injector// Instruments and Experimental Techniques, 2006. V. 49. № 3. P. 440—445).

8. Wang Zhehui, Wurden G. A. Hypervelocity dust beam injection for national spherical torus experiment// Review of Scientific Instruments. 2004. V. 75. № 10. October. P. 3436—3438.

9. Бедняков А. А., Гиляров Р. А., Дзагуров О. Б., Криволап В. В., Куликаускас В. С. Инжекция, формирование потока и контроль параметров твердых частиц, ускоряемых на электростатическом генераторе ЭГ-8// Приборы и техника эксперимента. 1998. № 2. С. 149—156.

10. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Новиков Л. С., Пияков А. В. Источник заряженных пылевых частиц: Патент на изобретение 2242849; Выдан в 2004 г.; БИ № 35, 2004.

11. Семкин Н. Д., Пияков А. В., Воронов К. Е., Шепелев С. М. Источник заряженных пылевых частиц: Патент на полезную модель 58839; Выдан в 2006 г.

12. Daniel E. Austin. Impactionionization mass spectrometry of cosmic dust// Thesis by Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. — California Institute of Technology. Pasadena, California, 2003.

13. Berglund R. N., Liu B. Y. H. Generation of monodisperse aerosol standards// Environmental Science and Technology. 1973. № 7(2). P. 147—53.

14. Семкин Н. Д., Шепелев С. М. Исследование потоков микрочастиц при электростатическом диспергировании жидкости// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2006. № 3. С. 44—51.

15. Friichtenicht J. F. Two-million-Volt electrostatic accelerator for hypervelocity research// Rev. Sci. Instrum. 1962. № 34. P. 209—212

16. Hasegawa S., Fujiwara A., Morishige K., Yano H., Nishimura T., Sasaki S., Hamabe Y., Ohashi H., Nogami K., Kawamura T., Iwai T., Kobayashi K., and Shibata H. Acceleration of microparticles to hyper velocities by using a 3.75 mv van de graaff accelerator// Lunar and Planetary Science XXX submitted. P. 1543—1544.

17. Friichtenicht J. F. Micrometeoroid simulation using nuclear accelerator techniques// Nucl. Instrum. Meth. 1964. № 28. P. 70—78.

18. Becker D. G., Friichtenicht J. F. Measurement and Interpretation of the Luminous efficiencies of Iron and Copper Simulated micrometeors// The Astrophysical Journal. 1971. V. 166. № 15. June. P. 699—716.

19. Беккер, Фрюхтенихт, Хамермеш и Лэнгмуор. Ускоритель для микрометеоритов// Приборы для научных исследований. 1965. № 10. С. 86, 87 (Becker D. G., Friichtenicht J. F., Hamermesh B., Langmuir R. V. Variable-Ferquence Radially-Stable Micrometeoroid Accelerator// Review of Scientific Instruments. 1965. V. 36. № 10. P. 1480, 1481).

20. Слеттери, Беккер, Хамермеш, Рой. Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов// То же. 1973. Т. 44. № 6. С. 89—97. (Slattery J. C., Becker D. G., Hamermesh B., Roy N. L. A Linear Accelerator for Simulated Micrometeors// Ibid. 1973. V. 44. № 6. June. P. 755—762).

21. Семкин Н. Д., Пияков А. В., Воронов К. Е., Богоявленский Н. Л., Горюнов Д. В. Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов// Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 140—147. (Instruments and Experimental Techniques. 2007. V. 50. № 2. P. 275—281).

22. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Пияков А. В., Помельников Р. А. Ускоритель высокоскоростных пылевых частиц: Патент на изобретение 2205525 РФ; Выдан в 2003. С. 2.

23. Семкин Н. Д., Пияков А. В., Воронов К. Е. Имитатор космической пылевой плазмы// Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 7. С. 24—29.

24. Pozwolski A. A compact laser-driven accelerator of macroparticles// Laser and Particle Beams. 2001. № 19. P. 249—252.

25. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Пияков А. В., Погодин А. П. Циклический ускоритель высокоскоростных твердых частиц: Заявка на изобретение 2006144682 от 14.12.2006.

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2008 г.

Evolution and prospects of development of devices for modelling the micrometeorites in laboratory conditions

N. D. Semkin, A. V. Piyakov, A. P. Pogodin
S. P. Korolev's Samara State Space University, Samara, Russia

Various constructions of injectors of charged particles and accelerators for modeling a collision of micrometeorites with materials of the space vehicles elements in laboratory conditions have been considered. Evolution of such devices is shown and ways of their further development are offered.

* * *